

文章编号:0253-9985(2010)03-0335-08

塔里木盆地塔中地区天然气成因及其差异

王祥^{1,2}, 张敏³, 刘玉华⁴

(1. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 长江大学 地球化学系, 湖北 荆州 434023; 4. 中国石油化工股份有限公司 东北分公司 石油勘探开发研究院, 吉林 长春 130062)

摘要:通过对塔中天然气组分和碳同位素地球化学特征的系统分析,发现塔中天然气气态烃组分基本上呈正碳同位素系列, $\delta^{13}\text{C}_1 < -30\%$, 为有机成因烷烃气。通过 $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3) - \ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 关系及参数 $\text{C}_2/i\text{C}_4$ 与 C_2/C_3 关系的研究,认为奥陶系天然气属原油裂解成因天然气;石炭系天然气既有干酪根裂解气,也有原油裂解气。塔中东、西部不同的烃源岩和成熟度导致塔中东、西部天然气组分和碳同位素存在显著差别,西部天然气主要来源于中-上奥陶统烃源岩,东部天然气可能主要来自高-过成熟的寒武系烃源岩。硫酸盐热化学还原作用在区域上存在强弱之分,偏东部井区较西部井区强。

关键词:天然气成因;成熟度;硫酸盐热化学还原作用;塔中地区;塔里木盆地

中图分类号:TE133.1 文献标识码:A

Origins of natural gas in Tazhong area, the Tarim Basin and their differences

Wang Xiang^{1,2}, Zhang Min³ and Liu Yuhua⁴

(1. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

4. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Northeast Oil & Gas Company, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: A systematic analysis is conducted on compositions and geochemical characteristics of carbon isotopes of natural gas in the Tazhong area, Tarim Basin. It is found that the gaseous hydrocarbon compositions of the natural gas from the Tazhong area basically show a pattern of $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$ with their values of $\delta^{13}\text{C}_1$ all below -30% , indicating their organic origin. According to the relationship between $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$ and $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$ and that between $\text{C}_2/i\text{C}_4$ and C_2/C_3 , natural gas in the Ordovician is believed to originate from pyrolysis of crude oil. While natural gas in the Carboniferous is mixed gas originating from pyrolysis of both kerogen and crude oil. In the eastern and western parts of the Tazhong area, the source rocks are different in age and thermal history, leading to the significant differences of hydrocarbon compositions and carbon isotopes of natural gas in these areas. In the western part, natural gas mainly originates from the Middle-Upper Ordovician source rocks. While in the eastern part, natural gas probably originates from the high-to over-mature Cambrian source rocks. Thermochemical sulfate reduction in the eastern wellblock is stronger than that in the western wellblock.

Keywords: origin of natural gas, maturity, thermochemical sulfate reduction, Tazhong area, Tarim Basin

油气勘探实践已证明塔里木盆地塔中地区油气资源十分丰富,目前在塔中 I 号构造坡折带、塔中 10 号构造带以及塔中主垒带(图 1)发现了巨

大的天然气资源,主要分布于奥陶系、志留系和石炭系。随着油气勘探工作的深入,勘探难度也越来越大。

收稿日期:2009-12-02。

第一作者简介:王祥(1980—),男,博士研究生,油气成藏机理与分布规律。

基金项目:国家自然科学基金项目(40973041)。

东部地区天然气干燥系数几乎均在 0.95 以上,显示出干气特征,而西部天然气干燥系数则基本上小于 0.9,属于典型的湿气(图 2a)。

非烃组分以 N₂ 和 CO₂ 为主,其中 N₂ 含量整体上具有中-高特征,最大值为 18.31%(塔中 26 井),最小值为 3.49%(塔中 45 井),主体分布在 5%~10%之间(图 3a)。塔中地区奥陶系天然气中 CO₂ 含量变化范围也较大,介于 0.17%~15.35%之间,平均值为 6.66%,主体介于 4%~8%之间。除塔中 26 井、塔中 54 井外,多数样品的 CO₂ 含量间差值不大,表明其成因可能具有一定的相似性。

2.1.2 石炭系天然气

塔中地区石炭系天然气主要分布于塔中 I 号断裂带、塔中北斜坡和塔中 4 井区附近。天然气组分以烃类气体为主,占气体总体积的 45.87%~98.10%。烃类气体中 CH₄ 含量最高,占烃类气体

