

文章编号: 1000-0550(2008) 06-1071-06

# 哈得逊与轮南地区原油碳同位素特征及影响因素<sup>1</sup>

米敬奎<sup>1</sup> 张水昌<sup>1</sup> 陈建平<sup>1</sup> 张 斌<sup>1</sup> 李贤庆<sup>2</sup>

(1 中国石油勘探开发研究院实验研究中心 北京 100083; 2 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室 北京 100083)

**摘 要** 轮南地区与哈得逊地区 20 个原油的全油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素的分析结果表明: 轮南地区原油的全油碳同位素均大于  $-32\text{‰}$ , 而哈得逊地区原油的全油碳同位素一般小于  $-32\text{‰}$ ; 原油正构烷烃单体烃碳同位素也表现出轮南地区重于哈得逊地区的特征。两地区原油碳同位素的这种特征是由于两地区油气成藏过程的差异造成的, 轮南地区原油碳同位素比哈得逊地区的原油碳同位素重的主要原因是由于来源于寒武系降解原油的混入, 而非油源不同造成的。

**关键词** 塔里木盆地 轮南油田 哈得逊油田 原油碳同位素 单体烃碳同位素

**第一作者简介** 米敬奎 男 1966 年出生 教授 地球化学、有机岩石学 E-mail jkm@petrochina.com.cn

**中图分类号** P593 TE122.1<sup>+</sup>13 **文献标识码** A

原油的碳同位素受多种因素的影响。原油碳同位素首先取决于其源岩的类型, 不同有机质类型的源岩生成原油的碳同位素不同; 同一源岩在不同演化阶段形成的原油, 其碳同位素特征也有所差异; 另外, 原油在各种后生作用(如降解、水洗等)过程中也会发生分馏作用。所以, 原油碳同位素在油源、油气成藏过程以及油藏后生变化等的研究中具有非常重要的意义。

本文以塔里木盆地两个主要含油区—轮南与哈得逊地区的原油为主要研究对象, 通过对这两个区域 20 个原油全油碳同位素以及正构烷烃单体碳同位素的分析, 来探讨这两个区域的原油碳同位素特征。在此基础上, 根据源岩碳同位素的分析结果, 结合油源、区域构造演化以及成藏过程的研究, 剖析影响这两个区域原油碳同位素差异的主要因素。

## 1 地质概况

轮南地区位于塔里木盆地塔北隆起中东部的低隆部位, 东临草湖凹陷, 西接哈拉哈塘凹陷, 北与轮台断隆相接, 南以斜坡向满加尔凹陷倾没(图 1)。该地区发现的有轮南、塔河、桑塔木、解放渠东等多个油气田。主要的含油气层位有奥陶系、石炭系、三叠系; 哈得逊油田在构造位置上位于满加尔凹陷西部与塔北隆起之间的过渡地带, 北部与轮南凸起连接, 西北部紧邻哈拉哈塘凹陷, 南部为满加尔凹陷。它是目前满

