

文章编号: 1001-6112(2007)06-0577-06

塔里木盆地塔中天然气的地球化学特征及其成因

郭建军¹, 陈践发¹, 朱雷¹, 叶治续², 师生宝¹, 刘应辉³

(1. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200;

2. 中国石油天然气股份有限公司 冀东油田分公司 勘探开发研究院, 河北 唐山 063004;

3. 中国石油天然气股份有限公司 冀东油田分公司 南堡油田 2 号平台工程项目部, 河北 唐海 063200)

摘要:塔里木盆地塔中天然气的成因十分复杂, 长期以来存在不同的认识。对塔中天然气组分和碳同位素的地球化学特征研究表明, 塔中的天然气以烃类气体为主, 塔中东、西部天然气的组分和碳同位素存在显著差异, 塔中东部和 1 号构造带的天然气具有较高的干燥系数、较重的碳同位素比值和较高的氮含量。研究认为这些差异除了一定程度上受有机质类型和次生变化的影响外, 主要取决于有机质热演化程度的差异。塔中东部下古生界有机质成熟度的定型时间较早, 紧邻满加尔凹陷的寒武系烃源岩, 因此主要聚集了高一过成熟的寒武系烃源岩生成的天然气; 塔中西部主要发育中—上奥陶统有机质, 且有机质成熟度的定型时间较晚, 因此主要聚集了中等成熟的中—上奥陶统有机质生成的天然气。综合分析表明天然气主要生成于不同热演化阶段的干酪根, 原油裂解生气在本区不显著。

关键词:天然气; 地球化学特征; 奥陶系; 寒武系; 塔中地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF THE NATURAL GAS IN THE TAZHONG UPLIFT, THE TARIM BASIN

Guo Jianjun¹, Chen Jianfa¹, Zhu Lei¹, Ye Zhixu², Shi Shengbao¹, Liu Yinghui³

(1. *Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Chinese Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102200, China*; 2. *Research Institute of Exploration and Development, Jidong Oilfield Branch Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China*; 3. *The 2nd Ocean Engineering Project Department of Nanpu Oilfield, Jidong Oilfield Branch Company, PetroChina, Tanghai, Hebei 063200, China*)

Abstract: The genesis of the natural gas in the Tazhong Uplift is very complicated and there have been existing a variety of opinions for a long period. Based on the systematic research results of the composition and carbon isotope characteristics of the natural gas in the Tazhong Uplift, the natural gas in the Tazhong Uplift is mainly composed of hydrocarbon gases, but the composition and the carbon isotope in the west and east parts of the uplift differ apparently from each other. The natural gases in the eastern Tazhong Uplift and the No. 1 structural belt have higher values of dry coefficients, higher nitrogen contents and heavier carbon isotopic ratios. It is regarded that these differences are mainly determined by the different thermal evolution degrees of the organic matter, in addition to the organic matter type and the secondary alteration. The maturity of the Lower Paleozoic organic matter in the east part was finalized earlier, and the organic matter distributed immediately near the Cambrian source rock layer of the Manjiaer Sag. Therefore, the gas accumulated in the eastern Tazhong Uplift mainly came from the high to over matured Cambrian source rocks. As a contrast, the maturity of the Middle-Upper Ordovician organic matter in the west part was finalized later, and the gas accumulated in the western Tazhong Uplift mainly came from the middle matured Middle-Upper Ordovician source rocks. These results suggest that the natural gas in the Tazhong Uplift is mainly generated from the kerogens of various thermal evolution degrees, and the amount of the oil-pyrolysis gas is not significant.

Key words: natural gas; geochemical characteristics; Ordovician; Cambrian; Tazhong Uplift; The Tarim Basin

收稿日期: 2006-12-18; 修订日期: 2007-10-08。

作者简介: 郭建军(1974—), 男(汉族), 博士生, 工程师, 主要从事油气的成因与成藏研究。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202307)。

塔里木盆地是一个既富油又富气的叠合盆地。通过多年的勘探与研究,目前大多数人认为塔里木盆地台盆区的可动油主要来自中—上奥陶统烃源岩,并且优质烃源岩主要分布于中西部台缘斜坡相和陆源海湾相,主要包括塔中北坡、塔北南坡、阿瓦提凹陷以及柯坪露头区^[1];但也有人认为台盆区的油源主要为寒武系—下奥陶统^[2,3]。

