

文章编号: 1001-6112(2011)02-0188-05

群体包裹体地球化学特征及在油气源对比中的应用

米敬奎^{1,2,3}, 张水昌^{1,2,3}, 何 坤^{1,2,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院 实验研究中心, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份有限公司 油气地球化学重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石油勘探开发研究院 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 群体包裹体地球化学性质虽然不及单个包裹体地球化学特征能更准确地反映油气源及成藏方面的信息, 但群体包裹体地球化学分析仍是目前技术条件下比较可靠的利用包裹体地球化学信息研究油气源的重要手段。通过对我国塔里木盆地志留系及鄂尔多斯盆地奥陶系盐下储层群体包裹体地球化学特征分析认为: 塔里木盆地志留系砂岩包裹体中原油的生物标志物特征与目前保留下来原油的生物标志物特征一致, 目前保留下来的原油来源于中、上奥陶统源岩; 鄂尔多斯盆地龙探 1 井下古生界盐下包裹体中气体的地球化学特征与中部气田天然气的地球化学特征有较大差别, 乙烷同位素差别更大, 它不能反映天然气的来源。包裹体中与气藏中天然气地球化学特征对比说明鄂尔多斯盆地地下古生界天然气的来源主要是煤成气。

关键词: 群体包裹体; 油气地球化学; 油气源对比; 鄂尔多斯盆地; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1+13

文献标识码: A

Application of colonial inclusions geochemistry in oil-and-gas origin study

Mi Jingkui^{1,2,3}, Zhang Shuichang^{1,2,3}, He Kun^{1,2,3}

(1. *Experiment Research Center, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *Key Laboratory of Organic Geochemistry, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrocarbon Recovery Factor, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*)

Abstract: Although the geochemical characteristics of colonial inclusions do not work as well as those of single inclusion in oil-and-gas origin and accumulation analyses, they are still reliable and important ways to study oil-and-gas origin at present. Studies of the geochemical characteristics of colonial inclusions in sandstone reservoir (Silurian, the Tarim Basin) and carbonate reservoir under salt layer (Ordovician, the Ordos Basin) indicated that, the biomarkers of crude oil from inclusions in sandstone reservoir (Silurian, the Tarim Basin) were the same as those of present saved crude oil which originated from the middle and upper Ordovician. The geochemical characteristics of gas in under-salt inclusions (well Longtan1, the lower Paleozoic, the Ordos Basin) were different from those of gas from the central gas fields. $\delta^{13}\text{C}_2$ could not demonstrate natural gas origin due to big changes. The geochemical comparison between gas from inclusions and gas from gas pools proved that the natural gas found in the lower Paleozoic of the Ordos Basin was coal origin.

Key words: colonial inclusion; geochemistry; petroleum and source rock correlation; Ordos Basin; Tarim Basin

包裹体是一个封闭体系, 其中所包含的流体不容易受到各种后生作用的影响, 因此, 能更准确地反映油气源信息^[1-3]。由于包裹体非常小, 目前还没有一种好的分析单个包裹体地球化学特征的方法; 包裹体地球化学特征分析目前比较常用的方法还是对群体包裹体进行分析^[4-7]。但是, 对于多期油气充注, 特别是不同来源原油多期充注的含油气

系统, 不同期次形成(包括不同来源)包裹体的成分会相互干扰, 使得群体包裹体地球化学性质在油气源对比和油气成藏研究方面应用受到很大的影响。尽管如此, 群体包裹体地球化学特征研究在油气源对比和油气成藏研究方面具有无法替代的作用。本文将通过 2 个实例, 来介绍群体包裹体地球化学特征分析在油气源对比中的应用。

收稿日期: 2010-10-21; 修订日期: 2011-02-09。

作者简介: 米敬奎(1966—), 男, 教授, 主要从事有机地球化学与有机岩石学方面研究工作。E-mail: jkmi@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2008D-5006-01-02)。

1 特征分析需要注意的问题

关于包裹体地球化学特征的研究方法,作者曾在文献[4]中作过介绍,这里不再赘述。包裹体地球化学特征分析有几个问题需要注意:

1)被分析的岩石样品中包裹体要足够丰富。包裹体非常小(为 μm 级),一般为不超过 $100\ \mu\text{m}$,直径超过 $50\ \mu\text{m}$ 的都很少。所以,岩石样品中的包裹体要足够丰富,才能够保证对包裹体中油气的地球化学特征进行全面的分析。