体积的 39.99%~94.63%,多数集中在 60%~80%之间,且塔中 I 号断裂带样品 CH₄ 含量明显高于塔中 4 井区(图 2b);重烃气体含量最小值为 1.63%,最大值为 51.54%,塔中 4 井区和塔中 I 号断裂带天然气重烃含量普遍较高。干燥系数[$C_1/(C_1-C_5)$]介于 0.61~0.98 之间,塔中 4 井区、塔中 I 号断裂带、北斜坡各区块仅有少数样品干燥系数在 0.95 以上,其多数样品的干燥系数均未超过 0.95,说明塔中地区石炭系天然气具有以湿气为主,干气为辅的特征(图 2b)。

石炭系天然气中 N₂ 含量普遍较高,尤以塔中 4 井区天然气最为突出,最小值为 11.28%,最大值为 49.51%,平均为 21.47%。其中,含量在 20%以上的样品占 43%;其次是塔中 I 号断裂带天然气,N₂ 含量介于 1.34%~47.65%之间,平均为 15.68%,多数样品小于 20%(图 3b);塔中北斜

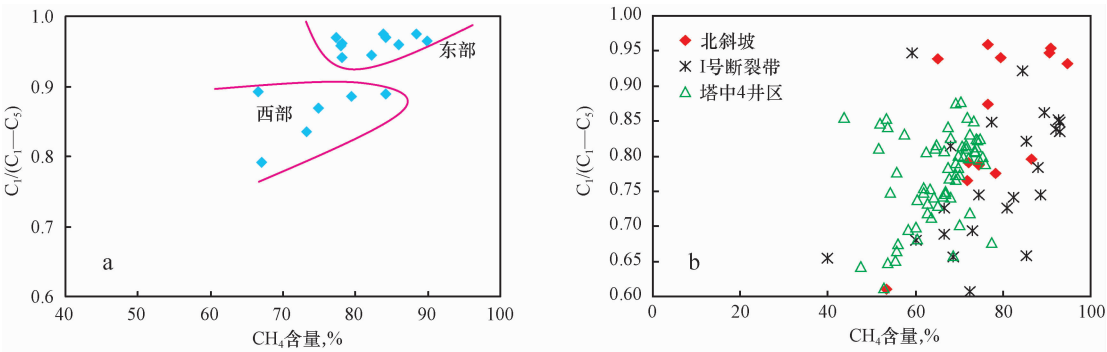


图2 塔中地区天然气干燥系数和 CH₄ 含量的关系
Fig. 2 Relationship between drying coefficient of natural gas and CH₄ content in Tazhong area
a. 奥陶系; b. 石炭系

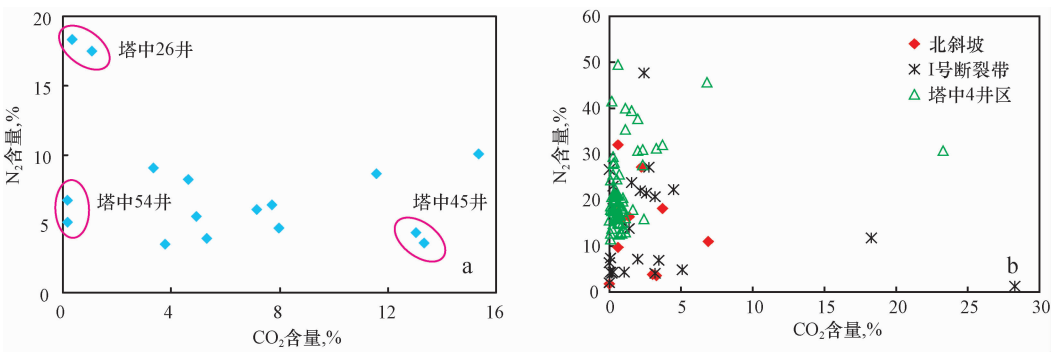


图3 塔中地区天然气中 N₂ 和 CO₂ 含量的关系
Fig. 3 Relationship between N₂ and CH₄ content in natural gas from Tazhong area
a. 奥陶系; b. 石炭系

坡天然气样品 N_2 含量主要分布在 10% ~ 20% 之间,整体上明显低于塔中 4 井区和塔中 I 号断裂带。 CO_2 含量则相对较低,除少数几个样品在 15% 以上,绝大多数分布在 5% 以下,不同区块之间的 CO_2 含量差异较小。