天然气具有分子量小、运移速度快和逸散性强等特点,天然气的生成、运移、聚集和散失是一个长期的动态过程,影响因素繁多^[4~7]。塔里木盆地本身的石油地质条件十分复杂,因此盆地内天然气的研究具有更大的难度和不确定性。塔中的天然气在横向与垂向上的分布均比较广泛,平面上在塔中 I 号构造坡折带、塔中 10 号构造带以及塔中主垒带均有分布;层位上主要分布于奥陶系、志留系和石炭系。前人研究认为,塔中北斜坡的天然气主要来源于中—上奥陶统泥灰岩偏腐殖型的有机质,塔中主垒带的天然气主要是腐泥型有机质在成熟阶段的热解产物^[8~11];同时有人认为塔中石炭系及部分奥陶系的天然气可能存在原油裂解气^[2,3,12]。

总体上看,由于塔中的勘探程度仍较低,因此随着研究的不断深入和油气勘探的不断突破(特别是 I 号构造坡折带的突破),对于天然气成因的认识也有待于进一步补充。本研究结合最新的钻探成果,进一步系统探讨了塔中奥陶系天然气的地球化学特征及其成因。

1 天然气的地球化学特征

1.1 天然气的组分特征

1.1.1 奥陶系天然气的组分特征

塔中奥陶系天然气在平面上的分布十分广泛,其组分以烃类为主,烃类中以 CH₄ 为主。CH₄ 含量为 31%~93%,干燥系数大多高于 0.9,介于 0.73~0.99。从平面上来看,塔中东部天然气的干燥系数较高,西部相对较低;I 号构造坡折带(特别是 I 号构造带东段)的干燥系数较高,主垒带和北斜坡相对较低,古隆 1 井具有最高的干燥系数(表 1、图 1)。比较特别的是,塔中围斜区卡 1 区块中 1 井奥陶系天然气的干燥系数达 0.98,而中 1H 井奥陶系天然气的干燥系数仅为 0.73。

表 1 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的组分含量

Table 1 The Ordovician natural gas composition of the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

井号	层位	组分含量, %										C ₁ /C ₁₊	
		N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆		
古隆 1	O	3.21	22.15	73.20	0.68	0.08							0.99
塔中 1	O	14.11	0.54	80.79	2.48	1.05	0.68						0.95
塔中 122	O	6.43	1.43	73.25	8.74	5.02	0.84	2.09	0.55	0.68	0.97		0.79
塔中 16	O	11.35	3.35	83.04	1.38	0.60	0.22		0.06				0.97
塔中 161	O	3.99	0.14	93.00	1.37	0.81	0.41		0.28				0.97
塔中 162	O	1.31	0.95	83.77	8.71	3.34	1.33						0.86
塔中 168	O	3.61	13.34	78.22	2.50	1.28	0.71		0.34				0.94
塔中 169	O	3.99	5.93	84.60	1.94	0.37	0.03	0.08	0.02	0.02	0.02		0.97
塔中 24	O	14.88	0.28	81.00	2.43	0.93	0.12	0.25	0.03	0.08			0.95
塔中 26	O	11.12	0.82	85.41	1.44								0.98
塔中 30	O	1.11	13.45	82.82	1.47	0.44	0.12	0.23	0.08	0.09	0.18		0.97
塔中 38	O	30.70		63.90	2.40	0.80							0.95
塔中 44	O	6.09	10.76	79.89	1.51	0.64	0.13	0.17	0.10	0.31	0.39		0.96
塔中 54	O	10.42	5.12	80.66	2.27	0.74	0.13	0.25	0.08	0.10	0.24		0.95
塔中 58	O	2.60	0.08	90.78	2.67	1.47	0.33	0.69	0.24	0.29	0.86		0.93
塔中 62	O	4.08	1.87	91.80	1.35	0.39	0.11	0.17	0.06	0.06	0.10		0.98
塔中 621	O	3.95	1.57	91.67	1.47	0.59	0.15	0.26	0.08	0.01	0.24		0.97
塔中 622	O	3.02	2.57	92.21	1.24	0.43	0.12	0.20	0.06	0.06	0.09		0.98
塔中 62-2	O	4.50	2.35	90.97	1.34	0.40	0.11	0.17	0.06	0.05	0.05		0.98
塔中 69	O	0.82	15.06	76.56	4.24	1.51	0.34	0.66	0.20	0.23	0.38		0.91
塔中 70	O	7.48	2.33	87.36	1.43	0.47	0.16	0.24	0.10	0.10	0.34		0.97
塔中 71	O	17.17	0.22	64.48	5.36	4.71	1.38	2.71	1.06	1.13	1.79		0.78
塔中 82	O	7.66	1.78	84.61	3.22	1.27	0.34	0.48	0.15	0.15	0.34		0.93
塔中 821	O	6.61	3.06	87.60	1.44	0.56	0.19	0.28	0.10	0.09	0.06		0.97
塔中 824	O	5.29	0.55	76.60	5.83	5.22	1.32	2.52	0.88	0.99	0.81		0.81
塔中 45	O	5.68	2.46	83.36	4.46	1.53	0.38	0.73	0.30	0.38	0.72		0.91
中 1	O	7.06	0.20	91.03	1.02	0.32	0.06	0.15	0.07	0.10			0.98
中 1H	O	5.39	51.90	31.24	4.74	3.86	0.63	1.29	0.38	0.49	0.07		0.73

