

doi:10.3799/dqkx.2010.081

塔里木盆地海相油气源与混源成藏模式

李素梅¹, 庞雄奇¹, 杨海军², 肖中尧², 顾乔元², 张宝收²

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要: 塔里木盆地油气源长期争论不休。采用单体烃同位素、包裹体成分与年代指示生物标志物等途径, 对塔里木盆地塔中、轮南典型油藏进行了油气成因与混源成藏模式的研究。结果表明, 塔中、轮南绝大部分原油生物标志物与中上奥陶统烃源岩相似, 仅少部分原油显现与寒武系一下奥陶统烃源岩相近的特征, 但正构烷烃单体烃碳同位素分析表明, 原油绝大部分实质仍为混源油。塔中包裹烃成分分析进一步证实了原油的混源特性。利用同位素进行的混源定量结果表明, 塔中原油中寒武系一下奥陶统成因原油的混入量约为 11%~100% (均值 45%), 轮南地区约为 11%~70% (均值 36%), 表明寒武系一下奥陶统、中上奥陶统均为塔里木盆地的主力烃源岩。油气运移地化指标与地质条件的综合研究认为, 塔中地区断层是油气运移的重要通道, 塔中 I 号断层与斜交的走滑断层的交汇点是油气的主要注入点; 轮南地区侧向运移特征较明显。研究区存在调整型、多期充注型与原生型多种混源成藏模式。塔里木海相油气的普遍混源表明深层仍有油气勘探潜能。揭示海相混源油气成藏机制是指导塔里木海相油气勘探的关键。

关键词: 生物标志物; 同位素; 包裹体; 混源成藏模式; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2010)04-0663-11

收稿日期: 2009-12-08

Generation, Migration and Accumulation Model for the Marine Oils in the Tarim Basin

LI Su-mei¹, PANG Xiong-qi¹, YANG Hai-jun², XIAO Zhong-yao², GU Qiao-yuan², ZHANG Bao-shou²

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China

Abstract: The origin and accumulation mechanism of the marine oils in the Tarim basin has long been a disputed issue. Compound specific isotope, fluid inclusion technique and age-indicating biomarkers have been used in investigating hydrocarbons generation and migration in this study. It is observed that most of the oils in the Tazhong and Lunnan uplifts correspond well with the Middle-Upper Ordovician source rocks according to biomarkers, suggesting their good genetic relationship. However, the compound specific isotope of *n*-alkanes shows that the oils are primarily mixed oils from both the $\in -O_1$ and the O_{2+3} strata, which is further proved by chemical components in fluid inclusions. It is predicated by $\delta^{13}\text{C}$ of *n*-alkanes that, the $\in -O_1$ genetic affinity oils mixed in the Tazhong oils range in 11%–100% (average of 45%), and about 11%–70% (average of 36%) in the Lunnan oils, which suggests that both the $\in -O_1$ and the O_{2+3} are the main source intervals for the oils in the Tarim basin. A comprehensive study of migration fractionations of biomarkers and geological conditions shows that, No. 1 fault and the associated faults played an essential role in hydrocarbons migration with several main charging points observed where strike slip faults cutting across the No. 1 fault. However, lateral migration is an important pattern for the Lunnan oils. Several oil-mixing models are concluded including adjusting type with oil mixing during hydrocarbons re-migration and re-accumulation, multiple-charging type with hydrocarbons from different episodes, and primary type with oil mixed during secondary migration pathway even during primary migration. Our opinion of intensive oil mixing in the Tarim basin suggests great deep petroleum potential in the basin, and unraveling hydrocarbons-accumulation mechanism is significant for further petroleum exploration.

基金项目: 国家重点基础研究与发展“973”项目(No. 2006CB202308); 国家自然科学基金项目(Nos. 40973031, 40772077/D0206); 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室基金(No. PRPJ2008-02)。

作者简介: 李素梅(1968—), 女, 副教授, 主要从事有机地球化学研究工作. E-mail: smli8888@yahoo.com.cn

Key words: biomarkers; compound specific isotope; fluid inclusion; oil mixing model; petroleum geology.

