

# 塔河油田奥陶系原油

## C<sub>26</sub> 降胆甾烷分布特征及地质意义

李美俊<sup>1</sup>, 王铁冠<sup>1</sup>, 张卫彪<sup>2</sup>

(1. 油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**塔河油田奥陶系原油中都检测出丰富的 C<sub>26</sub> 降胆甾烷系列。大多数原油 24-降胆甾烷含量相对 27-降胆甾烷低, 而九区 T904 和塔东地区 TD2 井原油 24-降胆甾烷含量相对较高。以 LN46、BD2 等井为代表的上奥陶统灰岩、泥灰岩具有类似于塔河油田奥陶系原油的 C<sub>26</sub> 降胆甾烷分布特征, 而以 TD2 井、和 4 井及柯坪露头为代表的寒武系黑色泥岩和灰色灰岩具有类似于 T904 和 TD2 井原油的 C<sub>26</sub> 降胆甾烷分布特征。该文提出判别寒武系烃源层油气来源的 C<sub>26</sub> 降胆甾烷地球化学判别标准为: NCR [24/(24+27)-降胆甾烷] > 0.50, NDR [24/(24+27)-降重排胆甾烷] > 0.35; 上奥陶统烃源层油气来源的 C<sub>26</sub> 降胆甾烷判别标准为: NCR < 0.40, NDR < 0.35。结果表明 C<sub>26</sub> 降胆甾烷不仅是塔河油田奥陶系油藏进行原油族群划分的特征分子标志物, 也为研究硅藻、沟鞭藻等藻类的起源和演化以及塔里木盆地古板块构造运动提供了有力的分子地球化学证据。

**关键词:** 降胆甾烷; 硅藻; 沟鞭藻; 寒武系; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Distribution of C<sub>26</sub> norcholestanes in Ordovician crude oils from Tahe Oilfield and its geological significance

Li Meijun<sup>1</sup>, Wang Tieguan<sup>1</sup>, Zhang Weibiao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A series of C<sub>26</sub> norcholestanes was detected in the Ordovician crude oils from the Tahe Oilfield, the Tarim Basin, northwest China. The abundance of 24-norcholestanes in most of the Ordovician crude oils was lower than that of 27-norcholestanes. The oils from well T904 in the eastern Tahe Oilfield and well TD2 in the eastern Tarim Basin, however, were characterized by relatively higher 24-norcholestane abundance. The distribution of C<sub>26</sub> norcholestane of the Upper Ordovician marls from the wells LN46 and BD2 resembled that of the most Ordovician crude oils from the Tahe Oilfield. The distribution of C<sub>26</sub> norcholestanes in typical Cambrian black shales and gray limestones from the wells TD2, He4 and outcrops from Keping profile resembled that of the crude oils from the wells T904 and TD2. Criteria are proposed relative to C<sub>26</sub> norcholestanes that could be used to classify oil families within the Ordovician reservoirs. Oils with NCR (defined as 24/(24+27)-norcholestanes) > 0.50 and NDR (defined as 24/(24+27)-nordiacholestanes) > 0.35 were thought to be derived from the Cambrian source rocks, and oils with NCR < 0.40 and NDR < 0.35 were thought to be derived from the Upper Ordovician source rocks. Therefore, C<sub>26</sub> norcholestanes were effective molecular markers to classify oil genetic families in the Tahe Oilfield. They could also provide molecular evidence for the origin and evolution of diatoms and dinoflagellates and the plate drift of the Tarim Basin.

**Key words:** norcholestane; diatom; dinoflagellate; Cambrian; Tarim Basin

### 1 C<sub>26</sub> 降胆甾烷的来源及地质意义

#### 1.1 C<sub>26</sub> 降胆甾烷的生物来源

C<sub>26</sub> 降胆甾烷是 C<sub>27</sub> 胆甾烷侧链少一个甲基的

非常规侧链甾烷, 石油和沉积有机质中常见 21-降、24-降和 27-降胆甾烷及异构体系列(图 1)。由于 C<sub>26</sub> 降胆甾烷具有比规则甾烷更专一的生源和沉积环境指向意义而受到广泛关注<sup>[1-6]</sup>。近些年来,