2)岩石样品中的包裹体最好是一期形成。

3)在包裹体地球化学分析之前,对岩石颗粒样品表面吸附的液态原油和气体必须要处理干净。岩石颗粒表面的吸附气体在可以抽真空的烘箱中 $70\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 条件下把样品烘烤 $24\ \text{h}$ 即可完全去除。岩石颗粒表面与微裂缝中吸附液态烃的完全去除比较麻烦,不同学者会用不同的抽提方法^[5-6]。不管采用何种方法,最后的抽提液必须经过色谱检验干净为止。否则样品颗粒表面或微裂缝中的吸附液态烃会对包裹体中液态烃产生很大的影响。

2 实例研究

2.1 塔里木盆地油源对比

塔里木盆地发育中、上奥陶统和寒武系2套海相源岩,2套源岩生成的原油生物标志物特征有非常大的差别(图1)。从生物标志物特征来看,目前保存下来的原油大部分具有与中、上奥陶统源岩相似的生物标志物特征,但是储层抽提物中生物标志物非常复杂,除了少部分显示中、上奥陶统源岩以外,绝大部分显示寒武系原油特征或混合油特征^[1-2]。因此,对塔里木台盆区海相原油的认识存在来源于中、上奥陶统和寒武系2套海相源岩的争论。

从储层包裹体分布特征来看,志留系之上(包括志留系)砂岩中的包裹体与奥陶系及志留系方解石脉中液态烃包裹体的镜下特征和热力学特征都有比较大的差别。在砂岩中液态烃包裹体只有一种荧光颜色——黄绿色(图2a),与目前储层中原油的荧光特征一样,有机包裹体的均一温度比较高($110\sim 125\ ^\circ\text{C}$);而奥陶系及志留系方解石脉中液态

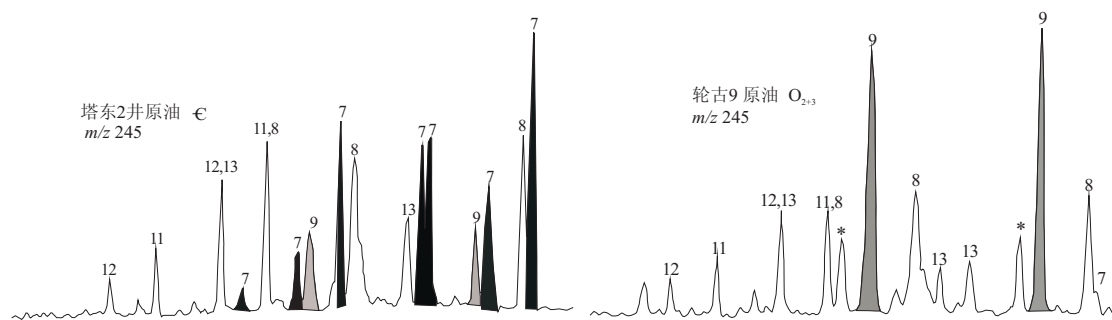
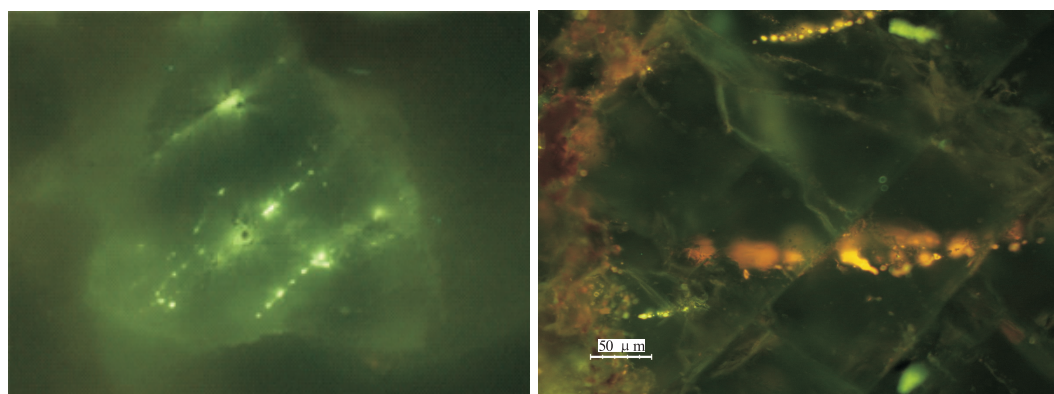