注:塔中 82、塔 62 井区的数据来自塔里木油田研究院(2006)。

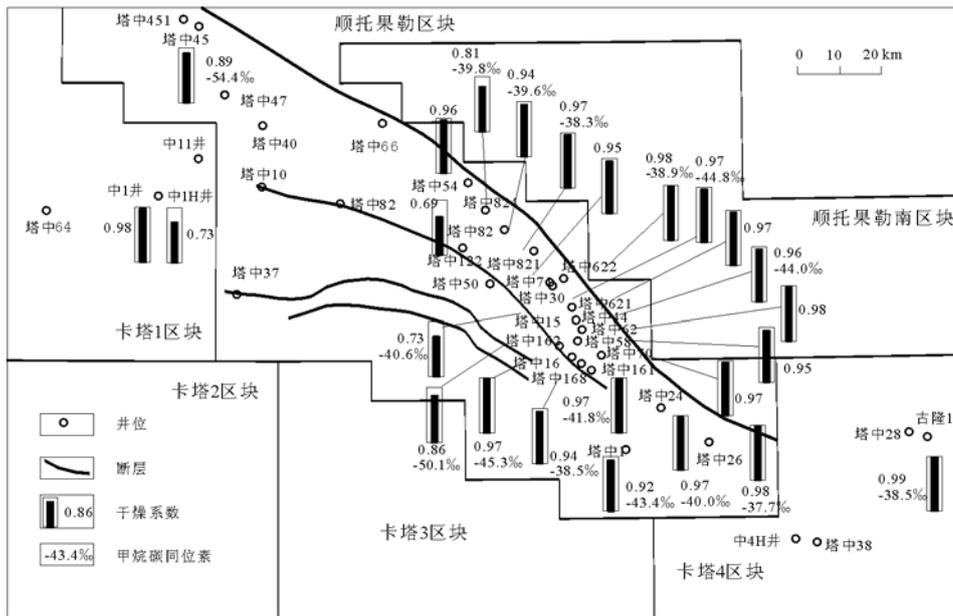


图 1 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的干燥系数

Fig. 1 Dry coefficient of the Ordovician natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

非烃组分以 N_2 和 CO_2 为主,个别样品的 N_2 含量可达 30% 以上。从平面上来看,塔中 I 号构造坡折带的 N_2 含量大多在 10% 以内,塔中东部的 N_2 含量高于西部(表 1、图 2)。有研究表明在德国北部沉积盆地中, N_2 含量大于 50% 的区域正好对应于沉积盆地中有机质成熟度指标 R_o 大于 3.0% 的区域;同时实验也表明, N_2 大量生成于有机质高一过成熟阶段^[13,14]。因此塔中天然气中高含量的 N_2 可能主要来源于高一过成熟的有机质。