加尔凹陷发现的唯一一个油田。主要的产油层为石炭系东河砂岩。目前在哈得逊地区志留系和奥陶系柯坪塔格组下段砂岩中以及奥陶系一间房组发现了不少油气显示和工业油流。

从原油性质上来讲, 轮南和哈得逊地区原油性质差别非常大。轮南地区原油性质非常复杂, 正常油、

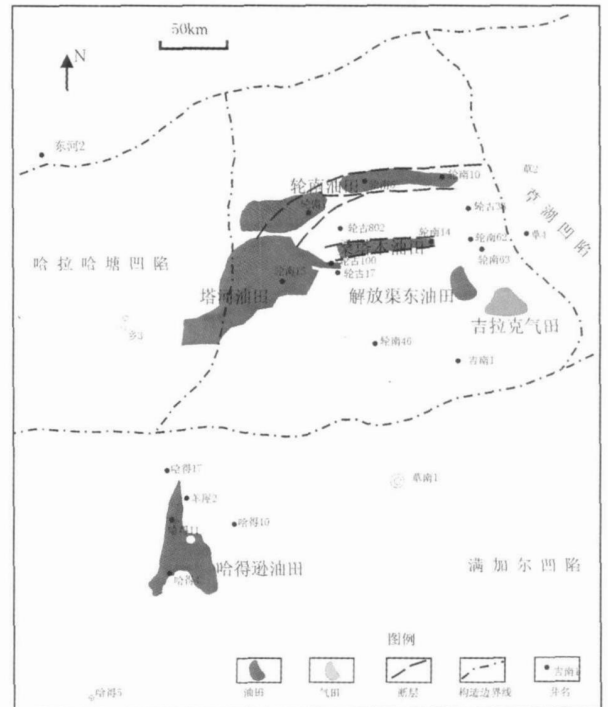


图 1 研究区域位置

Fig 1 Location of the study area

<sup>1</sup> 国家 973 基金项目课题(编号: 2006CB202307)与国家自然科学基金项目(批准号: 40572085)资助。  
收稿日期: 2007-11-28 收修改稿日期: 2008-03-31

表 1 原油性质及全油碳同位素  
Table 1 The oil characters and carbon isotopic composition

区域	井号	深度 /m	层位	原油性质	原油比重	全油碳同位素 ‰
哈得逊地区	羊屋 2	5460~ 5463	O <sub>3k</sub>	原油	0.864	- 31.8
	羊屋 2	6453~ 6499.5	O <sub>2y</sub>	原油	0.857	- 32.8
	哈得 10	5056~ 5061.33	C <sub>③</sub>	原油	0.864	- 32.6
	哈得 11	5125~ 5128.5	C <sub>④</sub>	原油	0.928	- 32.6
	哈得 17	5226.1	C <sub>⑤</sub>	原油	0.930	- 32.3
	乡 3	5658~ 5668	C	原油	0.87	- 32.7
	乡 3	5955.7~ 5968	O	原油	0.86	- 32.6
	乡 3	6117~ 6127	O	原油	0.845	- 32.4
轮南地区	轮南 63	5957~ 6071	O	轻质油	0.815	- 31.4
	轮南 62	5565~ 5578	C	原油	0.881	- 31.1
	轮古 38	5619.38~ 5740	O	凝析油	0.763	- 31.5
	轮古 100	5431.17~ 5525	O	原油	0.842	- 31.9
	轮古 802	5207.1~ 5250	O	原油		- 31.8
	轮古 17	5245.4~ 5267.6	C	轻质油	0.807	- 31.1
	轮南 46	6119~ 6144	O	原油	0.856	- 31.2
	吉南 1	5477~ 5490	O	凝析油	0.761	- 31.3
	轮南 14	4609~ 4624.3	T	原油	0.858	- 31.7
	轮南 14	5045~ 5054	C	原油	0.857	- 31.1
	轮南 14	5256~ 5266	C	原油	0.855	- 31.4
	轮南 14	5274~ 5363	O	原油	0.844	- 31.3

稠油、轻质油、高蜡油等各种性质的原油在轮南地区基本上都有发现;而哈得逊地区的原油性质的比较简单,为稍重的正常黑油,原油比重 0.87~ 0.93 g/m<sup>3</sup>。

## 2 原油碳同位素特征

本次研究对轮南和哈得逊地区的 20 个原油样品进行了全油碳同位素和正构烷烃单体碳同位素分析。碳同位素的分析方法如下:

(1) 全油碳同位素分析采用检测仪器为 Finnigan-MAT252 型质谱仪。利用 CCl<sub>4</sub> 溶解样品,在 800℃ 条件下进行燃烧,在 250℃ 条件下还原后,用 - 289℃ 液氮冷阱进行提纯、净化、收集,并检测,误差范围为 ±0.1%。

(2) 正构烷烃单体碳同位素分析采用德国 Thermo Finnigan 质谱公司生产的气相色谱-单体碳同位素质谱联用仪 (delta Plus XP)。首先进行族组分分离,然后采用尿素络合分离出正构烷烃。正构烷烃单体碳同位素分析在石英毛细管色谱柱 (50 m × 0.32 mm × 0.25 μm),升温程序:80℃ 恒温 5 min,以 3℃/min 程序升温至 300℃,恒温 30 min,载气高纯 He。