图1 塔里木盆地典型不同来源原油甲基三芳甾烷分布^[1]

7. 4, 23, 24-三甲基三芳甾烷(C_{29} 三芳甲甾烷); 8. 4-甲基-24乙基三芳甾烷(C_{29}); 9. 3-甲基-24乙基三芳甾烷(C_{29}); 11. 4-甲基三芳甾烷(C_{27}); 12. 3-甲基三芳甾烷(C_{27}); 13. 3-甲基-24甲基三芳甾烷(C_{29}); * . 不能确定的物质

Fig. 1 Distribution of methyl triaromatic steroid in crude oils of different origin, Tarim Basin



a. 乡3井,深度5 682 m, S,砂岩

b. 乡3井,深度5 668 m, S,砂岩中的方解石脉

图2 塔里木盆地乡3井不同产状液态烃包裹体荧光特征

Fig. 2 Fluorescence characteristics of liquid inclusions with different occurrence in well X3, Tarim Basin

烃包裹体的荧光特征比较复杂,发棕色、黄色、黄绿色荧光的液态烃包裹体都发育(图2b),液态烃包裹体的均一温度分布比较宽(65~125℃),包裹体均一温度分布一般呈现2、3个峰值区间,相比较,棕色与黄色包裹体的均一温度相对比较低。反映这些具有不同荧光特征和均一温度的包裹体为不同期次油气充注形成,而黄绿色荧光包裹体的均一温度最高,说明其形成时间最晚。

对塔北乡3井志留系砂岩及砂岩方解石脉中的2个包裹体样品的成分色—质结果分析显示,乡3井砂岩中的包裹体原油与中、上奥陶统源岩的生物标志相同,而砂岩方解石脉包裹体的生标既不同于寒武系来源原油,又不同于中、上奥陶统来源的原油,显示一种混合油的特征(图3)。砂岩方解石脉包裹体的生标显示混合油特征的主要原因是在目前的技术条件下还无法把单期形成的包裹体分离出来进行分析,包裹体中生物标志物的特征是来源于不同源岩、被捕获于不同期次包裹体中原油的混合特征。根据包裹体的均一温度,棕黄色包裹体的均一温度比较低(65~90℃),应该是来源于寒武系源岩的油被捕获形成。

2.2 鄂尔多斯盆地古生界天然气源对比

鄂尔多斯盆地古生界发育上古生界和下古生界2套含气系统。关于上古生界天然气来源一致的观点是天然气的源岩为石炭—二叠系的煤系;而下古生界天然气的来源存在来源于上古生界煤系和来源于下古生界海相源岩的争论^[8-15]。持煤成气观点的学者一般采用的气体地球化学参数是甲烷碳同位素值,而持油型气观点的学者采用的气体地球化学参数主要是乙烷碳同位素。持煤成气观点的学者认

为,靖边气田主要是上古生界源岩生成的天然气倒灌或侧向运移在奥陶系风化壳聚集成藏,其主要证据有:1)下古生界有机碳含量都比较低(一般 $TOC < 0.5\%$),不可能大规模成藏;2)奥陶系风化壳天然气甲烷碳同位素的平均值为 $\delta^{13}C_1 = -33.81\%$,具有煤成气的特征。持气源为下古生界观点的学者认为靖边气田的气体来源于下古生界海相源岩,其主要证据有:1)下古生界源岩成熟度高,可以生成 $\delta^{13}C_1 = -33.81\%$ 的天然气;2)虽然下古生界天然气乙烷碳同位素变化比较大,但大部分天然气乙烷等碳同位素显著偏轻,乙烷碳同位素的平均值 $\delta^{13}C_2 = -30.04\%$,表现出油型气特征。

产生上述争议的原因从表面上看是不同学者在进行天然气判断时选择的天然气地球化学参数不同造成的,其实质是对下古生界源岩生成的天然气缺乏一个明确的认识。到底下古生界源岩生成的天然气具有什么样的地球化学特征,目前下古生界气藏中的天然气有可能发生了后生变化,气藏中天然气目前的地球化学特征是否能反映成藏初期天然气的原始特征?由于目前鄂尔多斯盆地下古生界已经达到了高过成熟阶段,不可能采集到低成熟的样品来模拟下古生界源岩生成天然气的地球化学特征。我们通过对下古生界盐下碳酸盐岩方解石脉中包裹体中气体地球化学分析,来确定下古生界天然气的来源。