CO_2 在塔中天然气中的含量也较高,个别达到 20% 以上。除古隆 1 等井的几个高值外,大多数样品中 CO_2 含量与 N_2 含量的变化趋势相反,即东部的 CO_2 含量较低,而西部相对较高(表 1、图 2)。

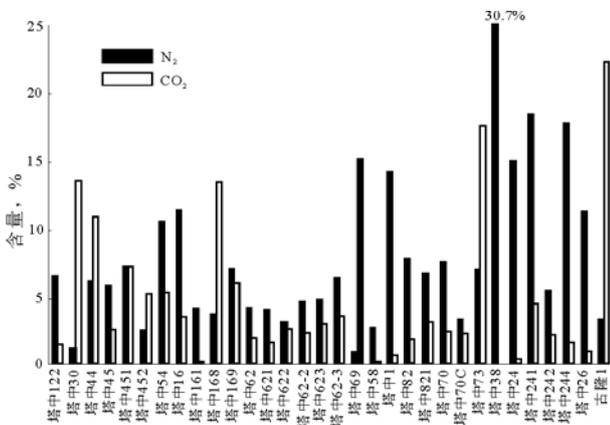


图 2 塔里木盆地塔中奥陶系天然气中 N_2 和 CO_2 的含量

Fig. 2 N_2 and CO_2 content in the Ordovician natural gas from Tazhong Uplift, the Tarim Basin

1.1.2 志留系天然气的组分特征

志留系的天然气较少,本文主要研究了塔中 10 号构造带的塔中 11 井区、塔中 122 井、塔中 16 井区以及东南部的塔中 242 井的天然气。结果表明天然气组成中以 CH_4 为主, CH_4 含量介于 74%~92%,干燥系数介于 0.86~0.97, N_2 为 4%~15%, CO_2 含量较低,介于 0.6%~2.0%(图 3)。

1.1.3 石炭系天然气的组分特征

石炭系的天然气也较少,本文主要讨论了塔中 16 井区(6 口井)、塔中 24 井、塔中 4 井区(19 口井)、塔中 6 井和塔中 75 井的天然气特征。结果表明天然气中 CH_4 含量变化较大,所有样品中 CH_4 含量介于 32%~88%,干燥系数介于 0.63~0.97, N_2 含量为 7%~24%, CO_2 的含量介于 0.1%~2.9%(图 4)。

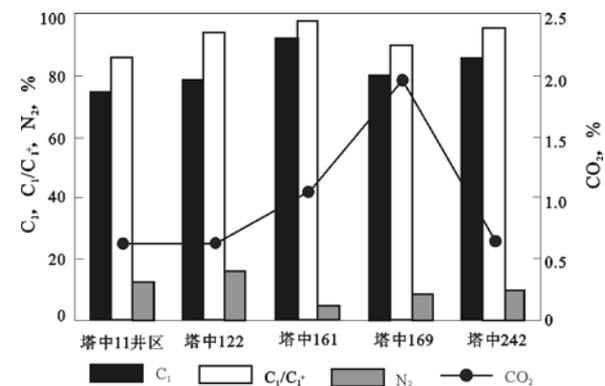


图 3 塔里木盆地塔中志留系天然气的组成特征

Fig. 3 Composition of the Silurian natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

1.2 天然气的碳同位素特征

天然气的甲烷碳同位素在有机质的热演化过程中不断变重,因而可以用来估算天然气的成熟度。对于乙烷的碳同位素,很多研究者认为乙烷碳同位素在有机质的热演化过程中变化较小,具有较好的继承性,可以用来判别有机质的类型。

塔中奥陶、志留和石炭系的天然气中,各组分的碳同位素均呈“正序”分布,但不同样品间的差异较大(图5),乙烷的碳同位素值均小于-31‰,表明天然气均为油型气,来源于不同热演化阶段的下古生界腐泥型烃源岩。