2.2 碳同位素分布特征

从天然气碳同位素组成中可以看出(表 1),塔中地区天然气甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 普遍较轻,为 -54.4‰ ~ -37.7‰,平均为 -43.6‰,乙烷碳同位素 $\delta^{13}C_2$ 为 -42.1‰ ~ -31.2‰,平均

为 -36.98‰。其中奥陶系天然气中甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值差异较大,平均为 -43.43‰,乙烷碳同位素 $\delta^{13}C_2$ 平均为 -36.42‰。研究发现,以西部塔中 45 井为代表的奥陶系天然气样品中甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值(-54.4‰)明显低于东部以塔中 24、塔中 26 井为代表的样品, $\delta^{13}C_{2-1}$ 值则恰恰相反,西部(16.2‰)远高于东部(3.2‰和 3.9‰)。总体来说,沿塔中 I 号断裂带自西向东,甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值具有增大的趋势,而 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 值则呈逐渐减小的趋势(图 4,图 5),表明东、西部天然气成熟度可能存在一定差异。

表 1 塔中地区天然气碳同位素组成
Table 1 Composition of carbon isotopes in natural gas in Tazhong area

井号	层位	深度/m	碳同位素组成,‰				
			$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$	$\delta^{13}C_4$	$\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$
塔中 45	O	6 020.00 ~ 6 150.00	-54.40	-38.20	-32.00	-30.70	16.20
塔中 30	O	5 068.00 ~ 5 130.35	-44.85	-33.06	-32.86	-30.02	11.79
塔中 44	O	4 854.00 ~ 4 888.31	-44.00	-38.00	-33.10	-32.40	6.00
塔中 162	O	5 048.00 ~ 5 070.00	-48.00	-42.10	-35.50	-32.70	5.90
塔中 16	O	4 248.50 ~ 4 268.00	-45.28	-39.95	-35.03	-32.46	5.33
塔中 161	O	4 284.18 ~ 4431.00	-41.80	-33.40	-33.40	-32.00	8.40
塔中 168	O	4 670.00 ~ 4 686.00	-38.50	-36.60	-34.00	-30.00	1.90
塔中 24	O	4 452.00 ~ 4 465.00	-39.80	-36.60	-34.90	-30.80	3.20
塔中 26	O	4 300.00 ~ 4 315.00	-37.70	-33.80	-32.60	-29.80	3.90
塔中 38	O	3 685.82 ~ 3 704.89	-42.90	-31.20	-32.50	-32.90	11.70
塔中 12	O	5 175.30 ~ 5 241.81	-40.30	-37.70	-32.10	-29.40	2.60
塔中 4	C	3 566.00 ~ 3 607.00	-43.20	-40.05	-33.25	-30.24	3.15
塔中 421	C	3 258.50 ~ 3 260.00	-44.46	-39.91	-33.45	-30.19	4.55
塔中 6	C	3 710.90 ~ 3 728.69	-42.25	-41.40	-35.23	-30.97	0.85
塔中 101	C	3 738.00 ~ 3 740.00	-46.30	-32.70	-38.30	-36.90	13.60

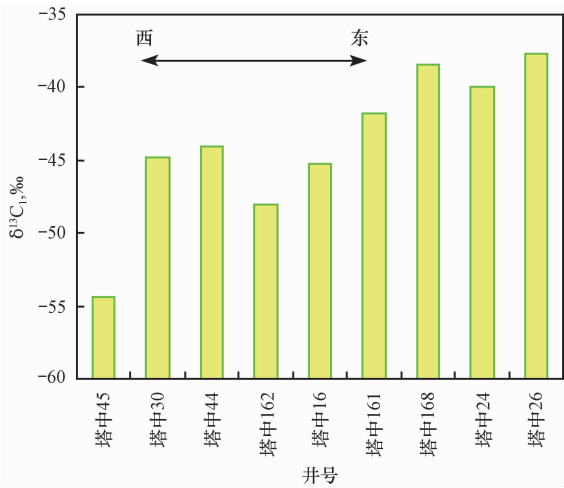


图 4 塔中地区奥陶系天然气 $\delta^{13}C_1$ 分布
Fig. 4 Distribution of $\delta^{13}C_1$ of natural gas in the Ordovician of Tazhong area