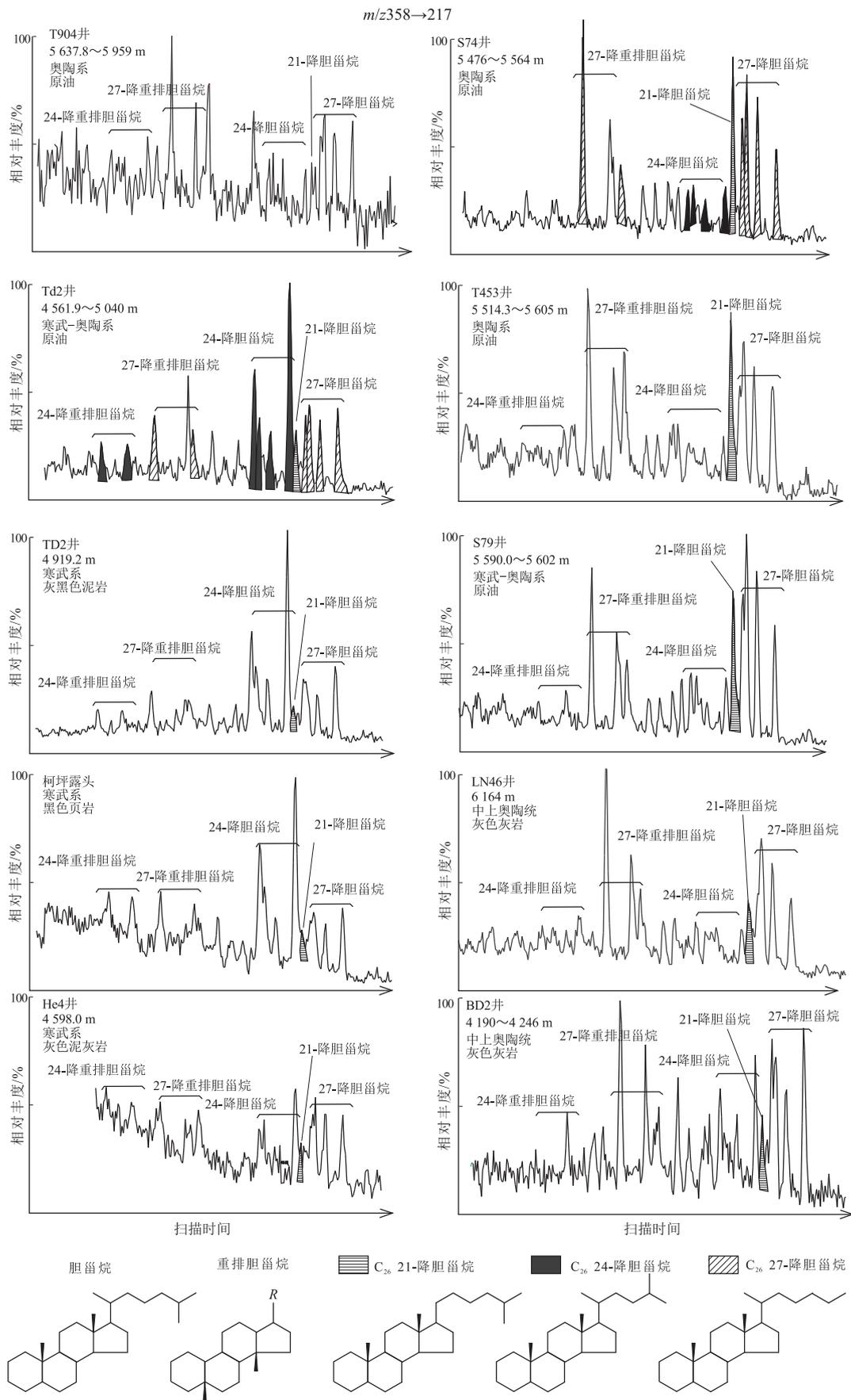


图 1 塔里木盆地塔河油田、TD2 井原油及寒武系和中上奥陶统烃源岩 C<sub>26</sub>降胆甾烷分布

Fig.1 Distribution of C<sub>26</sub> norcholestanes in oils from Tahe Oilfield, well TD2 and Cambrian and Middle-Upper Ordovician source rocks from Tarim Basin

从前寒武系到中统沉积有机质和原油<sup>[1-6]</sup>、古代硅藻沉积物<sup>[7]</sup>和现代硅藻沉积物或水华硅藻中都检测到该系列化合物<sup>[8-9]</sup>,并在硅藻中分离出与其结构非常类似的前驱物——24-降胆甾醇,因此硅藻是 24-降胆甾烷的重要生源。

Goad 等<sup>[10]</sup>从沟鞭藻中提取到了 24-降胆甾醇,王新洲等<sup>[11]</sup>在沟鞭藻的热模拟产物中检测到了 24-降胆甾烷,Rampen 等<sup>[12]</sup>的研究也证实沟鞭藻体内也产出 24-降胆甾烷,Wang 等<sup>[6]</sup>从济阳拗陷古近系沙河街组检测到了丰富的 24-降胆甾烷,但在地层中未见硅藻化石,而与沟鞭藻生物和分子化石存在明显相关性,表明沟鞭藻是济阳拗陷 24-降胆甾烷的主要贡献者。

Holba 等<sup>[2-3]</sup>的研究表明,尽管 NCR [24/(24+27)-降胆甾烷]在三叠纪以前较低(<0.25),但一定丰度 24-降胆甾烷的存在也表明其沟鞭藻和/或硅藻的祖先可能出现在泥盆纪至前寒武纪。Zhang 等<sup>[5]</sup>对塔里木盆地具有较高有机质丰度的晚元古界、古生界岩石抽提物生物标志化合物研究结果表明,沟鞭藻和硅藻及其前驱种属有可能在震旦、寒武纪及早奥陶世已存在。