从平面上来看,塔中不同井奥陶系天然气的甲、乙烷碳同位素存在差异,并且有些差异较大。

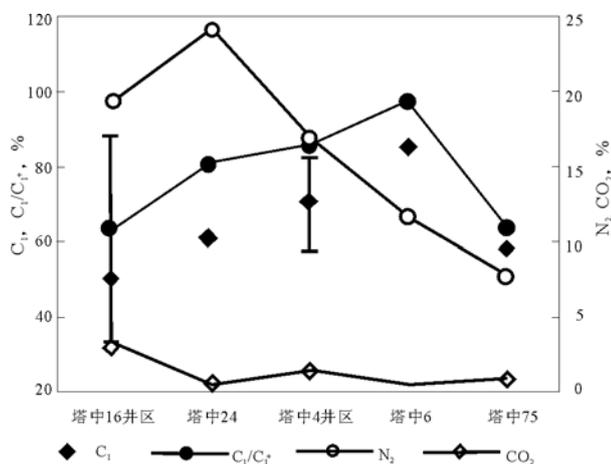


图4 塔里木盆地塔中石炭系天然气的组成特征
Fig. 4 Composition of the Carboniferous natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

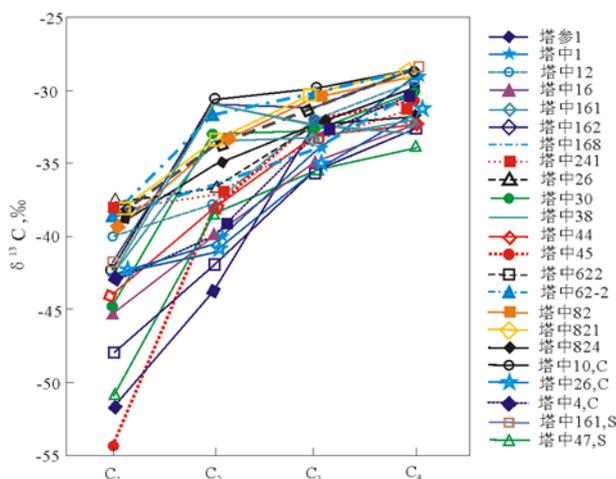


图5 塔里木盆地塔中天然气组分的碳同位素特征
图例中未标出层位的为奥陶系天然气
Fig. 5 The carbon isotope of the natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

总体上甲、乙烷的碳同位素均具有东高西低的特征(图6)。塔中I号构造带东段天然气的甲烷、乙烷碳同位素均重于西段和主垒带,并且甲、乙烷碳同位素的差值自西向东具有减小的趋势,表明东、西段天然气的成熟度存在显著差异;塔中I号构造带西端的塔中45井具有最轻的甲烷碳同位素,其甲、乙烷碳同位素的差值也较大。

众所周知,甲烷的碳同位素在有机质的热演化过程中不断变重,且甲、乙烷碳同位素的差值也不断减小,因而可以用来估算天然气的成熟度。很多研究者认为乙烷碳同位素在有机质的热演化过程中变化较小,具有较好的继承性;但也有研究表明,乙烷的碳同位素在热演化过程中也不断变重^[15~20]。由此认为,塔中奥陶系天然气甲、乙烷碳同位素的差异可能主要来源于天然气成熟度的差别(图7)。东部天然气的成熟度较高,甲、乙烷的碳同位素值较重,甲、乙烷碳同位素的差值较小;而西部天然气的成熟度较低,甲、乙烷的碳同位素值均较轻,甲、乙烷碳同位素的差值较大。

2 塔中天然气的成因

康玉柱^[11]通过气源岩对比认为,塔中北斜坡的天然气来自中—上奥陶统泥灰岩,中部凸起的天然气来自寒武系—下奥陶统烃源岩,塔中1井天然气来源于寒武系源岩。谢增业等^[8]研究认为塔中主垒带天然气中甲烷、乙烷的碳同位素值均轻,是海相腐泥型有机质在成熟阶段的热降解产物;塔中北斜坡的天然气由海相偏腐殖型的有机质生成,乙烷碳同位素值偏重。

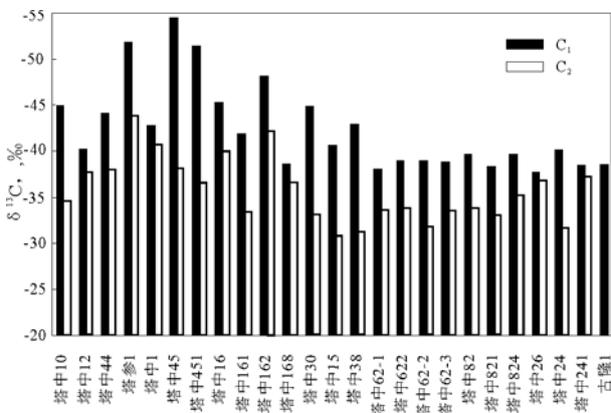


图6 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的甲、乙烷碳同位素变化特征
Fig. 6 Methane and ethane carbon isotope values of the Ordovician natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