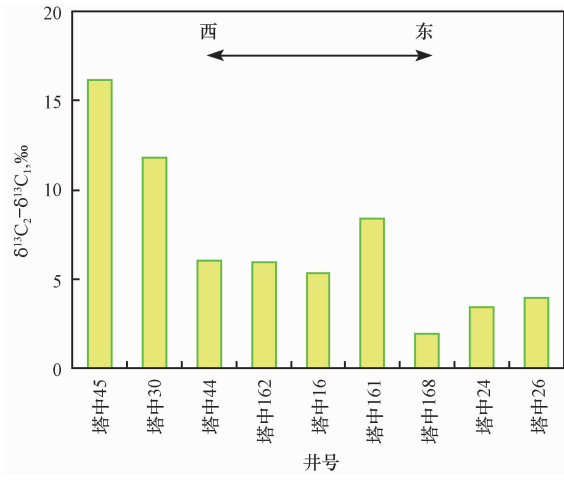


图 5 塔中地区奥陶系天然气 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 分布
Fig. 5 Distribution of $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ of natural gas in the Ordovician of Tazhong area

与奥陶系天然气相比,石炭系天然气样品数量相对较少,碳同位素也相对较轻,且分布较为集中,甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-46.3\text{‰} \sim -42.25\text{‰}$,平均为 -44.05‰ ;乙烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-41.4\text{‰} \sim -32.7\text{‰}$,平均为 -38.5‰ (表1)。其中塔中101井天然气甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -46.3‰ ,乙烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值较其他井样品明显偏重,为 -32.7‰ ,其 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ 值高达 13.6‰ ,这一特征可能与地温增高有关,有待于进一步研究。

2.3 天然气成因

自20世纪70年代以来,国内外学者通过大量的研究,先后提出了基于天然气碳同位素与其母质类型及演化阶段的相关模式,并以此来进行天然气的成因判识,在天然气的成因判识中得到了很好的应用^[8~11]。一般来说,无机成因烷烃气具有负碳同位素系列($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$),而有机的、同源同期的甲烷及其同系物具有正碳同位素特征($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$)^[12~14]。研究表明,塔中地区奥陶系和石炭系天然气样品气态烃组分基本上呈正碳同位素系列, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值均小于 -30‰ ,表明塔中地区天然气属于有机成因的烷烃气(表1;图6)。统计显示,油型气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值小于 -28‰ 。根据这一规律,塔中地区奥陶系和石炭系天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-42.1\text{‰} \sim -31.2\text{‰}$,均小于 -28‰ ,属于油型气范畴。

天然气既可来源于干酪根的直接裂解,又可来源于原油(包括胶质和沥青质)裂解气。对于干酪根热降解气和原油裂解气的判别,多数人引用 Prinzhofer 等提出的 $\ln(C_2/C_3) - \ln(C_1/C_2)$ 相关图来区分干酪根初次裂解和原油二次裂解形成的天然气^[15]。研究表明,干酪根裂解气和原油裂解气在组分特征上有明显的区别,干酪根裂解气 $\ln(C_2/C_3)$ 与 $\ln(C_1/C_2)$ 呈斜率小的反相关关系,而原油裂解气则为斜率大的正相关关系。塔中地区奥陶系天然气 $\ln(C_2/C_3)$ 值一般为 $-0.21 \sim 2.23$,变化较大,而 $\ln(C_1/C_2)$ 值变化不大,一般为 $2.52 \sim 4.12$,具有原油裂解气为主的特征(图7a)。塔中地区石炭系天然气成因差异明显不同,其中塔中4井区天然气显示出明显的干酪根裂解气特征,塔中16井区则显示出较为明显的干酪根裂解气和原油裂解气混合的特征,其他井区虽然样品较少,但从已有的样品分析来看,多以原油裂解气为主(图7b)。

Hill 等根据原油裂解实验结果提出 C_2/iC_4 与 C_2/C_3 参数可能是鉴定天然气成熟度的新指标^[16]。张敏^①等人通过模拟实验研究发现,当 C_2/C_3 小于 $2(C_2/iC_4 < 10)$ 时,天然气主要形成于镜质体反射率 R_o 小于 1.5% 的成熟演化范围,属于干酪根热降解作用形成的天然气;与此相反,当 C_2/C_3 大于 $2(C_2/iC_4 > 10)$ 时,属于原油裂解作用形成的天然气,并在实际应用中达到了良好的效果。从塔中地区天然气的 C_2/C_3 与 C_2/iC_4 关系图中发现,塔中