本次分析的包裹体样品为采自盆地中东部的龙探1井和榆9井的方解石脉,具体层位为盐下马五7段。由于岩盐具有很强的封闭能力,这样包裹体中天然气来源于奥陶系源岩。例如,龙探1井的含气层段深度为2 832~2 837 m,该含气层段距风化

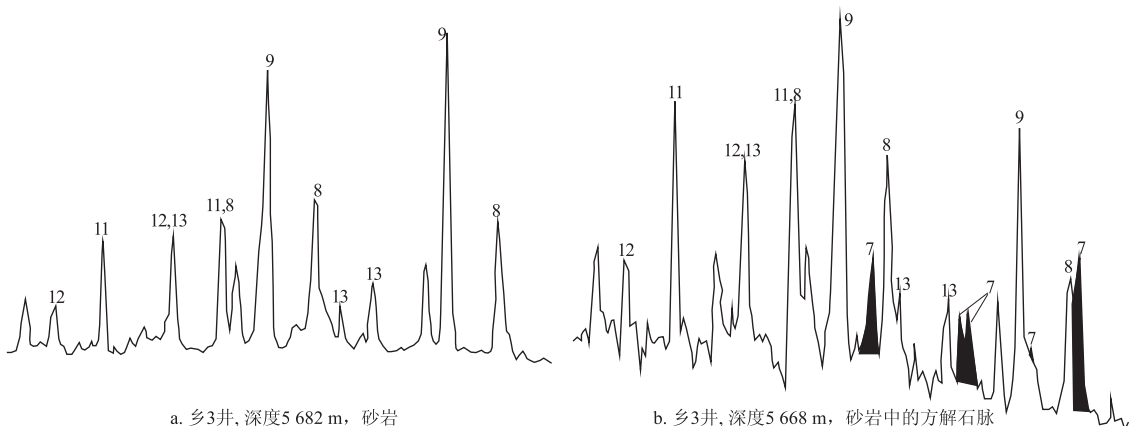


图3 塔里木盆地乡3井不同产状液态烃包裹体生物标志物特征

7. 4-, 23-, 24-三甲基三芳甾烷(C_{29} 三芳基藜甾烷); 8. 4-甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{29}); 9. 3-甲基-24-乙基三芳甾烷(C_{29}); 11. 4-甲基三芳甾烷(C_{27}); 12. 3-甲基三芳甾烷(C_{27}); 13. 3-甲基-24-甲基三芳甾烷(C_{29})

Fig. 3 Biomarker characteristics of liquid inclusions with different occurrence in well X3, Tarim Basin

表1 鄂尔多斯盆地奥陶系方解石脉包裹体中气体与龙探1井天然气地球化学性质对比

Table 1 Geochemical comparison between gas from Ordovician calcite vein inclusion and gas from well Longtan1, Ordos Basin

井名	深度/m	气体组成/%							碳同位素/‰	
		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	CH ₄	C ₂ H ₆
榆9	2 311.5*	99.14	0.80	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	-38.74	-28.01
龙探1	2 990.3*	74.51	11.59	8.74	1.83	3.15	0.67	2.66	-39.45	-35.46
龙探1	2 832~2 837	96.87	1.80	0.45	0.09	0.04	0.01	0.01	-39.26	-23.78

注：“*”为包裹体中气体地球化学数据。

壳顶部约有250 m,且在含气层段之上直接封盖着厚达120 m的岩盐(膏盐)层(马五6),岩盐具有很强的封闭能力,上古生界的天然气不可能穿过250 m以上的地层(特别是120 m厚的盐层)倒灌于下古生界马五7白云岩中。

表1是奥陶系方解石脉中包裹体中天然气的地球化学特征与龙探1井天然气地球化学特征的对比。从表中可以看出,2个样品包裹体的地球化学特征相差非常大。榆9井包裹体中天然气的干燥系数为0.9914,显示出高过成熟气的特征;龙探1井包裹体天然气的干燥系数为0.7451,显示出低熟气的特征。2个方解石脉中包裹体地球化学相差巨大的原因是因为方解石脉并不是取自气藏储层,而是在气藏以下,其中所捕获的气体只是与方解石脉形成匹配时期从源岩中生成的气体,方解石脉是天然气的运移通道,方解石脉形成的时期不同,其捕获的天然气的地球化学性质会有比较大的差别。由于气藏中的气体是源岩不同阶段生成气体的混合气体,而气藏以下方解石脉包裹体中捕获的气体只是与方解石脉形成匹配时期源岩生成的气体。所以,气藏中气体与包裹体中气体地球化学性质有比较大的差别。