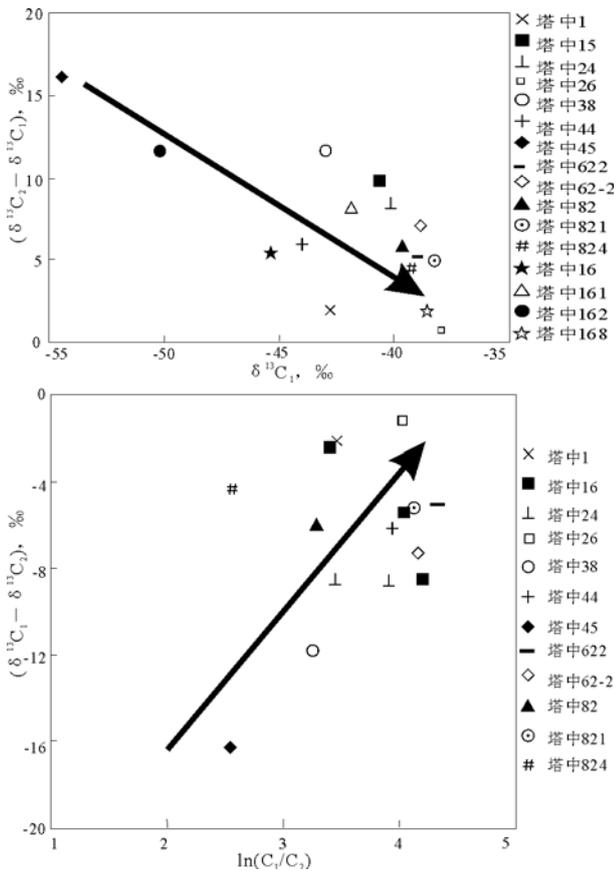


图 7 塔里木盆地塔中不同热演化阶段的天然气
Fig. 7 Natural gas at different thermal evolution degrees from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

根据 Schoell [15] 的天然气成因判别模型,塔中隆起的天然气可分为 3 种类型:有机质成熟阶段热解生成的原油伴生气、高成熟阶段生成的热裂解气以及混合成因气(图 8)。塔中 I 号构造坡折带东段的天然气以热裂解成因为主,塔中西部的天然气以热裂解成因的伴生气与混合成因气为主。

塔中隆起(特别是 I 号构造带)是否存在原油裂解气仍没有一个确切的结论。从大量的模拟试验来看,一方面,原油发生热裂解需要比较特殊的 PVT 条件,温度并不是唯一的主导因素[21];另一方面,在温度足够高的情况下,原油是否裂解和裂解的程度取决于体系(储层)的开放程度[22~24]。根据 Prinzhofer 等[25] 提出的干酪根裂解气与原油裂解气的判断模型(图 9)来看,塔中隆起的天然气 $\ln(C_2/C_3)$ 变化较小,而 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$ 值的变化较大,表明塔中天然气主要来自干酪根的热裂解,原油裂解生气可能不显著。