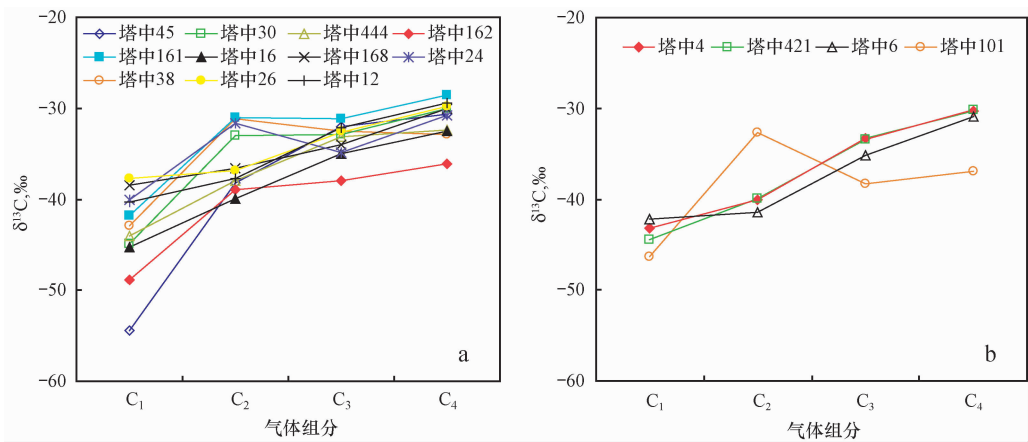


图6 塔中地区天然气碳同位素组成
Fig.6 Carbon isotopic composition of natural gas in Tazhong area
a. 奥陶系;b. 石炭系

① 张敏,黄光辉,肖中尧,等. 台盆区油裂解成气. 长江大学,2005

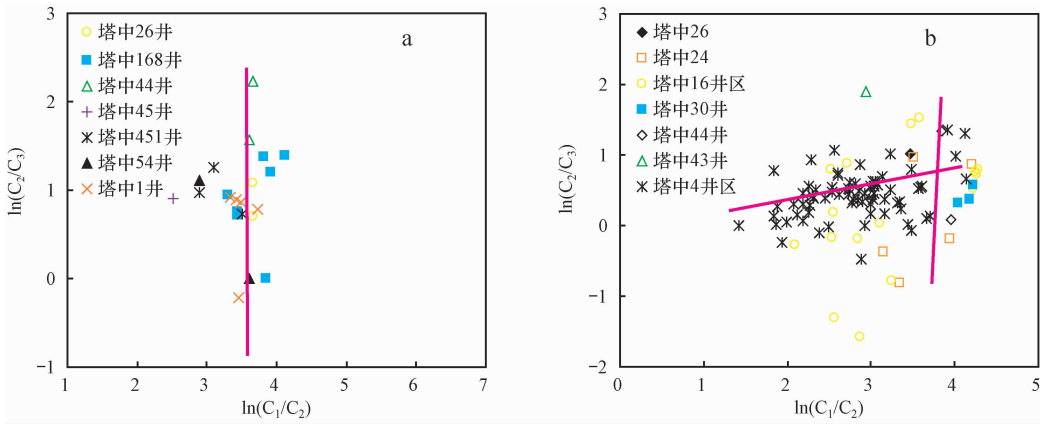


图 7 塔中地区天然气 $\ln(C_2/C_3)$ 与 $\ln(C_1/C_2)$ 关系

Fig. 7 Interrelation between $\ln(C_2/C_3)$ and $\ln(C_1/C_2)$ of natural gas in Tazhong area