表 1 是本次分析原油样品的基本特征和全油碳同位素的分析结果。分析结果表明:哈得逊地区的原油碳同位素偏轻,除羊屋 2 井柯坪塔格组的原油外,

其它原油碳同位素都小于 - 32‰;而轮南地区的原油不论其性质如何,其碳同位素都大于 - 32‰。

本次研究中对上述原油正构烷烃单体碳同位素也进行了分析,图 2 是轮南与哈得逊地区代表原油中正构烷烃单体碳同位素的分布图。从图中可以看出:轮南地区与哈得逊地区原油正构烷烃单体碳同位素明显地被分开,轮南地区原油中正构烷烃单体碳同位素普遍重于哈得逊地区的原油。这一结果与全油碳同位素的分析结果一致。

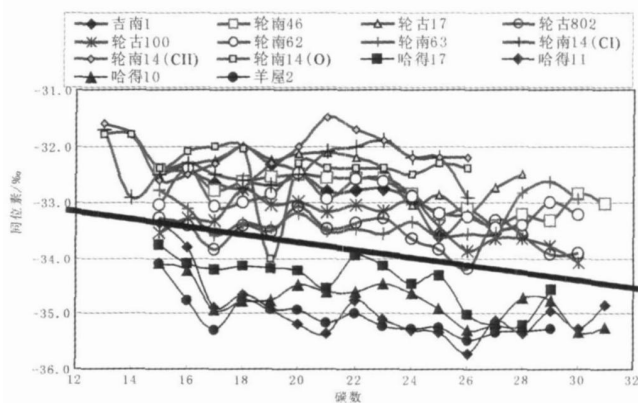


图 2 原油中正构烷烃单体碳同位素特征

Fig 2 The carbon isotope of the monomer paraffin hydrocarbons from oil

不同性质的原油是源岩不同演化阶段的产物, 上述分析结果表明: 轮南地区不同性质(比重)的原油其碳同位素相差不大。这说明原油性质不是影响这两个地区原油碳同位素产生差异的主要原因。

### 3 影响原油碳同位素因素探讨

#### 3.1 源岩的碳同位素特征

原油碳同位素首先取决于其源岩特征。塔里木盆地台盆区有两套海相源岩—中、上奥陶统与寒武系源岩<sup>[1,2]</sup>, 王飞宇对塔里木盆地两套海相源岩有机质类型的研究表明: 寒武系源岩为欠补偿盆地相沉积, 母质类型好; 中、上奥陶统源岩台缘斜坡的灰泥丘相, 其中含有最早的陆生植物, 母质类型相对较差<sup>[1]</sup>。一般情况下, 母质类型好, 其本身以及形成烃类的碳同位素轻<sup>[3]</sup>。本次研究在中、上奥陶统与寒武系源岩中选取了成熟度相近的两个样品, 对其干酪根的碳同位素进行了分析, 分析结果见表 2。源岩干酪根碳同位素的分析结果与王飞宇干酪根类型的分析结果一致。即, 由于寒武系源岩的有机质类型相对好于中、上奥陶统源岩, 所以, 寒武系源岩干酪根的碳同位素比中、上奥陶统源岩干酪根的碳同位素轻。

前人对轮南与哈得逊的油源的研究结果表明: 哈得逊地区的原油目前保留下来的原油来源于中、上奥陶统源岩; 轮南地区保存下来的也主要是来源于中、上奥陶统的原油, 但在轮南地区存在不少来源于寒武

系原油和寒武系与中、上奥陶统的混源油<sup>[4-7]</sup>。

根据塔里木盆地两套源岩的碳同位素特征与两地区油源的研究结果, 轮南原油的碳同位素应该比哈得逊原油的碳同位素轻, 但原油碳同位素实际的分析结果却正好相反, 即轮南原油的碳同位素比哈得逊原油的碳同位素重。这说明源岩碳同位素不是影响原油碳同位素的主要因素。