0 引言

作为中国西部最大、最具海相油气勘探潜力的叠合盆地——塔里木盆地，油气勘探虽历经 20 余年，但油气源研究进展与争议始终共存 (Graham *et al.*, 1990; 梁狄刚等, 2000; 王招明和肖中尧, 2004)。争论的焦点是：寒武系一下奥陶统和中上奥陶统到底谁是主力烃源岩？依据生物标志物甲藻甾烷、24-降胆甾烷等，部分学者认为中上奥陶统烃源岩是主力烃源岩 (Zhang *et al.*, 2000a; 张水昌等, 2000b, 2001, 2002, 2004a, 2004b)；另一部分学者认为寒武系一下奥陶统亦很重要。孙永革等 (2004)、Sun *et al.* (2003) 利用苯基类异戊二烯，认为寒武系是塔里木盆地原油的重要烃源岩；Cai *et al.*

(2007)、陈利新等 (2008) 依据硫同位素等，提出塔里木盆地原油主要来自寒武系。综合分析认为，先前研究是从不同角度、采用不同的对比指标对不同含油气区原油进行对比，所得结论难免不一致。纵观国内外当前油源对比研究，笔者认为主要问题是：油气源对比与有利烃源岩认定多局限于定性研究，缺少定量研究；对比指标的选定存在随机性，缺少有效性评价标准；不重视或忽视成烃与成藏过程的研究。塔里木盆地海相油气源及其相对贡献的研究，对于指导油田下一步油气勘探方向至关重要。

针对塔里木盆地油源研究中存在的问题，本研究在以往研究基础上，结合地质研究，采用单体烃同位素、包裹体成分等分析途径，对塔中、塔北典型油气藏进行精细油源调查与相对贡献定量预测，探讨

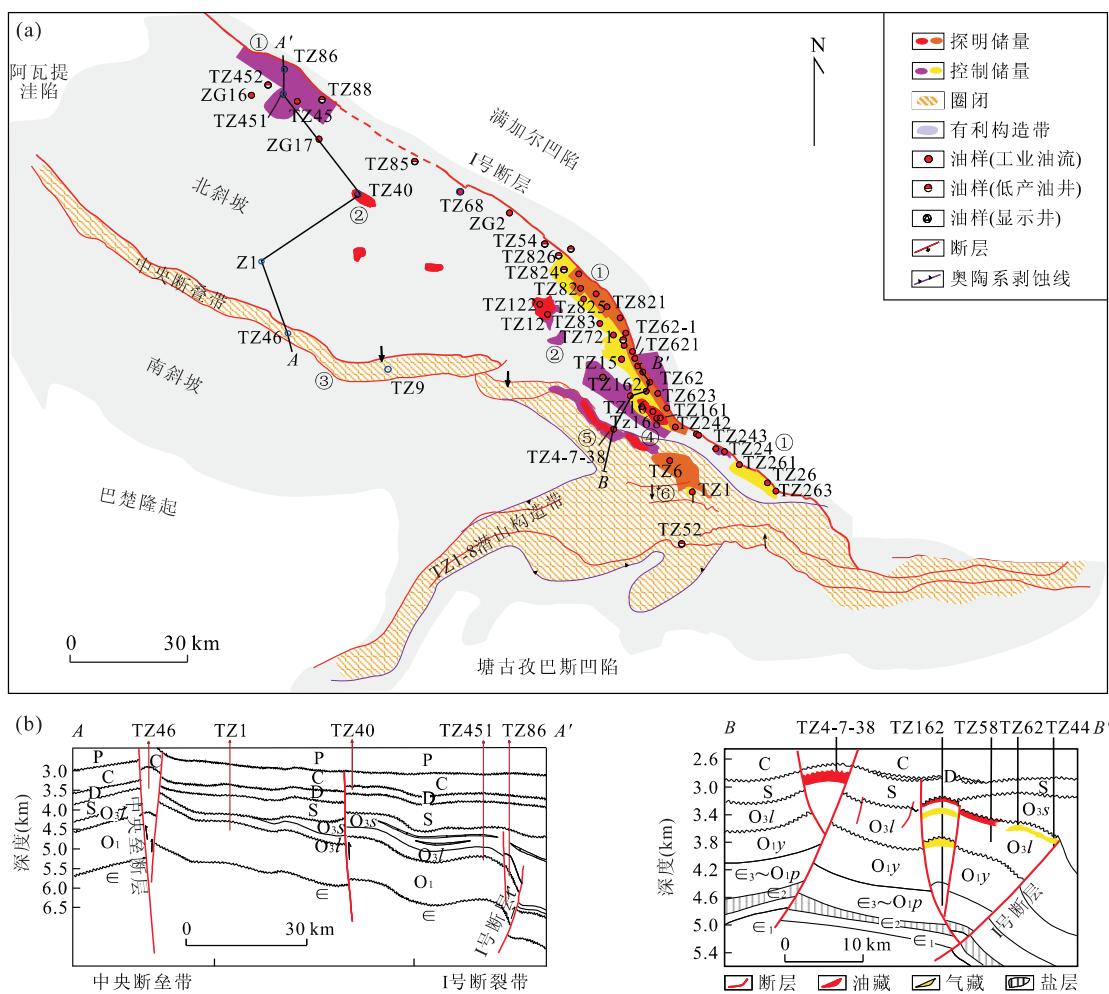


图 1 塔中中央隆起构造单元与部分油样位置

Fig. 1 Tectonic units and location of oil samples in the Tazhong uplift

① I 号断裂带；② TZ47-15 井区；③ TZ2 井区；④ TZ16 井区；⑤ TZ4 井区；⑥ TZ1-6 井区

油气成藏模式.