总的来看,塔中不同区域聚集了来自不同热演化阶段的奥陶系和寒武系有机质生成的天然气。塔中东、西段之间天然气组分、干燥系数、 N_2 含量和

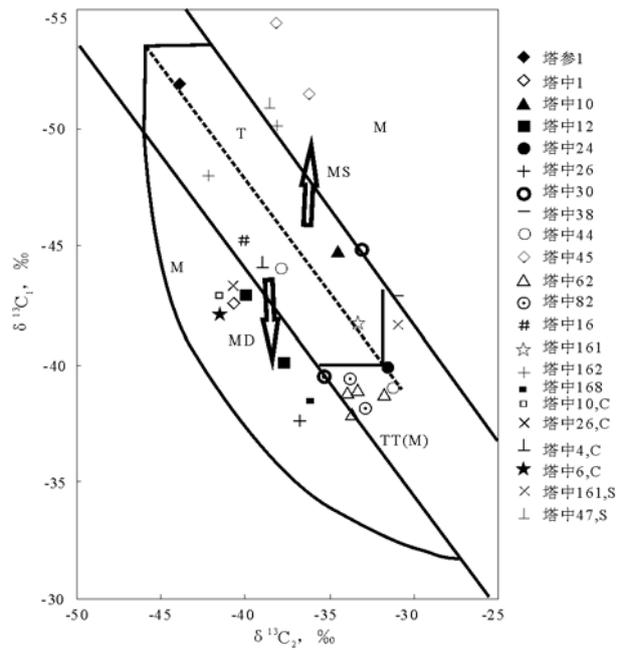


图 8 塔里木盆地塔中天然气的成因类型判别
T 为原油伴生气;TT(M)为腐泥型有机质热裂解生成的干气;M 为混合成因气;MS 为浅部天然气的迁移;MD 为深部天然气的迁移

Fig. 8 Genetic type of the natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

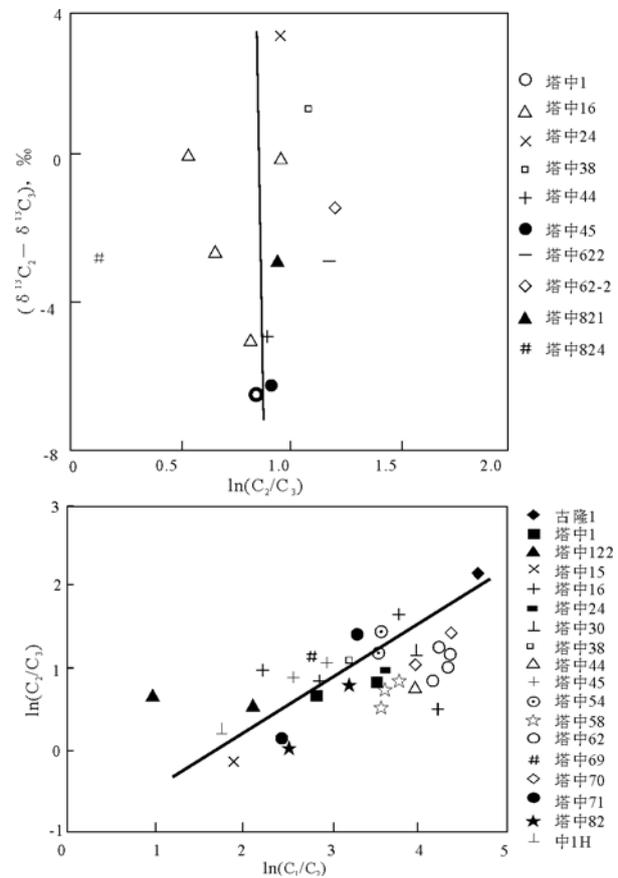


图 9 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的成因判别
Fig. 9 Genetic discrimination of Ordovician natural gas from the Tazhong Uplift, the Tarim Basin

碳同位素的变化趋势,除了受有机质类型的影响之外,主要取决于有机质的热演化阶段。王铁冠等通过实测的 R_o 剖面研究表明,塔中东、西部下古生界有机质成熟度定型的时间存在显著的差异,西部中 1 井、顺 1 井下古生界有机质的成熟度定型于三叠纪以后,而东部塔中 1 井、古隆 1 井下古生界有机质的成熟度定型于石炭纪以前。因此认为,塔中东段主要捕获了晚期高一过成熟的寒武系烃源岩生成的天然气,而塔中西段主要捕获了中等成熟的中—上奥陶统烃源岩生成的天然气。由于 I 号构造带东段在垂向上沟通了下部的寒武系烃源岩,因此 I 号构造带主要聚集了高一过成熟的天然气。

3 结论

1)塔中东、西部天然气的组分和碳同位素均存在显著差异,塔中东部和 I 号构造带的天然气具有较高的干燥系数、较高的 N₂ 含量和较重的碳同位素比值,这些差异主要决定于生气母质热演化程度的不同。