Bao 等<sup>[4]</sup>在江汉盆地古近系咸水湖相泥岩沉积有机质中发现了含量异常高的 21-降胆甾烷同系物,研究者还提出了 2 种可能的模式。到目前为止,尚无关于 27-降胆甾烷的生物来源及成因演化模式的系统报道。

## 1.2 C<sub>26</sub>降胆甾烷的分布及地质意义

Holba 等<sup>[2-3]</sup>曾经研究了从前寒武系到第三系,来自除南极洲外所有大洲的 109 个沉积盆地共 205 件油样中 24-降胆甾烷的分布,这些样品包括海相灰岩、泥灰岩、页岩、三角洲页岩、三角洲煤和湖相源岩等,分布在古纬度 80°N 至 60°S 之间的地区。结果表明,24-降胆甾烷在侏罗纪以来的地层中显示出较高的浓度,在白垩纪以后迅速增加。

此外,24-降胆甾烷的发育与所处的古气候和古纬度存在密切关系,NDR [24/(24+27)-降重排胆甾烷] > 0.5 或 NCR > 0.6 的样品主要分布在纬度高于 30° 的寒冷地区,低于 30° 的地区 NDR 或 NCR 一般较低,仅古洋流上涌地区存在。因此 C<sub>26</sub>降胆甾烷成为指示沉积有机质地质时代和古环境的重要生物标志化合物。

在塔河油田寒武—奥陶系油藏的地球化学研究中发现,原油中普遍检测出 C<sub>26</sub>降胆甾烷系列,其分布特征不仅是进行原油族群划分、油—源对比的良好分子标志物,同时还可提供塔里木盆地板块运

动以及硅藻、沟鞭藻等生物起源和演化的分子地球化学证据。

## 2 样品与实验

### 2.1 地质背景

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起阿克库勒凸起的南部,原油主要产自奥陶系碳酸盐岩储层,是一个地质储量超过亿吨级的大型海相碳酸盐岩油藏。塔河油田主体勘探区位于轮南油田桑塔木断裂以南,王铁冠等<sup>[13-14]</sup>认为塔河油田已发现的绝大多数奥陶系油藏,属于同一族群,来源于中上奥陶统烃源层。但我们最近的研究发现,塔河油田个别井的原油具有不同于奥陶系原油的特征。本文选取部分具有代表性的来自奥陶系油藏的原油样品,进行油—油对比和原油族群划分,并选取代表性的中上奥陶统和寒武系岩心和露头岩石样品,进行油—源对比。

### 2.2 实验方法

岩石样品先进行粉碎,然后进行索氏抽提。原油样品和抽提沥青的前处理,按照常规分析流程,采用正己烷脱沥青质,再用硅胶、氧化铝层析柱进行族组分分离,依次用正己烷、二氯甲烷+正己烷(2:1)混合试剂,先后冲洗出饱和烃、芳烃馏分。

使用一台 Agilent 6890N 气相色谱—5975i 质谱联用仪进行饱和烃馏分色谱质谱分析(GC-MS)。色谱条件,载气:99.999% He,流速 1ml/min;色谱柱:HP-5MS 弹性石英毛细柱(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm);柱温:进样口 300 °C,传输线 300 °C,初温 50 °C,保持 1 min,20 °C/min 升温至 120 °C,以 3 °C/min 升至 310 °C,保持 25 min;柱前压:19 psi;分流比:30:1。质谱离子化方式:EI 源,70 eV;采集方式:全扫描/多离子;灯丝电流:100 μA;倍增器电压:1 082 V。

在 Quattro-Ⅱ 型色谱/质谱/质谱系统上进行甾烷的串联质谱(GC-MS-MS)分析,色谱条件同饱和烃 GC-MS 分析,质谱系统为四极杆分析器,碰撞室气体为氩气,采用母离子→子离子方式检测,采集 M<sup>+</sup>→217, M<sup>+</sup>→231,其中分子离子 M<sup>+</sup>分别为 358,372,386,400。

对照文献[1,2,5,15]中关于 C<sub>26</sub>降胆甾烷的保留时间和峰型分布特征,在 m/z 358→217 质量色谱图上可鉴定出 2 个 24-降重排胆甾烷,2 个 27-降重排胆甾烷,4 个 24-降胆甾烷,4 个 27-降胆甾烷和 1 个 21-降胆甾烷化合物峰(图 1)。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 奥陶系原油规则甾烷分布