1 样品与实验

分别采集塔中、轮南地区原油样品 114 个、29 个(图 1)、烃源岩样品 10 个、储层包裹体样品 10 个。主要测试途径包括全油色谱、饱和烃与芳烃定量色谱—质谱、色谱—质谱—质谱和同位素质谱。GC/MS 实验条件与化合物定量方法参见 Jiang *et al.* (2001), 选用标样包括 nC_{24} D₅₀、(20R-5 α H14 α H17 α H)d4-C₂₇ 留烷、d₁₀-蕙。单体烃同位素分析采用 HP6890 气相色谱与同位素质谱相连。实验条件:色谱柱为苯基—甲基—硅酮固定相毛细管柱($60\text{ m} \times 0.25\text{ mm i. d.} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)，气相色谱的升温程序: 50 °C 恒温 1 min, 以 3 °C/min 升到 310 °C, 恒温 30 min. He 载气, 恒流模式, 流量 1.0 mL/min。

2 混源油识别与主力烃源岩确认

2.1 地球化学证据——生物标志物

大量研究表明, 塔里木盆地寒武、中上奥陶统烃源岩及相关原油具有显著的差异(梁狄刚等, 2000; Zhang *et al.*, 2000a; 张水昌等, 2002, 2004b; 肖中尧等, 2004, 2005): 寒武系(或 \in -O₁)烃源岩和相关原油生物标志物具有甲藻甾烷、三芳甲藻甾烷、4-甲基-24-乙基胆甾烷、24-降胆甾烷、伽马蜡烷丰度较高, 重排甾烷丰度较低, C₂₇、C₂₈、C₂₉—规则甾烷呈“斜线型”或“反 L 型”的特点; 中上奥陶统烃源岩和相关原油一般具有相反的特征, 规则甾烷呈“V”字型分布(C₂₇>C₂₈<C₂₉)。此外, 较高丰度的苯基类异戊二烯烃被认为与寒武系烃源岩有关(Sun *et al.*, 2003; 孙永革等, 2004)。依据甾类化合物指纹, 塔中绝大多数原油、几乎全部轮南原油与中上奥陶统烃源岩相关, 规则甾烷呈“V”型分布(图 2a), 仅塔中 10 多个原油明显携带寒武系一下奥陶统烃源