2)塔中东部下古生界有机质成熟度的定型时间较早,同时也紧邻满加尔凹陷的寒武系烃源岩,因此主要聚集了高一过成熟的寒武系烃源岩生成的天然气;塔中西部下古生界有机质成熟度的定型时间较晚,且与中—上奥陶统烃源岩相邻,因此主要聚集了中等成熟的中—上奥陶统有机质生成的天然气。

3)塔中隆起的天然气主要来自不同热演化阶段干酪根的裂解,原油裂解生气不显著。

参考文献:

- 张水昌,梁狄刚,张宝民等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社,2004. 1~433
- 周新源,王招明,杨海军等. 塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J]. 海相油气地质,2006,11(1):45~51
- 韩剑发,梅廉夫,杨海军等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气来源与运聚成藏研究[J]. 天然气地球科学,2007,18(3):426~435
- 史基安,孙秀建,王金鹏等. 天然气运移物理模拟实验及其组分分异与碳同位素分馏特征[J]. 石油实验地质,2005,27(3):293~297
- 朱华银,李剑,李拥军. 天然气运聚影响因素研究[J]. 石油实验地质,2006,28(2):152~154
- 雷天柱,张更新,邱军利等. 硫对甲烷碳同位素分馏的影响[J]. 石油实验地质,2006,28(2):173~176
- Prinzhofer A, Mello M R, Takaki T. Geochemical characterization of natural gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimates[J]. AAPG Bull, 2000, 84(8):1152~1172
- 李剑,陈孟晋,蒋助生等. 塔里木盆地塔中地区天然气气源对比[J]. 石油勘探与开发,1999,26(6):33~35
- 谢增业,李剑,卢新卫. 塔里木盆地海相天然气乙烷碳同位素分类与变化的成因探讨[J]. 石油勘探与开发,1999,26(6):27~29
- Huang D F, Liu B Q, Wang T D, et al. Genetic type and maturity of Lower Paleozoic marine hydrocarbon gases in the eastern Tarim Basin[J]. Chemical Geology, 1999, 162(1):65~77
- 康玉柱. 塔里木盆地大气田形成的地质条件[J]. 石油与天然气地质,2001,22(1):21~25
- 陈世加,付晓文,沈昭国等. 塔中地区石炭系及部分奥陶系储层天然气的成因[J]. 天然气工业,2001,21(1):39~41
- Krooss B M, Littke R, Muller B, et al. Generation of nitrogen and methane from sedimentary organic matter: Implication on the dynamics of natural gas accumulations[J]. Chemical Geology, 1995, 126:291~318
- Littke R, Krooss B, Idiz E, et al. Molecular nitrogen in natural gas accumulations: generation from sedimentary organic matter at high temperatures[J]. AAPG Bull, 1995, 79(3):410~430
- Schoell M. Genetic characterization of natural gases[J]. AAPG Bull, 1983,67(12):2225~2238
- James A T. Correlation of natural gases by use of carbon isotopic distribution between hydrocarbon components [J]. AAPG Bull, 1983, 67(7):1176~1191
- James A T. Correlation of reservoir gases using the carbon isotopic compositions of wet gas components[J]. AAPG Bull, 1990, 74(9):1441~1458
- Berner U, Faber E, Scheeder G, et al. Primary cracking of algal and landplant kerogens: kinetic models of isotopic variations in methane, ethane and propane[J]. Chemical Geology, 1995, 126:233~245
- Lorant F, Prinzhofer A, Behar F, et al. Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases[J]. Chemical geology, 1998, 147: 249~264
- Rooney M A, Claypool G E, Chung H M. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbon[J]. Chemical Geology, 1995, 126:219~232
- Barker C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs[J]. AAPG Bull, 1990, 74(8):1254~1261
- Battani A, Sarda P, Prinzhofer A. Basin scale natural gas source, migration and trapping traced by noble gases and major elements: the Pakistan Indus basin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 181: 229~249
- Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz J L, et al. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. Organic Geochemistry, 1991, 19(1-3): 173~189
- Horsfield B, Schenk H J, Mills N, et al. An investigation of the in-reservoir conversion of oil to gas: compositional and kinetic findings from closed-system programmed-temperature pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19(1-3): 191~204
- Prinzhofer A A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. Chemical Geology, 1995, 126(3-4):281~290