塔河油田奥陶系原油、寒武系及中上奥陶统烃源岩中普遍检测出丰富的 C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 规则甾烷系列(图 2, 部分图据参考文献[21])。绝大多数奥陶系原油中 C<sub>28</sub> 规则甾烷的相对含量一般低于 25%, 并与 LN46 等井中上奥陶统烃源岩有机质分布特征一致。而来自 T904 井和塔东地区 TD2 井原油, 及寒武系代表性烃源岩有机质具有相对较高的 C<sub>28</sub> 规则甾烷含量(图 2) (>25%), 并以 25% 的 C<sub>28</sub> 规则甾烷相对含量作为区分塔里木盆地台盆区古生界烃源层和相关原油的规则甾烷类生物标志物指标<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 奥陶系原油 C<sub>26</sub>降胆甾烷分布

相对于规则甾烷, C<sub>26</sub>降胆甾烷的含量很低, 常规的色谱质谱图上一般很难鉴定。在  $m/z$  358→217

(母离子→子离子) 双质谱扫描得到的质量色谱图上, 可以容易地鉴定出 24-降、27-降胆甾烷及其重排异构体系列, 以及 1 个 21-降胆甾烷化合物峰(多个异构体混合物)。

图 1 为部分样品的  $m/z$  358→217 质量色谱图, 可以看出所有来自塔河油田奥陶系油藏的原油及塔东地区 TD2 井原油中都具有完整的 C<sub>26</sub>降胆甾烷及重排产物系列。从分布型式看, 绝大多数奥陶系原油的 24-降胆甾烷相对 27-胆甾烷含量较低(图 1), 但位于塔河九区的 T904 井原油 24-降胆甾烷含量相对较高, 与塔东地区 TD2 井原油样品非常相似, 而后者被认为是典型的寒武系来源的原油<sup>[16-20]</sup>。

前人常用 NCR 和 NDR 来衡量 24-降和 27-降胆甾烷的相对含量<sup>[1-3, 6, 15]</sup>, 利用这 2 个参数可以定量地表示 2 种不同降胆甾烷的相对含量。从图 3 可以看出, 奥陶系原油的 NCR 和 NDR 值都相对

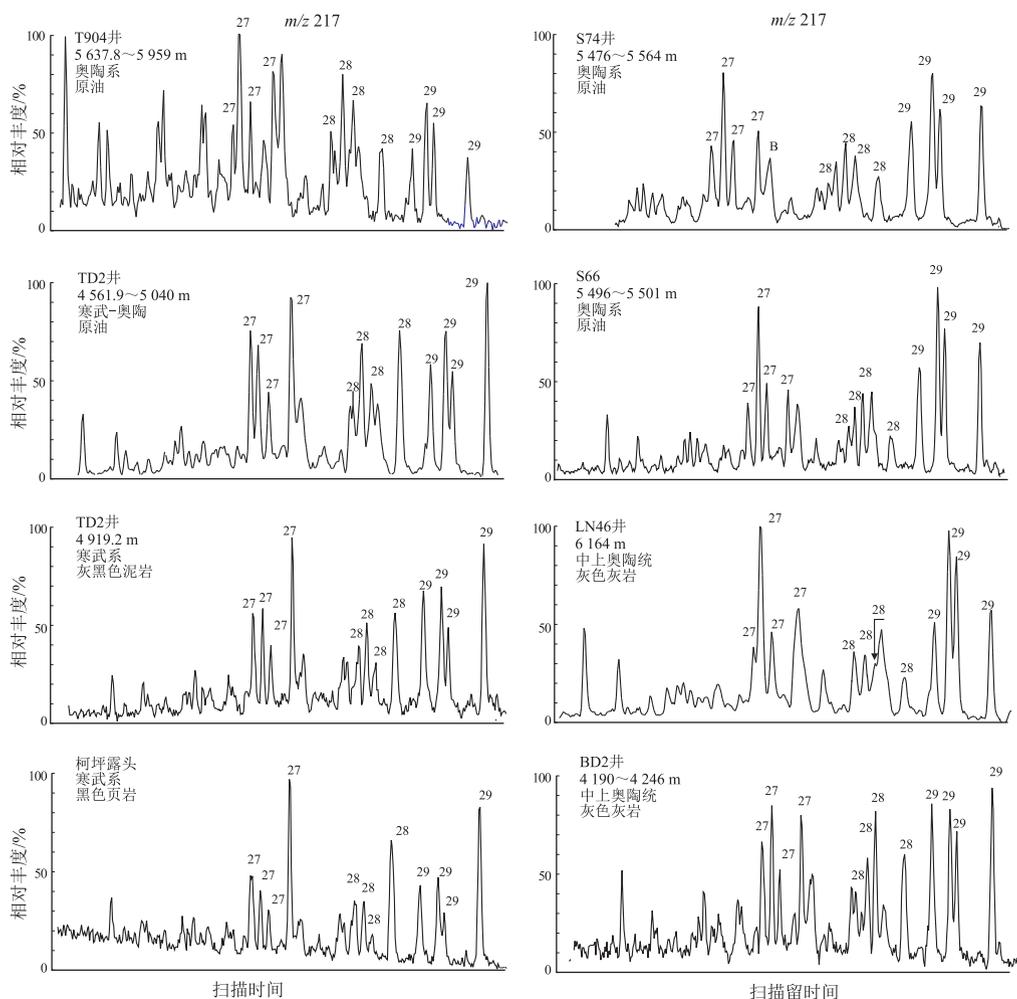


图 2 塔里木盆地塔河油田、TD2 井原油及寒武系和中上奥陶统烃源岩规则甾烷分布  
峰上数字表示甾烷的碳数

Fig.2 Distribution of regular steranes in oils from Tahe Oilfield, well TD2 and Cambrian and Middle-Upper Ordovician source rocks from Tarim Basin