从天然气的碳同位素组成来看,不管包裹体中的天然气还是气藏中的天然气,不管天然气的组成如何,包裹体甲烷碳同位素相差不大,而乙烷碳同位素相差比较大。因此,甲烷碳同位素更适宜作为判断下古生界天然气来源的指标。根据戴金星利用乙烷碳同位素对天然气成因的分类,当 $\delta^{13}\text{C}_2 > -25\text{‰}$ 时,天然气为煤成气;而当 $\delta^{13}\text{C}_2 < -28\text{‰}$ 时,天然气为油型气^[15]。按照乙烷碳同位素标准,龙探1井的天然气应该为煤成气。龙探1井马五7天然气甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1 = -39.26\text{‰}$,几乎是盆地古生界天然气中甲烷碳同位素最轻的。根据前人对鄂尔多斯盆地上古生界源岩模拟生成甲烷碳同位素与目前在上古生界发现的天然气甲烷的分析结果来看,上古生界高过成熟源岩不可能产生碳同位素如此之轻的甲烷^[16-17]。所以,龙探1井马五7

段的天然气应该是来源于下古生界的油型气。

榆9井中包裹体中天然气与龙探1井天然气组成相近,天然气碳同位素也应该相近,但它们乙烷碳同位素却有比较大的差别。相比较,龙探1井天然气干燥系数低于榆9井包裹体中气体的干燥系数,其乙烷碳同位素应当更轻(小于 -28‰),但实际情况是龙探1井天然气 $\delta^{13}\text{C}_2 = -23.78\text{‰}$,说明乙烷碳同位素已经发生了某种变化,不能反映气体的成因特征。杨华推测是硫酸盐岩热还原作用(TSR)造成了乙烷碳同位素偏重^[18]。Cai等人曾利用硫酸盐岩热还原作用来解释下古生界气藏中天然气干燥系数非常高的现象^[19];乙烷碳同位素变重的原因虽然还有待于进一步深入研究,但至少可以说明用乙烷碳同位素作为判断鄂尔多斯盆地下古生界天然气来源的指标是不合适的。

从包裹体中气体地球化学特征的分析结果看,鄂尔多斯盆地下古生界来源天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1 < -38\text{‰}$,下古生界 $\delta^{13}\text{C}_1 < -38\text{‰}$ 的天然气甲烷碳同位素的平均值为 -38.90‰ ,而靖边气田天然气中甲烷碳同位素的平均值为 -33.83‰ 。显然,靖边气田的天然气不应该主要来源于下古生界源岩。我们前期研究结果表明:上古生界天然气储层包裹体的气体与气藏中天然气的地球化学特征一致^[1],说明天然气基本没有遭受后生作用的影响。因此,本次研究我们以目前上古生界天然气甲烷碳同位素的平均值(-32.90‰)作为该盆地煤成气甲烷碳同位素的端元值,以下古生界 $\delta^{13}\text{C}_1 < -38\text{‰}$ 的天然气甲烷碳同位素的平均值(-38.90‰)作为下古生界来源天然气甲烷碳同位素的标准值,对靖边气田天然气的来源进行如下简单计算:

$$-32.90\text{‰} \times X - 38.90\text{‰} (1 - X) = -33.83\text{‰}$$

式中,X为上古生界煤成气所占的比例。

通过计算, $X = 84.5\%$ 。所以,靖边气田天然气中有84.5%的天然气来源于上古生界的煤成气。

3 结论

包裹体的热力学特征是油气成藏研究最常应

用的参数,包裹体中流体地球化学特征在油气源研究方面具有非常重要的意义。虽然,群体包裹体地球化学特征不如单个包裹体地球化学特征反映油气源信息准确,但群体包裹体地球化学研究是目前技术条件下利用包裹体地球化学信息探讨油气源最可靠的手段。

参考文献:

[1] 张水昌,梁狄刚,黎茂稳,等. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. 科学通报,2002,47(S1):16-23.

[2] 米敬奎,张水昌,涂建琪,等. 哈得逊油田成藏研究[J]. 地球化学,2006,35(4):405-412.

[3] 饶丹,秦建中,张志荣,等. 单体烃包裹体成分分析[J]. 石油实验地质,2010,32(1):67-70.

[4] 米敬奎,戴金星,张水昌,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏储层包裹体中气体成分及同位素研究[J]. 中国科学 D 辑,2007,37(增刊 II):97-103.