a. 奥陶系; b. 石炭系

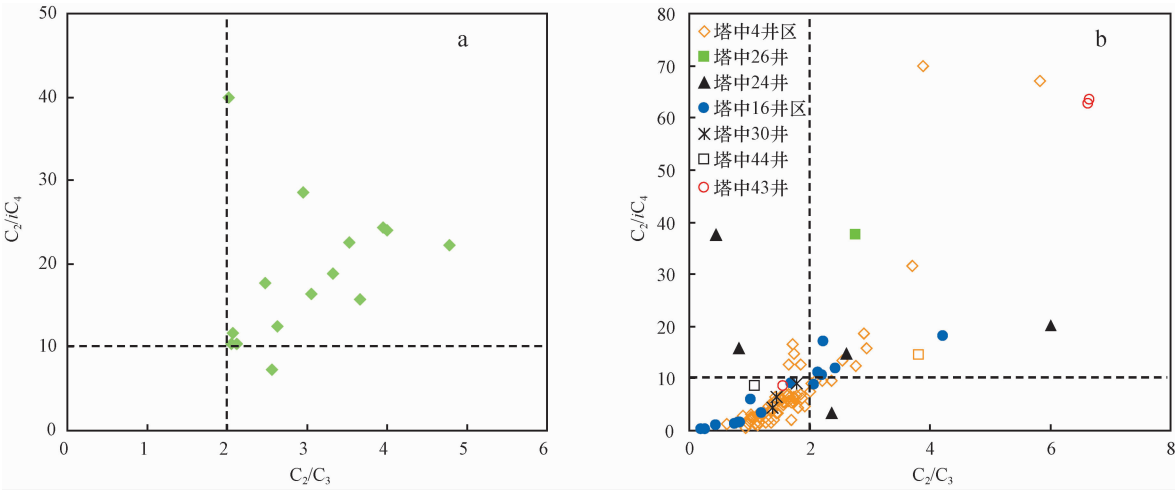


图 8 塔中地区天然气 C_2/C_3 与 C_2/iC_4 关系

Fig. 8 Interrelation between C_2/C_3 and C_2/iC_4 of natural gas in the Tazhong area

a. 奥陶系; b. 石炭系

奥陶系天然气 C_2/C_3 均在 2 以上, C_2/iC_4 也基本在 10 以上, 反映出该层系天然气成熟度较高, 属原油裂解成因天然气; 塔中石炭系天然气成熟度差异较大, 大多数天然气样品 C_2/C_3 小于 2, C_2/iC_4 小于 10, 以塔中 4 井区和塔中 16 井区最为明显, 充分显示出以干酪根裂解气为主, 原油裂解气为辅的特征 (图 8)。

3 东、西部天然气差异及其原因

3.1 东、西部差异

根据塔中地区天然气组分和碳同位素特征

研究表明, 奥陶系东西部天然气存在明显的差异, 主要表现在如下 3 个方面: ①天然气干燥系数东部高于西部, 东部塔中 24 井和塔中 26 井最高 (0.96 ~ 0.98), 西部塔中 45 井和塔中 451 井相对较低 (0.84 ~ 0.87); ②西部井区天然气中 N_2 含量明显低于东部, 东部塔中 26 井为 18.31%, 西部塔中 45 井为 3.49%; ③东部井区天然气甲烷碳同位素重于西部, 东部塔中 24 井和塔中 26 井为 $-40\text{‰} \sim -37.7\text{‰}$, 西部塔中 45 井为 -54.4‰ , $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 值西部塔中 45 井 (16.2‰) 远高于东部塔中 24 井和塔中 26 井 (3.2‰和 3.9‰)。

3.2 原因分析

3.2.1 源岩热演化史

有关塔中地区油气来源前人已做了大量研究。目前认为存在两套潜在源岩对塔中油气成藏有贡献:中-上奥陶统烃源岩和寒武系-下奥陶统烃源岩^[17]。梁狄刚等认为目前塔里木盆地保存下来的海相工业油气,绝大多数来源于中、上奥陶统中等成熟烃源岩,并且中、上奥陶统烃源岩对塔中地区现今早古生代油气藏的贡献最大^①。王铁冠通过实测的 R_o 剖面研究,发现塔中东、西部的有机质热演化过程存在明显的不同步,东部有机质生油气的时间明显早于西部^②。庞雄奇等通过塔中源岩的热解资料,认为塔中寒武系-下奥陶统源岩排烃门限深度为4 600 m,门限镜质体反射率为1%,现今的等效镜质体反射率都超过了2%左右,目前处于高-过成熟阶段^③。张水昌等利用镜状体反射率、藻类体荧光参数、笔石体反射率等参数对塔中烃源岩的现今成熟度进行了系统分析,认为塔中西部等效镜

质体反射率范围介于0.83%~1.20%,基本上处于生油高峰阶段^[18]。依据塔中两套烃源岩的分布,塔中西部天然气的聚集可能主要来源于中-上奥陶统烃源岩的贡献,由于东部紧邻满加尔凹陷,天然气可能主要来自高-过成熟的寒武系烃源岩。