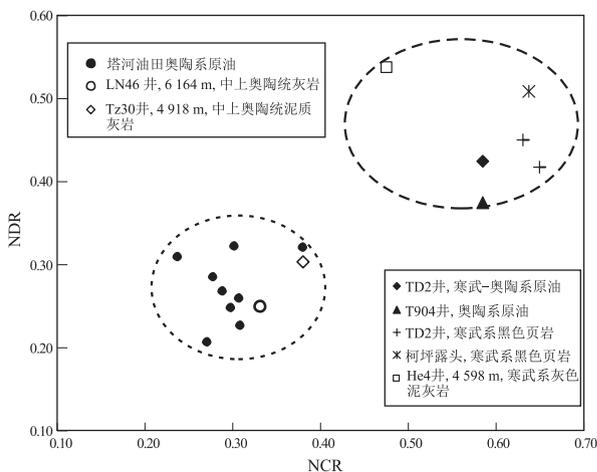


图 3 塔里木盆地奥陶系原油及代表性  
烃源岩 24-降胆甾烷 NDR-NCR 关系

Fig.3 Cross plots of nordiacholestane ratio (NDR) vs.  
norcholestane ratio (NCR) of oils and  
Ordovician source rocks from Tarim Basin

较低, NCR 值约为 0.25~0.40, NDR 值约为 0.2~0.35。而 T904 井和 TD2 井原油的参数值相对高, NCR 和 NDR 值分别为 0.50~0.65 和 0.35~0.55。所以可利用  $C_{26}$  降胆甾烷的分布特征将塔河油田奥陶系油藏划分为 2 个不同的族群。同时也得到其他地球化学证据的支持, 例如三芳甾的分布、多环芳烃的组成及稳定碳同位素值都具有明显不同的特征<sup>[20-22]</sup>。

### 3.3 古生界源岩降胆甾烷分布及油源对比

据前人的研究成果, 塔里木盆地台盆区主要发育 2 套烃源层: 中上奥陶统灰岩、泥灰岩和寒武系一下奥陶统黑色页岩、碳质页岩及(泥)灰岩。轮南油田、塔河油田等奥陶系油藏主要来自中上奥陶统烃源层<sup>[13-14, 16-19]</sup>。

本文分析了 LN46、TZ30 和 BD2 井中上奥陶统灰岩、泥质灰岩等代表性烃源岩样品的  $C_{26}$  降胆甾烷分布(图 1, 3), 认为中上奥陶统灰岩、泥质灰岩的  $C_{26}$  降胆甾烷与塔河油田大多数奥陶系油藏具有类似的分布特征, 即相对 27-降胆甾烷、24-胆甾烷的含量较低, 在 NCR-NDR 相关图上聚成一类。因此  $C_{26}$  降胆甾烷的分布特征表明塔河油田绝大多数奥陶系油藏与中上奥陶统烃源层有亲缘关系。

本次研究同时采集了 TD2 井、柯坪露头区下寒武统玉尔吐斯组( $C_{1y}$ )黑色页岩和塔西南地区和 4 井(He4)井灰色泥灰岩样品, 分析了有机质中降胆甾烷的分布特征。图 3 显示寒武系烃源岩具有相对较高的 24-降胆甾烷含量, 与 TD2 和 T904 井原油非常相近, 在 NCR-NDR 相关图上聚成一类,  $C_{26}$  降胆甾烷分布特征表明 TD2、T904 等井的原

油应为寒武系来源。根据代表性中上奥陶统和寒武系烃源岩样品的分析结果, 本文提出判识塔河油田奥陶系油藏成因的  $C_{26}$  降胆甾烷地球化学参数判识标准为:  $NCR < 0.4$ ,  $NDR < 0.35$  为中上奥陶统油气来源;  $NCR > 0.50$ ,  $NDR > 0.35$  为寒武系油气来源。Zhang 等<sup>[5]</sup>曾报道了塔西南地区和 4 井岩心及肖尔布拉克剖面上奥陶统、震旦和寒武系烃源岩样品的降胆甾烷分布特征, 发现上奥陶统的 NCR 值一般不超过 0.25, 而震旦和寒武系的 NCR 值为 0.30~0.50。尽管本文研究样品所对应的 NCR 值略高, 但其变化规律是一致的, 即寒武系烃源岩有机质及原油的 NCR 和 NDR 值大于中上奥陶统。