[5] Ruble T E, George S C, Lisk M, et al. Organic compounds trapped in aqueous fluid inclusions[J]. *Org Geochem*, 1998, 29 (1-3):195-205.

[6] George S C, Eadington P J, Lisk M, et al. Geochemical comparison of oil trapped in fluid inclusions and reservoir oil in Blackback oilfield, Gippsland Basin, Australia[J]. *Petrol Explor Soc Austral J*, 1998,26:64-81.

[7] 施伟军,蒋宏,席斌斌,等. 油气包裹体成分及特征分析方法研究[J]. 石油实验地质,2009,31(6):643-648.

[8] 戴金星,李剑,丁巍伟,等. 中国储量千亿元以上气田天然气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):

16-23.

[9] 关德师,张文正,裴戈. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系产层的油气源[J]. 石油与天然气地质,1993,14(3):191-199.

[10] 张士亚. 鄂尔多斯盆地天然气气源及勘探方向[J]. 天然气工业,1994,14(3):1-4.

[11] 夏新宇,赵林,戴金星,等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳气藏天然气来源及混源比计算[J]. 沉积学报,1998,16(3):75-79.

[12] 陈安定. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系天然气的成因及运移[J]. 石油学报,1994,15(2):1-10.

[13] 黄第藩,熊传武,杨俊杰,等. 鄂尔多斯盆地中部气田气源判识和天然气成因类型[J]. 天然气工业,1996,16(6):1-6.

[14] 陈安定. 论鄂尔多斯盆地中部气田混合气的实质[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):33-38.

[15] 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.

[16] 付少英,彭平安,张文正,等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤的生烃动力学研究[J]. 中国科学(D),2002,32(10):812-818.

[17] 米敬奎,刘新华,杨孟达,等. 利用生烃动力学和碳同位素生烃动力学探索油气田气体来源[J]. 沉积学报,2005,23(3):537-541.

[18] 杨华,张文正,管川莉,等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系盐下天然气地球化学特征及其对靖边气田气源再认识[J]. 天然气地球科学,2009,20(1):8-13.

[19] Cai Chunfang, Hu Guoyi, He Hong, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas and thermochemical sulphate reduction in Ordovician carbonates in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,2005,48(3-4):209-226.

(编辑 黄 娟)

(上接第 187 页)

[13] 朱扬明,苏爱国,梁狄刚,等. 柴达木盆地咸湖相生油岩正构烷烃分布特征及其成因[J]. 地球化学,2003,32(2):117-123.

[14] Zhu Yangming, Weng Huanxin, Su Aiguo, et al. Geochemical characteristics of Tertiary saline lacustrine oils in the Western Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Applied Geochemistry*, 2005,20(10):1875-1889.

[15] 包建平,朱翠山,汪立群. 柴达木盆地西部原油地球化学特征对比[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):353-359.

[16] 段毅,张辉,吴保祥,等. 柴达木盆地原油单体正构烷烃碳同位素研究[J]. 矿物岩石,2003,23(4):91-94.

[17] 朱扬明,苏爱国,梁狄刚,等. 柴达木盆地原油地球化学特征及其源岩时代判识[J]. 地质学报,2003,77(2):272-279.

[18] Hanson A D, Ritts B D, Zinniker D, et al. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China [J]. *AAPG*

Bulletin,2001,85(4):601-619.

[19] 段毅,王智平,张辉,等. 柴达木盆地原油烃类地球化学特征[J]. 石油实验地质,2004,26(4):359-364.

[20] 刘金萍,耿安松,熊永强,等. 正构烷烃单体碳、氢同位素在油源对比中的应用[J]. 新疆石油地质,2007,28(1):104-107.

[21] 段毅,张辉,郑朝阳,等. 柴达木盆地原油成因研究[J]. 沉积学报,2004,22(增刊):61-65.

[22] 刘洛夫,妥进才,陈践发. 烃源岩的研究现状[J]. 勘探家,1997,2(3):62-64.

[23] 彭得华. 柴达木盆地西部第三系咸化湖泊烃源岩地质地球化学特征与生烃机理[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2004.

[24] 金强,查明,赵磊. 柴达木盆地西部第三系盐湖相有效生油岩的识别[J]. 沉积学报,2001,19(1):125-129.

[25] 金强,查明. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究[J]. 地质科学,2000,35(4):465-473.

(编辑 韩 或)