#### 3.2 原油地球化学性质的差异

寒武系原油或寒武系与中、上奥陶统混源油一个最明显的特征是其中可以检测到比较明显的三芳甲藻甾烷, 而来源于中、上奥陶统一般检测不到三芳甲藻甾烷(图 3)<sup>[6]</sup>。虽然哈得逊地区的原油目前保留下来的原油来源于中、上奥陶统的原油, 但哈得逊地区“干储层”(指不含油区域)抽提物中有比较丰富的三芳甲藻甾烷(图 4)。这表明来源于寒武系原油与来源于中、上奥陶统的原油都曾经到过这两个地区。

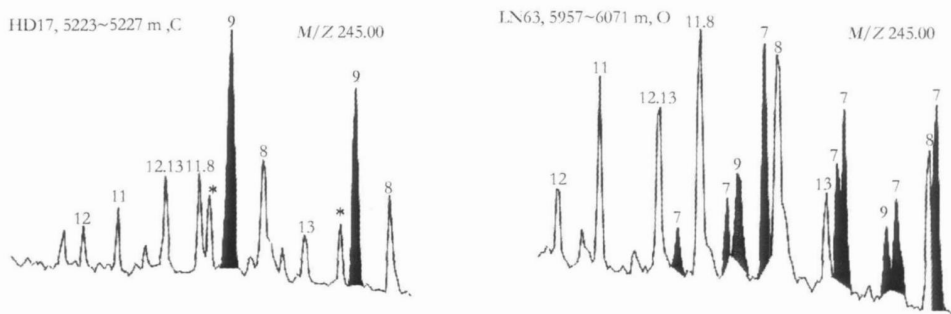
张水昌曾利用典型的寒武系原油和典型的中、上奥陶统原油进行过配比实验, 结果证明: 只要中、上奥陶统原油中混入 25% 的寒武系原油, 混合油就显示非常明显寒武系原油的地球化学性质<sup>[6]</sup>。

只不过来源于寒武系原油在哈得逊地区只是路过, 没有聚集成藏, 而在轮南地区聚集成藏; 在哈得逊地区, 来源于中、上奥陶统的晚期原油完全覆盖了来源于寒武系的过路油。而在干储层中, 由于两期原油都是路过, 干储层抽提物中寒武系源岩的地球化学信

表 2 塔里木盆地代表海相源岩的碳同位素

Table 2 The carbon isotope of typical marine source rocks in Tarim Basin

井号	层位	深度 /m	岩性	有机碳 /%	反射率 /%	碳同位素 /‰
英东 2	寒武系	4358.4	棕黑色泥岩	3.25	1.23	-30.27
塔参 1	上奥陶统	4006.0	灰黑色泥晶灰岩	0.8	1.25	-29.19



7:4,23,24-三甲基三芳甾烷( $C_{29}$ 三芳甲藻甾烷); 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( $C_{29}$ )

图 3 轮南、哈得逊地区代表原油中甲基三芳甾烷特征

Fig 3 The methyl triaromatic steroid character of typical oil from Lunnan and Hadexun area

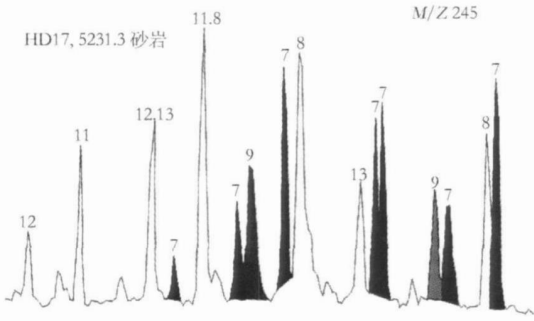


图 4 哈得 17 井储层抽提物中甲基三芳甾烷  
Fig. 4 The methyl triaromatic steroid in extracts of reservoir stone from Well HD17