### 3.4 24-降胆甾烷分布的地质意义

在降胆甾烷中, 目前研究较深入的是 24-降胆甾烷, 前人的研究结果表明硅藻可能是 24-降胆甾烷的直接或间接生源<sup>[2-3]</sup>。由于硅藻最早出现于侏罗纪, 而后又在晚白垩世繁盛, 故 NCR 和 NDR 相应出现了两个飞跃<sup>[2-3]</sup>。最新的研究进展揭示, 沟鞭藻也是 24-降胆甾烷的可能生源<sup>[6, 11-12, 15]</sup>。但无论来自硅藻还是沟鞭藻, 24-降胆甾烷的出现不应早于三叠纪, 因为硅藻和沟鞭藻最早的化石记录分别在侏罗纪<sup>[25]</sup>和中三叠世<sup>[26]</sup>。

Holba 等<sup>[2-3]</sup>曾报道在中寒武统和前寒武系有机质中发现 24-降胆甾烷和 24-降重排胆甾烷, 其 NDR 值为 0.1~0.2。本次研究在塔里木盆地寒武系地层中发现了丰富的 24-降胆甾烷和 24-降重排胆甾烷系列, 且其 NCR 和 NDR 值很高, 明显高于 Holba 报道的数据, 而与白垩系地层相当<sup>[2-3]</sup>。Zhang 等<sup>[5]</sup>也发现了类似的异常现象。

生物标志化合物分布的异常可能由有机质生物来源的差异造成, 也可能由沉积环境、热成熟度的差异造成。分子热力学计算结果表明, 24-降和 27-降胆甾烷的热稳定性几乎一致, 其空间位能(steric energy)仅相差 0.6 kcal/mol<sup>[1]</sup>, 故 NCR 或 NDR 值受热成熟作用比较小, 可以不考虑热成熟作用的影响。

目前所鉴定的 24-降和 27-降胆甾烷各有 4 个异构体, 依次是  $5\alpha(H)$ ,  $14\alpha(H)$ ,  $17\alpha(H)$ -20S、 $5\alpha(H)$ ,  $14\beta(H)$ ,  $17\beta(H)$ -20R、 $5\alpha(H)$ ,  $14\beta(H)$ ,  $17\beta(H)$ -20S、 $5\alpha(H)$ ,  $14\alpha(H)$ ,  $17\alpha(H)$ -20R, 在质量色谱图上, 与  $C_{27}$  规则胆甾烷 4 个异构体的出峰顺序一致<sup>[1]</sup>。Moldowan 等<sup>[1]</sup>曾报道, 21-降胆甾烷的热稳定性大于 24-和 27-降胆甾烷, 提出  $21/(21+24+27)$ -降胆甾烷成熟度参数, 尤其适用于生油窗中晚期。但目前尚无  $C_{26}$  24-降或 27-降

胆甾烷 C-20 位差向异构体和 C-14、C-17 位 H 原子不同构型异构体热稳定性差异和作为成熟度参数的报道,至于在硅藻中发现的 24-降胆甾醇的准确构型, Volkman<sup>[9]</sup> 和 Suzuki<sup>[7]</sup> 报道的都为 5 $\alpha$ (H) 构型,其他手性中心的构型则没有更多的研究。但根据 C<sub>27</sub>胆甾烷异构体热稳定性的差异,可以合理地推测出 24-降胆甾烷的 20S 构型热稳定可能高于 20R 构型, 14 $\beta$ (H), 17 $\beta$ (H) 异构体的热稳定可能高于 14 $\alpha$ (H), 17 $\alpha$ (H), 因此 C<sub>26</sub> 24-降胆甾烷 20S/(20S+20R) 和  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  也许是类似于 C<sub>27</sub>胆甾烷的成熟度参数。本文没有将该参数与其他成熟度参数作比较,仅从 24-降胆甾烷本身相关的 2 个参数看, 20S/(20S+20R) 和  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  具有很好的相关性(图 4),表明可能受到同样的热成熟作用的控制。而 27-降胆甾烷相应 2 个参数的相关性很差(未发表成果),而且 24-降胆甾烷和 27-降胆甾烷的 20S/(20S+20R) 也不具相关性(图 4),表明 27-降胆甾烷异构体的分布与热成熟作用关系不明显,其生物来源和成因有待于进一步的研究。总之,从分析结果看, NCR 和 NDR 值受热成熟度作用的影响不大。