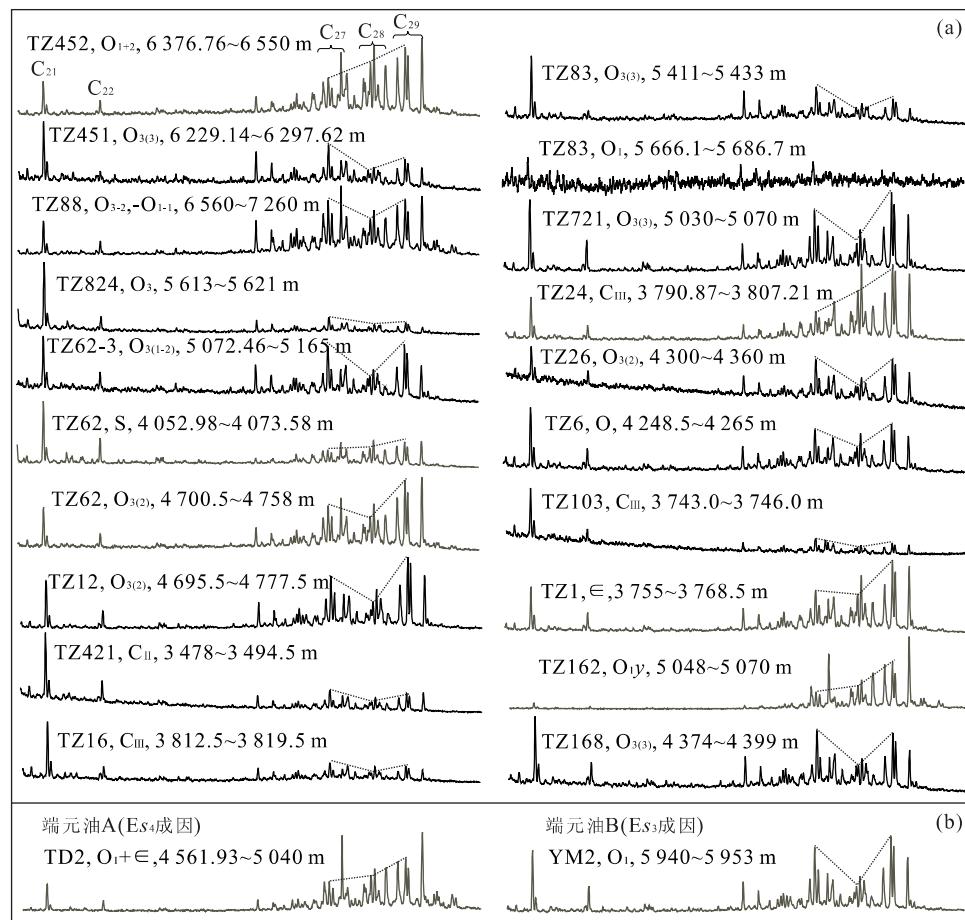


图 2 塔中部分原油 $m/z=217$ 质量色谱

Fig. 2 Partial $m/z=217$ mass fragmentograms for selected oils in the Tazhong uplift

岩特征,如 TZ452 (O_{1+2})、TZ62 (S, O) 及 TZ162 (O), C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} —规则甾烷呈线型或反“L”型,反映寒武系烃源岩的成烃贡献(图 2a)。

在 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} —规则甾烷相对丰度三角图中,寒武系一下奥陶统、中上奥陶统烃源岩各自聚类,前者 C_{28} 甾烷丰度相对高于后者。观察到绝大部分塔中原油与 O_{2+3} 烃源岩聚类相关,仅少数原油与 $\in - O_1$ 烃源岩聚类,似乎再次反映塔中原油主要来自中上奥陶统烃源岩。值得提出的是,TD2 ($\in - O_1$) 自生自储原油、YM2 (O_1) 内幕原油分别与 $\in - O_1$ 、 O_{2+3} 烃源岩聚类,反映其间较好的成因联系。以往研究表明,TD2 原油主要来自 $\in - O_1$ 烃源岩(肖中尧等,2004)。

与以往研究相似(Zhang et al., 2000a; 张水昌等,2000b),塔中部分原油中检测出了较丰富的甲藻甾烷和 4α -甲基-24-乙基甾烷(C_{30}),指示寒武系一下奥陶统烃源岩的成烃贡献,部分原油丰度较低,指示中上奥陶统烃源岩的成烃贡献。

采用多馏分、多组分、多参数对比途径对研究区原油作了进一步的油—油、油—岩对比。与以往研究相似,除上文差异外,观察到寒武系一下奥陶统烃源岩还具有相对高伽玛蜡烷/ C_{30} 蜡烷、低 C_{29} —重排甾烷/ C_{29} —规则甾烷等特征(图 3b, 3c)(肖中尧等,2004; 唐友军和王铁冠,2007)。特别地,笔者发现相

对较高丰度的 C_{27} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 构型似乎是寒武系一下奥陶统烃源岩及相关原油的普遍特征,在 TD1、TD2、ML1 和 H4 等井寒武系烃源岩中,该异构体丰度均高于相同埋深的中上奥陶统烃源岩,该特征与 $\in - O_1$ 烃源岩相对较低的 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta$ / $(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 值似乎吻合(图 3d)。寒武系一下奥陶统烃源岩及其相关原油较低甾烷异构化程度可能并不完全与热演化程度有关,而是体现了母源输入、源岩古沉积环境的差异。在东营凹陷咸水相、淡水相烃源岩中观察到类似的异构化差异现象(李素梅等,2002)。 C_{27}/C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta 20(R,S)$ 、伽玛蜡烷/ C_{30} —蜡烷、 C_{29} —重排甾烷/ C_{29} —规则甾烷和 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta$ / $(\alpha\alpha\alpha + \alpha\beta\beta)$ 等多馏分、多参数对比表明,塔中绝大部分原油与中上奥陶统具有较好的相关性(图 3),只有少部分原油(图 3b 阴影部分)与寒武系一下奥陶统烃源岩有较好的相关性(图 3b)。轮南原油有类似的对比结果。生物标志物的对比结果对于塔中、轮南地区油源的识别意义是显而易见的,但并不能由此得出仅中上奥陶统是主力烃源岩的结论,理由如下:

(1)甾萜类生物标志物在塔里木盆地这样的较高成熟度原油中的丰度很低(部分甚至缺失),油源对比结果不能充分反映原油主体成分的对比结果。甾萜类化合物的丰度明显受成熟度控制(Li et al., 2003)。塔中原油中甾萜类生物标志物与原油主体成

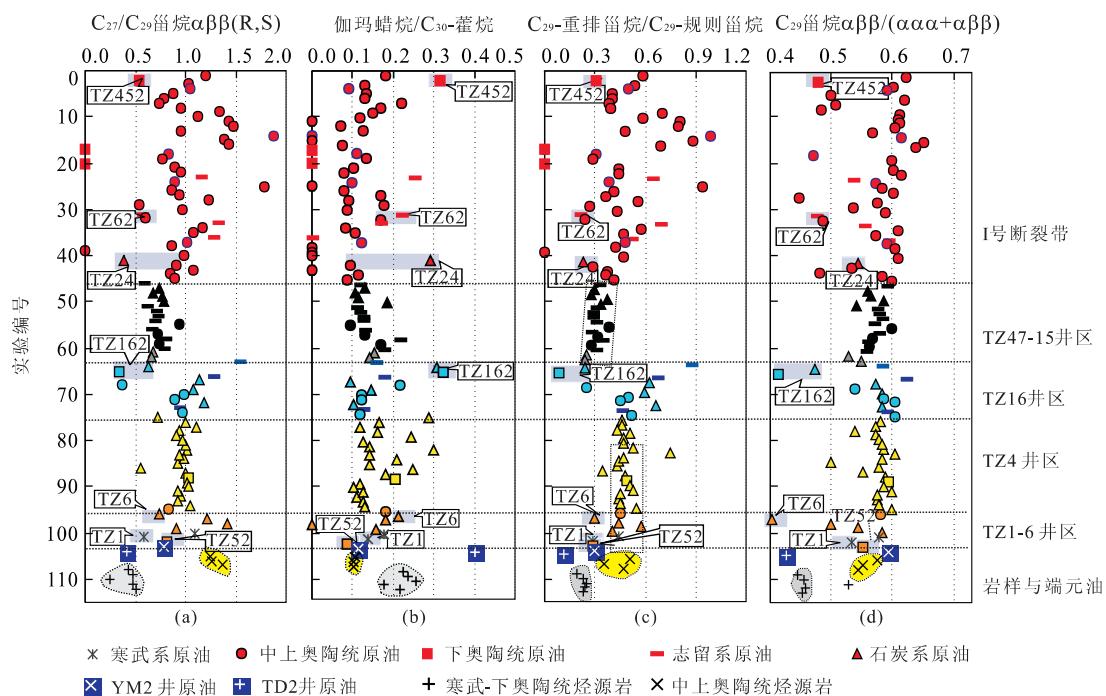


图 3 塔中原油、烃源岩生物标志物参数对比指示混源

Fig. 3 Oil-oil and oil-source rock correlation showing mixed sources of the Tazhong oils

分——链烷烃有时相差两个数量级(李素梅等,2008a). 利用生物标志物进行油源对比时,可能会强化甾萜生标浓度较高的端元油、削弱或疏漏生标浓度低或缺失的端元油.

(2)原油是一种液态流体,密度驱动扩散混合时不可能是跳跃式局部性的,塔中寒武系一下奥陶统成因原油仅在局部少数井中零星分布(但几乎存在于各个构造带、各个层系)极可能只是一种假象,与非原地生成原油的油气充注模式与成藏机制并不吻合(England and Mackenzie, 1989).

(3)寒武系一下奥陶统有一套公认的有利烃源岩(张水昌等,2004a),尽管目前成熟度较高,但并不能排除其在地史演化过程中曾大量生排烃并异地聚集成藏. 通常情况下,原油在相对构造高部位的储层中聚集成藏后热成熟作用将会终止,在塔里木盆地,原油的热演化至少会滞后烃源岩. 很难想象这部分原油已经全部裂解成气,特别是在TD2、TZ62井中已发现存在纯寒武系一下奥陶统成因原油的情形下(肖中尧等,2005;唐友军和王铁冠,2007).

2.2 地球化学证据——单体烃同位素

单体烃同位素可反映母源岩沉积环境与生源输入特征,受成熟度及运移分馏等的影响相对较小(张文正等,1992). 观察到东营凹陷未熟—低熟油/岩与相同成因的正常油/岩正构烷烃单体同位素差异很小(Li *et al.*, 2010)、塔中相同成因凝析油与正常成熟度原油同位素相差不大,说明在一定成熟度范围内,成熟度对同位素的影响相对较小,一般小于3‰(赵孟军和黄第藩,1995).