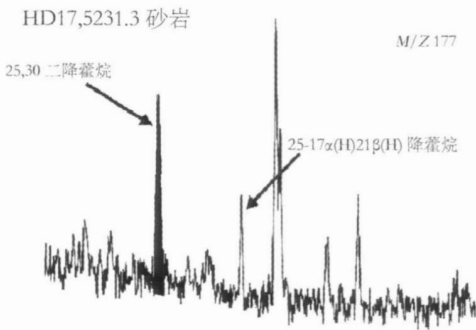


图 5 哈得 17 井储层抽提物中的降解生物标志物  
Fig. 5 The degradation biomarkers in extracts of reservoir stone from Well HD17

息就非常明显。这一点从哈得逊地区干储层抽提物及原油中生物标志物的不同得到证明(图 5 图 6-a)。即,哈得逊地区原油中一般检测不到三芳甲藻甾烷和降解生物标志物,而储层抽提物中却有非常明显的三芳甲藻甾烷和降解生物标志物。

来源于寒武系的原油的另一个特点就是遭受了降解破坏,原油的降解作用会使原油的碳同位素变重。塔东 2 井产于寒武系的原油是一个典型的来源于寒武系源岩的降解油,其比重达 1.022 g/m<sup>3</sup> 其碳同位素就非常重, δ<sup>13</sup>C = -28 ‰。这说明寒武系降解油的加入,肯定会使来源于中、上奥陶统的原油碳

同位素变重。轮南地区的许多原油中都能检测到反映原油遭受降解的生物标志物—25降藿烷(图 6)。而哈得逊地区除个别原油外,大多数原油中都检测不到原油遭受降解的生物标志物—25降藿烷,且哈得逊地区的个别原油中 25降藿烷的相对含量要比轮南地区原油低。因此,寒武系的降解原油的混入应是轮南地区原油碳同位素变重最主要的因素。

在原油各种族组分中,正构烷烃最易遭受降解,但是高碳数正构烷烃相对于低碳数正构烷烃难被降解<sup>[6]</sup>。由于早期寒武系原油中低碳数正构烷烃基本被降解,所以,不论是哈得逊地区的中、上奥陶统原油,还是轮南地区的混合油,其中的低碳数正构烷烃基本上都是来源于中、上奥陶统源岩,所以,在原油正构烷烃的组成与分布图中(图 2),两地区原油低碳数正构烷烃单体碳同位素相差不大;对于高碳数正构烷烃来说,哈得逊地区是单源的,而轮南地区是混源的,因此,高碳数正构烷烃单体碳同位素相差就比较大。

### 3.3 成藏过程的差异

本人曾对轮南与哈得逊地区石炭系油藏的成藏过程进行过研究<sup>[7,8]</sup>,两地区油气的成藏过程存在一定的差异。

哈得逊地区发生过两次油气充注,早期原油充注发生在二叠纪,此时哈得逊地区为一构造斜坡,在油田范围内,早期原油更多地只是路过,仅在个别区域保留了少量早期原油。晚海西期,由于构造抬升,残留在储层中的过路油发生了降解;受喜马拉雅期构造运动的影响,哈得逊地区的构造格局发生了变化,区域构造发生了反转,地层由南倾转为北倾,并在哈得逊地区形成了“鼻隆”构造<sup>[9]</sup>。同时由于新生界 2 000 ~ 3 000 m 的巨厚沉积也使的中、上奥陶统源岩开始大量生油。来源于中、上奥陶统的原油在哈得逊构造“鼻隆”中聚集形成了哈得逊油田。油气在运移的过程中,残留在运移通道上的主要为沥青质和非烃等大分子物质。这些大分子物质被来源于哈拉哈塘