塔里木盆地寒武系主要为泥灰岩、硅质页岩及泥质云岩沉积,奥陶系主要为灰岩、泥(质)灰岩及白云岩沉积。从沉积环境看,各种分子地球化学参数如 Pr/Ph、伽马蜡烷含量等都相近,塔里木盆地寒武系到奥陶系地层没有明显重大的沉积环境变迁<sup>[5]</sup>。所以,24-降胆甾烷分布的异常,可能表明寒武纪时期塔里木盆地就已出现了沟鞭藻、硅藻等浮游植物或者其祖先,而且在特定的构造地质背景、沉积和气候环境下,非常繁盛且保存条件较好。Moldowan 和 Zhang 等根据甲藻甾烷的分布,提出沟

鞭藻的祖先可能出现在泥盆纪至前寒武纪<sup>[5,25-26]</sup>,也有几条证据指出沟鞭藻起始于新元古界<sup>[25,27]</sup>。

在距今约 540 Ma 的早寒武世时期发生的“寒武纪生命大爆发”事件,是地质历史上一次重要的生命演化事件。地球上的生命在短时间内爆发式地出现并繁盛起来,包括地球上现有的生命和已灭绝物种的祖先都在那时突然出现了<sup>[28]</sup>。所以根据 C<sub>26</sub>降胆甾烷的分布可以推测,后来在塔里木盆地侏罗纪和早三叠世大量繁盛的硅藻和沟鞭藻的祖先在寒武纪时期开始出现并繁衍了。边立曾等<sup>[29]</sup>也在塔里木盆地发现了类似球状沟鞭藻类化石。

从古板块的构造位置看,塔里木板块在震旦纪位于南半球高纬带,并开始逐渐向北半球漂移,至早奥陶世达到南纬 23°左右<sup>[30-31]</sup>。而 24-降胆甾烷的发育与所处的古气候和古纬度关系密切, NDR>0.5 或 NCR>0.6 的样品主要分布在纬度高于 30°的寒冷地区,低于 30°的地区 NDR 或 NCR 一般较低,仅在古洋流上涌地区存在。所以这样的古地理位置和环境也是导致塔里木盆地在寒武纪时期硅藻类(或其祖先)大量繁殖,从而使 24-降胆甾烷含量增高的原因。

从中晚奥陶世时的大约 40 Ma 时间里,塔里木板块已突然快速地从南纬 23°左右向北纬 20°大幅度漂移<sup>[32]</sup>,并伴随广泛的海底火山喷发,塔里木盆地的生物群落也发生了大的变革和分化,导致了相当数量的外源性生物(如早期的陆生植物和维管植物等)的出现。但此时整个塔里木板块位于赤道附近的低纬度地区,已不利于硅藻或其祖先等浮游藻类植物大量繁盛,因而导致 24-降胆甾烷含量的降低。

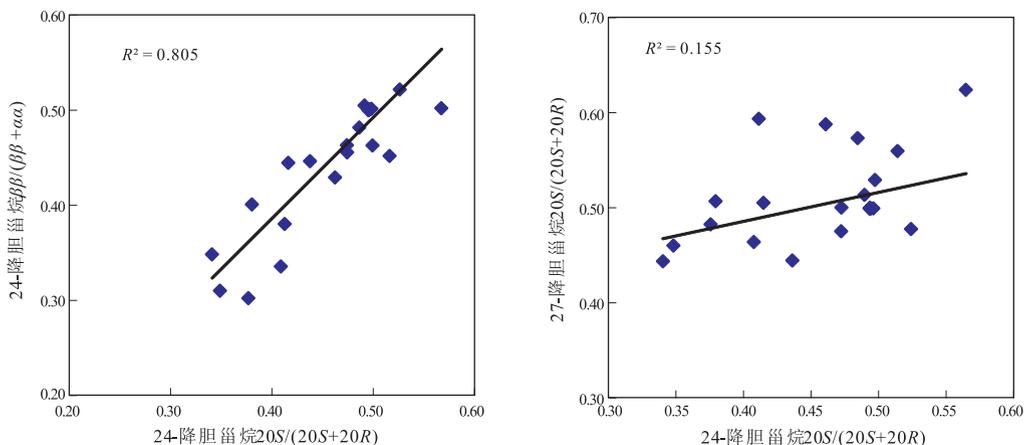


图 4 塔里木盆地奥陶系原油 24-降胆甾烷 20S/(20S+20R) 与  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  关系及 24-降胆甾烷与 27-降胆甾烷 20S/(20S+20R) 关系

Fig.4 Cross plots of 24-norcholestanol 20S/(20S+20R) vs.  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ , and cross plots of 24-norcholestanol 20S/(20S+20R) vs. 27-norcholestanol 20S/(20S+20R) of Ordovician crude oils from Tarim Basin

## 4 结论

(1) 塔河油田奥陶系油藏、寒武系和中上奥陶统烃源岩中普遍检测出  $C_{26}$  降胆甾烷和  $C_{26}$  降重排胆甾烷系列, 利用 NCR 和 NDR 等表示 24-降和 27-降胆甾烷相对含量的分子地球化学参数, 可将塔河油田原油分为 2 个族群, 即寒武系来源的原油族群 (NCR>0.50, NDR>0.35) 和中上奥陶统来源的原油族群 (NCR<0.4, NDR<0.35)。