TD2($\in +O_1$)、TZ62(S)(透镜体岩性油气藏)原油被认为源自寒武系一下奥陶统烃源岩(肖中尧等,2005;唐友军和王铁冠,2007). 本研究发现,不仅生物标志物特征与寒武系一下奥陶统烃源岩相似(图2,3),而且两井原油中正构烷烃单体烃同位素

值与YD2井寒武系烃源岩也极其一致,并以 $\delta^{13}C$ 值相对较重为特征(一般为 $-26\text{\textperthousand}$ ±)(图4). 由此可确信,TD2($\in +O_1$)、TZ62(S)源自寒武系一下奥陶统烃源岩,可作为 $\in -O_1$ 成因原油的端元油(A). 英买力地区YM2(O_1)井原油与中上奥陶统烃源岩有统一的生物标志物特征,显示较好的亲缘关系(图2,3). 特别地,观察到YM2井原油与 $\in -O_1$ 烃源岩及其相关原油有完全相反的单体烃同位素特征,走向了另一极端. 鉴于以往研究中已发现 $\in -O_1, O_{2+3}$ 烃源岩及相关原油存在族组分的同位素差异(王传刚等,2006;唐友军和王铁冠,2007),并且YM2井原油在分析的塔中、塔北40多个原油中正构烷烃单体同位素值最低,一般为 $-35\text{\textperthousand}$ 左右(图4),依据生物标志物与单体烃同位素,本研究将YM2(O_1)原油定为中上奥陶统成因原油的端元油(B). 不足的是,本次分析的中上奥陶统烃源岩正构烷烃单体烃同位素值总体高于YM2原油(可能因中上奥陶统烃源岩主要取自塔中隆起,存在运移烃侵染现象),但这并不影响将YM2井定为中上奥陶统成因端元油.

对塔中地区31个原油的分析表明,塔中原油正构烷烃单体烃同位素曲线介于上述两种成因端元油之间(图4),说明塔中原油几乎全部为混源油. 轮南原油(12个样品)有类似塔中的单体烃同位素特征, $\delta^{13}C$ 值偏小于塔中,反映轮南原油主体亦为混源油. 分析还表明,塔河及其西部地区,原油正构烷烃单体烃同位素值有降低趋势,表明油源发生一定程度的变化.

原油正构烷烃是原油的主体成分,相对于生物标志物,其受成熟度、油气运移等影响相对较小,因而在复杂油气区的油源对比中其可信度相对较高. 本研究同位素与生物标志物油源对比结果有出入,主要与不同烃源岩在相同/不同时期所生烃的组成与分布有差异、导致混源油中不同组分可能继承了

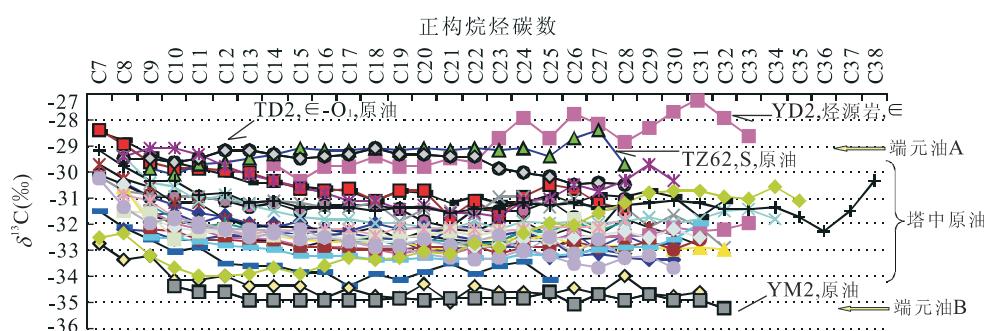


图4 塔中原油、烃源岩正构烷烃单体同位素指示原油混源

Fig. 4 $\delta^{13}C$ values of individual *n*-alkanes for oils and source rock in the Tazhong uplift and the peripheral zone indicating oil mixing