此外,塔中天然气地球化学特征研究表明,西部井区天然气主要以正常的原油伴生气为主(如塔中45井),东部井区天然气则主要为凝析油伴生气(如塔中26井),东部天然气成熟度明显高于西部。因此,塔中东部主要捕获了寒武系烃源岩生成的天然气,而塔中西部主要捕获了奥陶系烃源岩生成的天然气。

3.2.2 硫酸盐热化学还原作用(TSR)

硫酸盐热化学还原作用是指热动力驱动下,烃类与硫酸盐发生化学反应,将硫酸盐矿物还原生成 H_2S 、 CO_2 等酸性气体的过程。受TSR作用影响,天然气组分及碳同位素会产生显著变化:① CO_2 和 H_2S 含量增大,呈正相关关系;②TSR反

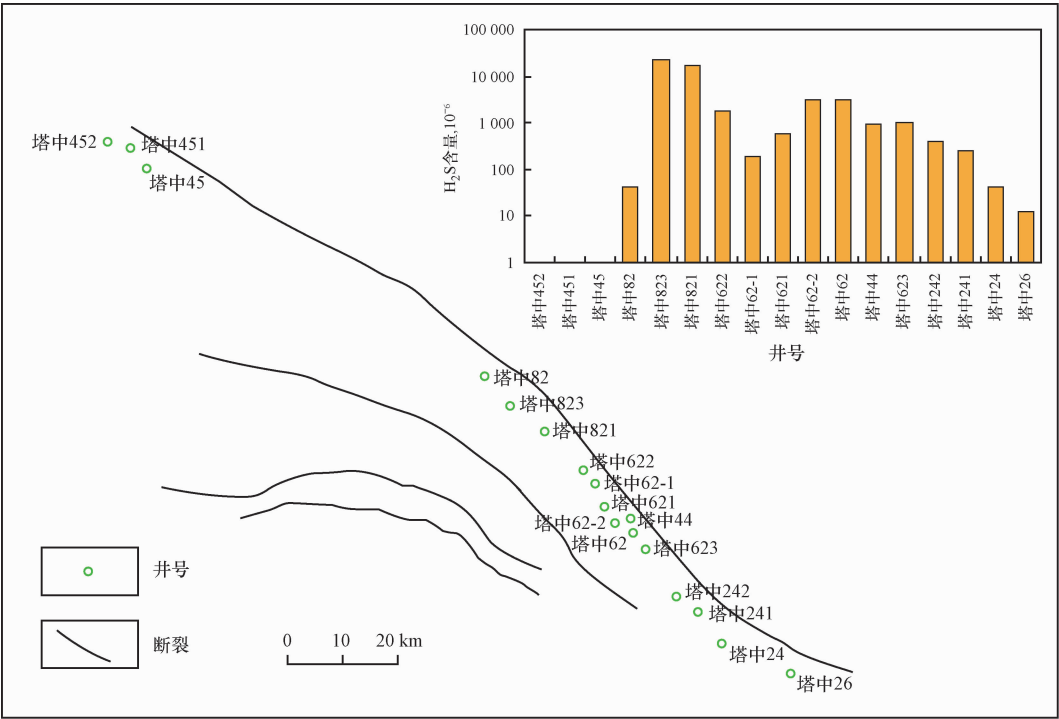


图9 塔中地区奥陶系天然气 H₂S 含量平面分布

Fig. 9 Plane distribution of H₂S content in natural gas in the Ordovician of Tazhong area

① 梁狄刚,金之钧. 塔里木盆地油气源及成藏研究. 石油大学(北京),2000
② 王铁冠,陈践发. 塔中周斜区东河砂岩及志留系油气成因与成藏特征研究. 中国石油大学(北京),2005
③ 庞雄奇,王英明,吕修祥,等. 塔里木盆地台盆区非背斜油藏形成条件与勘探方向. 中国石油大学(北京),2004

应消耗烃类,甲烷相对富集,使得重烃含量减少,干燥系数变大;③在 TSR 反应消耗烃类的过程中, ^{12}C — ^{13}C 键优先破裂,残留的烃类中相对富集 ^{13}C ,使得碳同位素变重;④硫同位素变重。