(2) 寒武系有机质及相关原油中丰富的 24-降胆甾烷的存在, 表明塔里木盆地硅藻、沟鞭藻等浮游植物的祖先在寒武纪时期就已大量存在, 为生命的起源和演化提供了有力的证据。同时寒武纪到奥陶纪 24-降胆甾烷的变化也为塔里木板块从南半球寒冷的高纬度向北半球低纬度的漂移提供了分子地球化学证据。

### 参考文献:

- [1] Moldowan J M, Lee C Y, Watt D S, et al. Analysis and occurrence of  $C_{26}$ -steranes in petroleum and source rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(4): 1065-1081.
- [2] Holba A G, Dzou L I P, Masterson W D, et al. Application of 24-norcholestanes for constraining source age of petroleum [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5/7): 1269-1283.
- [3] Holba A G, Tegelaar E W, Huizinga B J, et al. 24-Norcholestanes as age sensitive molecular fossils[J]. *Geology*, 1998, 26(9): 783-786.
- [4] Bao Jianping, Li Maowen. Unprecedented occurrence of novel  $C_{26}$ - $C_{28}$  21-norcholestanes and related triaromatic series in evaporitic lacustrine sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(8): 1031-1036.
- [5] Zhang Shuichang, Moldowan J M, Li Maowen, et al. The abnormal distribution of molecular fossils in the pre-Cambrian and Cambrian: its biological significance [J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(3): 193-200.
- [6] Wang Guangli, Wang T G, Simoneit B R T, et al. The distribution of molecular fossils derived from dinoflagellates in Paleogene lacustrine sediments (Bohai Bay Basin, China)[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(11): 1512-1521.
- [7] Suzuki N, Sampei Y, Koga O. Norcholestane in Miocene Onnagawa siliceous sediments, Japan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(18): 4539-4545.
- [8] Nichols P D, Palmisano A C, Rayner M S, et al. Occurrence of novel C30 sterols in Antarctic sea-ice diatom communities during a spring bloom [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(5): 503-508.
- [9] Volkman J K, Gillan F T, Johns R B. Sources of neutral lipids in a temperate intertidal sediment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(10): 1817-1828.
- [10] Goad L J, Withers N. Identification of 27-nor-(24R)-24-methylcholesta-5,22-dien-3 $\beta$ -ol and brassicasterol as the major sterols of the marine dinoflagellate *Gymnodinium simplex*[J]. *Lipids*, 1982, 17(12): 853-858.
- [11] 王新洲, 宋一涛, 王学军. 石油成因与排油物理模拟: 方法、机理及应用[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 14-32.  
Wang Xinzhou, Song Yitao, Wang Xuejun. Petroleum formation and expulsion by simulation[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1996: 14-32.
- [12] Rampen S W, Schouten S, Panoto F E, et al. On the origin of 24-norcholestanes and their use as age-diagnostic biomarkers [J]. *Geology*, 2007, 35(5): 419-422.
- [13] 王铁冠, 王春江, 何发岐, 等. 塔河油田奥陶系油藏两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 oil reservoirs, Tahe Oil Field [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(1): 74-79.
- [14] Wang T G, He Faqi, Wang Chunjiang, et al. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(11): 1637-1646.v
- [15] 王广利, 李姝. 沟鞭藻: 24-降胆甾烷的重要生源 [J]. *石油实验地质*, 2010, 32(1): 64-66, 70.  
Wang Guangli, Li Shu. Dinoflagellates as potential precursors of 24-norcholestanes [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(1): 64-66, 70.
- [16] 张水昌, 王飞宇, 张保民, 等. 塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究 [J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 23-28.  
Zhang Shuichang, Wang Feiyu, Zhang Baomin, et al. Middle-upper Ordovician source rock geochemistry of the Tarim Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2000, 21(6): 23-28.
- [17] Zhang Shuichang, Huang Haiping. Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 1. Oil family classification [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(8): 1204-1214.
- [18] Mi Jingkui, Zhang Shuichang, Chen Jianping, et al. The distribution of the oil derived from Cambrian source rocks in Lunnan area, The Tarim Basin, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(S1): 133-140.
- [19] 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 塔里木盆地塔东 2 井稠油有机地球化学特征 [J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(2): 148-151.  
Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang, et al. Organic geochemistry of TD-2 well in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(2): 148-151.
- [20] 李美俊, 王铁冠, 王春江, 等. 塔河油田奥陶系原油三芳甾分布特征及原油族群划分 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(5): 20-24.  
Li Meijun, Wang Tieguan, Wang Chunjiang, et al. Distribution of triaromatic sterols and oil family classification of Ordovician oils in Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(5): 20-24.
- [21] Li Meijun, Wang T G, Lillis P G, et al. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic sterols and dinosteroids in oils and Cambrian-Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(8): 1643-1654.