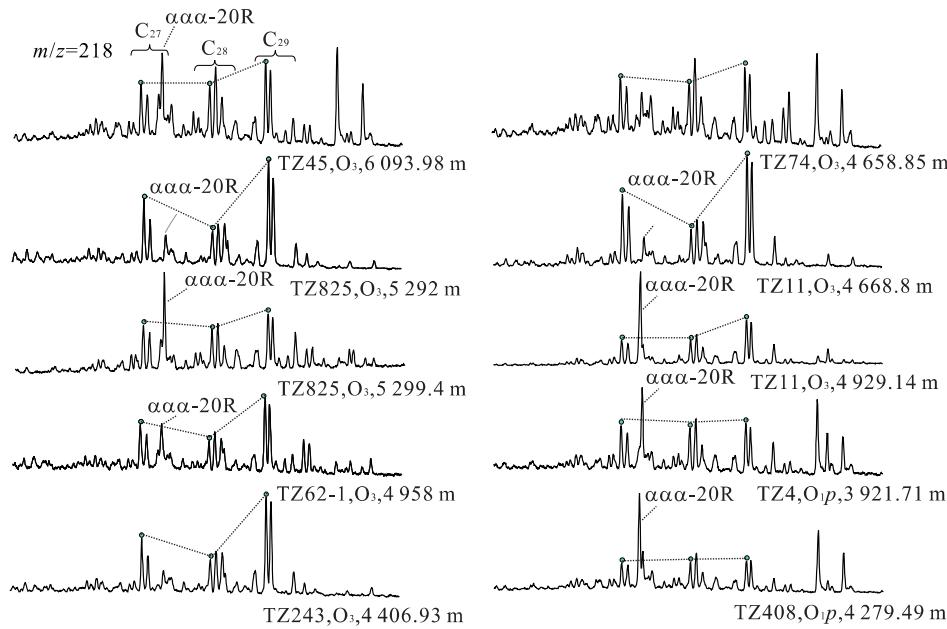


图 5 塔中碳酸盐岩储层方解石脉包裹烃 $m/z=218$ 质量色谱

Fig. 5 Partial $m/z=218$ mass fragmentograms of the fluid inclusion oils from Carbonate reservoir in the Tazhong uplift

不同油源在相同/不同时期的母源特征有关。

2.3 地球化学证据——包裹体成分

叠合盆地烃源岩较高的热演化程度及深部油气可能的热裂解作用,常导致甾萜类生物标志物指标失去地球化学指示意义;叠合盆地多期构造抬升与演化导致的油气藏的调整、烃类改造与破坏,使油源调查复杂化;晚期气侵与有机—无机作用(如 TSR)对油气的作用,使油源对比进一步复杂化。包裹体通常能真实地记录油气充注时的原始面貌,包裹烃受上述因素的影响往往相对较小。

对塔中 30 个储层方解石包裹体进行了成分检测,多数样品中检测到了丰富的甾萜类生物标志物(李素梅等,2009a)。包裹烃主要有两种甾类分布型式,一种为 C_{28} —甾烷丰度较高, C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} —规则甾烷呈“直线”型或反“L”型(图 5),如 TZ45(O_3)、TZ825(O_3)、TZ4(O_{1-p})、TZ408(O_{1-p})等 6 个包裹体, C_{28} —/ C_{29} —规则甾烷值明显高于其他样品,甾烷异构化参数值也相对偏低,TZ4(O_{1-p})、TZ408(O_{1-p})井 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(S+R)$ 值分别为 0.42、0.49(李素梅等,2009a)。特别地,相当多的包裹体样品如 TZ408、TZ11 和 TZ45 等,显示较高丰度的 $C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$ 异构体特征(图 5),该特征与寒武系烃源岩相似,表明此类包裹烃主要为寒武系一下奥陶统成因,并可能为早期生烃阶段的包裹产物。另一种包裹体为“V”型规则甾烷分布型式(图 5),如 TZ11(O)等,反映中上奥陶统成因特征。

主要检测到两种类型的包裹烃同位素,一种为相对轻的正构烷烃单体同位素,如 TZ825(O_3 , 5 292.0 m)井,同位素值分布范围一般为 $-34.04\text{‰} \sim -35.63\text{‰}$,与中上奥陶系成因的英买 2(YM2, O_1)井原油相近。鉴于其生物标志物特征与中上奥陶统烃源岩也很相似,并且薄片观察显示为一期包裹体,认为 TZ825 井包裹体记录了较纯的中上奥陶统成因原油,弥补了本研究在塔中地区分析样品中未见纯中上奥陶统成因原油的不足。另有两个样品的包裹烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值($nC_{15} \sim C_{23}$)分布范围为 $-31.45\text{‰} \sim -33.57\text{‰}$,重于 TZ825(O_3 , 5 292.0 m),轻于塔东 2(TD2, $\in O_1$),显示混源特征,指示烃类被包裹前油气已经发生混合作用。上述包裹体成分与同位素的分析表明,塔中地区存在多源充注现象,存在混源油。