以往的研究表明,塔中地区寒武-奥陶系烃源岩中确实发生了硫酸盐热化学还原作用^[19~21]。从塔中地质背景来看,寒武系-下奥陶统存在两套储盖组合,其中中、下寒武统储盖组合由膏岩充当盖层,这种膏岩盖层在高温条件下与其下部的烃类进行反应,形成 H_2S 和 CO_2 ,使得在天然气中检测到 H_2S 和 CO_2 。塔中奥陶系天然气中可以检测到不同含量的 H_2S ,分布极不平衡。西部井区几乎检测不到 H_2S 的存在,而偏东部井区普遍可以检测出 H_2S ,且含量相对较高,尤其塔中82井区含量可达 $20\,000 \times 10^{-6}$ 以上(图9),TSR反应是导致高硫化氢含量不可忽略的一个原因^[5]。由此可见,塔中地区所发生的硫酸盐热化学还原作用在区域上存在强弱之分,偏东部井区较西部井区强。

4 结论

1) 塔中地区天然气组分以烃类气体为主,非烃气体含量具有中-高特征。奥陶系天然气 CH_4 含量高,近半数样品干燥系数在0.95以上,显示干气特征, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-54.4\% \sim -37.7\%$;石炭系天然气在塔中4井区、塔中I号断裂带、北斜坡地区仅少数样品干燥系数在0.95以上,多数样品的干燥系数小于0.95,显示以湿气为主,干气为辅的特征, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-46.3\% \sim -42.25\%$ 。

2) 塔中地区天然气均为有机成因气;奥陶系天然气具有原油裂解气的特征,属于原油裂解成因的天然气;石炭系天然气既有干酪根裂解气,也有原油裂解气,其中塔中4井区天然气显示出明显的干酪根裂解气特征,塔中16井区则显示干酪根裂解气和原油裂解气混合的特征,其他井区以原油裂解气为主。

3) 塔中地区奥陶系东西部天然气存在明显的差异。东部天然气干燥系数、 N_2 含量、甲烷碳同位素均高于西部。研究表明,不同时代的源岩及其成熟度和热化学硫酸盐还原作用等是造成天然气差异的主要原因。

- 比[J]. 石油勘探与开发,1999,26(6):33~35
- 2 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
- 3 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
- 4 郭建军,陈践发,段文标,等. 塔中I号构造带奥陶系天然气成因[J]. 天然气地球科学,2007,18(6):793~798
- 5 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
- 6 韩剑发,梅廉夫,杨海军,等. 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的非烃成因及其成藏意义[J]. 地学前缘,2009,16(1):314~326
- 7 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997. 279~283
- 8 Stall W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration[J]. Chemical Geology, 1977,20:121~149
- 9 Schoell M. Genetic characterization of natural gas[J]. AAPG Bulletin,1983,67(12):2 225~2 238
- 10 沈平,徐永昌. 中国陆相成因天然气同位素组成特征[J]. 地球化学,1991,20(2):144~152
- 11 戴金星,戚厚发. 鉴别煤成气和油型气等指标的初步探讨[J]. 石油学报,1985,6(2):31~38
- 12 戴金星. 天然气碳同位素系列倒转的成因研究[J]. 天然气工业,1990,10(6):5~20
- 13 宋成鹏,张晓宝,汪立群,等. 柴达木盆地北缘天然气成因类型及气源判识[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):90~96
- 14 郭小文,何生. 伊通盆地天然气成因类型与成藏[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):260~267
- 15 Prinzhofer A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. Chemical Geology, 1995,126(3~4):281~290
- 16 Hill R J, Yongchun Tang, Isaac R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 2003,34(1):1 651~1 672
- 17 张水昌,梁狄刚,朱光有,等. 中国海相油气形成的地质[J]. 科学通报,2007,52(增刊I):19~31
- 18 张水昌,梁狄刚,张宝民,等. 塔里木盆地海相油气的生成(卷七)[A]. 见:贾承造,编. 塔里木盆地石油地质与勘探丛书[C]. 北京:石油工业出版社,2004. 200~230
- 19 Cai C F, Hu W S, Worden R H. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician carbonates in Central Tarim[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001,18(6):729~741
- 20 蔡春芳,邬光辉,李开开,等. 塔中地区古生界热化学硫酸盐还原作用与原油中硫的成因[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,26(1):44~48
- 21 李开开,蔡春芳,蔡缪璐,等. 塔中地区上奥陶统热液流体与热化学硫酸盐还原作用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(2):217~222

参 考 文 献

- 1 李剑,陈孟晋,蒋助生,等. 塔里木盆地塔中地区天然气气源对

(编辑 张亚雄)