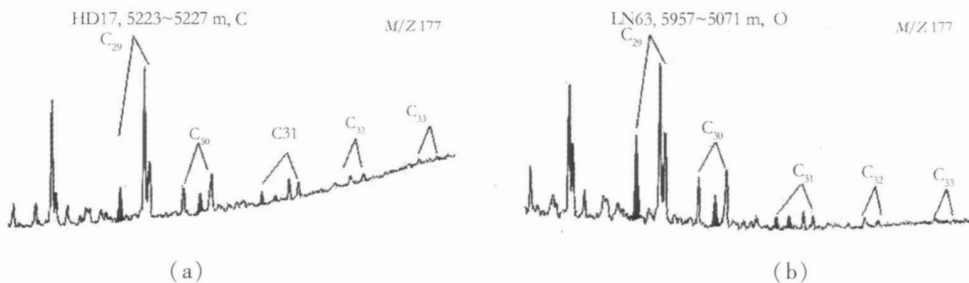


图 6 轮南、哈得逊地区代表原油降解的生物标志物

Fig 6 The biomarks of typical degraded oil from Lunnan and Hadexun area

凹陷中、上奥陶统的溶解,使得哈得逊的原油变得比正常油稍重一些。

相比较而言,轮南地区的油气成藏过程更为复杂。轮南地区奥陶系侵蚀面是一个向东、南、西、北四个方向倾没的大型古潜山隆起,同时奥陶系内幕也是一个大背斜。受加里东—海西期构造运动影响,轮南地区奥陶系之上普遍缺失志留系。隆起的轴部(轮南断垒带)常缺失石炭—二叠系,三叠系直接覆盖在奥陶系之上;该区古生界总体呈南倾面貌,三叠系以上则呈北倾的斜坡。加里东末期由于奥陶系的巨厚沉积,寒武系源岩在晚奥陶世开始生油,此时生成的原油轮南古潜山聚集成藏。受加里东—海西期构造地抬升影响,聚集在轮南断垒带(背斜轴部)的寒武系原油完全被破坏;而聚集在轮南地区的南部(包括桑塔木断垒带、解放渠东、吉拉克地区)的原油由于该区域构造位置相对较低,在这里的油气虽然遭受到一定程度的降解与破坏,但并没有被完全破坏,还残余有一定量的寒武系原油。环满加尔凹陷广泛分布的志留系沥青砂就是寒武系原油遭受降解破坏形成的。随着新生界 2 000 m 左右的巨厚沉积,中、上奥陶统源岩开始生油。来源于中、上奥陶统原油向上迁移的过程中,与残留的来源于寒武系的降解原油混合,在轮南地区南部形成许多混合油。虽然,轮南地区中、上奥陶统来源于何处目前还不是十分清楚,但根据盆地热演化史的研究可以肯定轮南地区的天然气应该来源于该区域的东南部的满加尔凹陷,这一点从轮南地区“南气北油、东气西油”油气的总体分布规律可以得到证明。当中、上奥陶统源岩的原油在轮南地区成藏以后,已经达到过成熟阶段的寒武系源岩生成的天然气从满加尔凹陷向北运移,聚集在轮南地区的中、上奥陶统原油或混合原油经过后期的“气洗”作用,其比重变轻。所以,轮南地区的原油中虽然寒武系的原油相对含量比较高,但经过“气洗”作用,其比重反而比哈得逊地区的原油比重轻。

综上所述,虽然轮南与哈得逊地区目前保存下来的主要是来源于中、上奥陶统的原油,但两地区油气成藏过程有比较大的差别。来源于寒武系的原油在哈得逊地区只是路过,没有大规模成藏,哈得逊地区聚集的主要是中、上奥陶统的原油;而在轮南地区,来源于寒武系与中、上奥陶统的原油都聚集成藏了,虽然来源于寒武系的原油在加里东期—海西期遭受了降解破坏,但并没有被完全破坏,残余的寒武系的原油与中、上奥陶统的原油相互混合,在轮南地区形成

许多混合油。而哈得逊地区几乎是单纯的来源于中、上奥陶统的原油;由于两地区来源于寒武系与中、上奥陶统的原油混合程度不同,造成轮南与哈得逊原油碳同位素的差异。

## 4 结论

通过以上研究可以得到如下几点结论:

(1) 轮南地区原油的全油碳同位素和正构烷烃单体烃碳同位素均重于哈得逊地区的原油。两地区原油碳同位素的这种特征是由于两地区油气成藏过程的差异造成的。

(2) 影响轮南地区原油碳同位素比哈得逊地区的原油碳同位素重的主要是由于来源于寒武系的降解原油的混入,而非油源不同造成的。

## 参考文献 (References)

- 王飞宇, 张宝民, 边立增, 等. 塔里木盆地古生界有效生油岩分布和生烃潜力评价 [R]. “九五”国家重点科技攻关项目报告, 1999: 4 [Wang Feiyu, Zhang Baomin, Bian Lizeng, *et al.* Evaluation on the Source Rock and Their Hydrocarbon Generation Ability [R]. Research Report 1994-4]
- 赵靖舟. 塔里木盆地北部寒武—奥陶系海相烃源岩重新认识 [J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 117-124 [Zhao Jingzhou. Evaluation on the Cambrian-Ordovician marine source rocks from the North Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19(1): 117-124]
- 傅家谟, 秦匡宗. 干酪根地球化学 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1995 [Fu Jiamu, Qin Kuangzong. Kerogen Geochemistry [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press 1995]
- 王铁冠, 王春江, 何发岐, 等. 塔河油田奥陶系油藏二期成藏原油充注比率测算方法 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 74-79 [Wang Tieguan, Wang Chunjiang, He Faqi *et al.* Determination of double filling ratio of mixed crude oils in the Ordovician reservoir Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Experiment* 2004, 26(1): 74-79]
- 杨杰, 黄海平, 张水昌, 等. 塔里木盆地北部隆起原油混合作用半定量评价 [J]. 地球化学, 2003, 32(2): 105-110 [Yang Jie, Huang Hai ping, Zhang Shuichang *et al.* Semi-quantitative evaluation of mixed oil in the northern uplift of the Tarim basin [J]. *Geochimica* 2003, 32(2): 105-111]
- 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, 2005 [Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baomin *et al.* The Formation of Marine Oil and Gas in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press 2005]
- 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 [Mi Jingkui, Zhang Shuichang, Tu Jianqi *et al.* Study on the formation of the Hadexun oilfield in Tarim Basin NW China [J]. *Geochimica* 2006, 35(4): 405-412]
- 米敬奎. 轮南—哈得逊油田成藏特征研究 [R]. 博士后研究报告,

北京, 2006 4[ Mi Jingku Study on the Formation Characters of Lunnan and Hadexun Oilfields[R]. Postdoctoral Research Report 2006 4]

9 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[ Jia Chengzao Structure and Oil & Gas in Tarim Basin China[M]. Beijing Petroleum Industry Press 1997]

## Carbon Isotope Characteristics and the Influencing Factors of the Oils from Lunnan and Hadexun Oil Fields

MI Jing-ku<sup>1</sup> ZHANG Shu-chang<sup>1</sup> CHEN Jian-ping<sup>1</sup> ZHANG Bin<sup>1</sup> LI Xian-qing<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development PetroChina, Beijing 100083;

2. Key Laboratory of Coal Resources Ministry of Education, China University of Mining and Technology Beijing 100083)

**Abstract** The analytical results of the whole and the monomer paraffin hydrocarbons carbon isotope of the 20 oils from Lunnan and Hadexun oil fields show that the whole carbon isotope of the oils from Lunnan area is more than  $-32\text{‰}$ , and that of the oils from Hadexun area is less than  $-32\text{‰}$ , the carbon isotope of monomer paraffin hydrocarbons of the oils from Lunnan area is also heavier than that of the oils from Hadexun area. That the carbon isotope of oils from Lunnan area heavier than that of oils from Hadexun area caused the difference between the oil pools formation in the two areas. The main factor resulted in the carbon isotope of oils from Lunnan area heavier than that of oils from Hadexun area is the mixture between the degraded oil from the Cambrian source rock and the oils from Middle-Upper Ordovician source rock, instead of the different source rocks of the oils.

**Key words** Tarim Basin, Lunnan Oilfield, Hadexun Oilfield, oil carbon isotope, carbon isotope of monomer paraffin hydrocarbons