2.4 地质证据

混源油气的形成是在多种油气形成地质条件与成藏地质要素耦合下、包含热动力学与化学动力学机制的一个复杂的过程。多套烃源岩、多期生烃是混源油形成的物质基础;多期构造活动与盆地内差异的流体势是混源油气形成的动力学基础;纵横交错的各类输导层,是混源油形成的必备条件。

塔里木盆地寒武、奥陶统系烃源岩可进一步划分为下寒武统(\in_1)、中寒武统(\in_2)、黑土凹组(O_{1-2})、一间房组(包括却尔却克—萨尔干组)(O_2)、良里塔格组(O_3)多套烃源岩。寒武系深海—

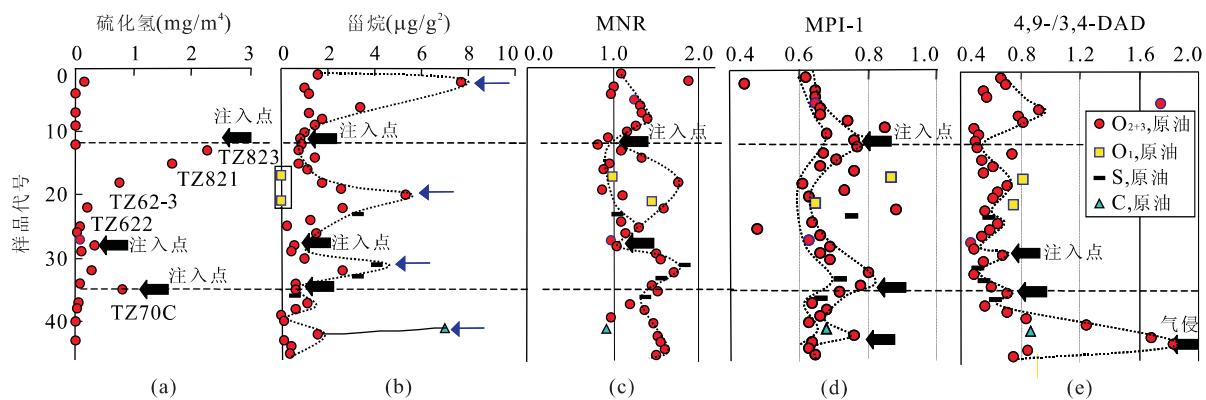


图 6 塔中 I 号构造带东西向原油基本地球化学参数指示油气运移特征

Fig. 6 Geochemical parameters of the oils around the No. 1 fault indicating basic oil migration features

纵坐标. 样品代号, 按地理位置从左向右排列; MNR. 甲基萘指数; MPI-1. 甲基菲指数 I; 4,9-/3,4-DAD. 4,9-/3,4-二甲基金刚烷; 黑箭头指示油气注入点, 一般为转换断层发育附近

浅海泥岩相烃源岩主要发现于满加尔凹陷、塔东和柯坪地区, 有机碳 (TOC) 分布范围为 1.2%~3.3%、最高达 7.6% (Cai et al., 2009)、I-II 干酪根类型、净厚度高达 400 m、面积为 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。寒武系烃源岩在晚加里东—早海西期进入生油高峰期 (赵孟军等, 2008), 目前已达到较高的热成熟度。黑土凹组 (O_{1-2}) 为欠补偿盆地相, 岩性为碳质与硅质泥岩、笔石与放射虫页岩, 在满东和塔东地区 TD1、TD2 井均钻遇。塔东 1 井黑土凹组烃源岩厚 48 m, TOC 为 0.5%~2.7%, 折算 R_o 值为 1.7%~2.2% (张水昌等, 2004a)。中、上奥陶统一间房烃源岩为 LX1 和 GC4 井钻遇, 其生烃高峰为晚海西, 二叠系达到过成熟 (赵孟军等, 2008)。良里塔格组烃源岩 (O_3) 发育于塔中、塔北和巴楚一带。在塔中地区, 上奥陶统烃源岩为陆缘陆棚相至斜坡相, TOC 值一般为 0.49%~0.84%; 有机质类型为 I 型和 II~III 型 (Cai et al., 2009); 折算镜质体反射率为 0.81%~1.3%, 在晚燕山—喜马拉雅期进入生油高峰期。上述烃源岩在空间分布上有上下叠置关系、在生烃时间上也有重叠时期, 海西期为寒武系、奥陶系烃源岩重要的液态烃生成时期。塔里木盆地具有油气混源的物质条件。

塔中、轮南地区深切油源断层、多个风化壳层不整合面, 裂缝—孔洞体系极其发育, 为油气成藏前后发生混源提供了充分条件, 如塔中 I 号断层切割基底至上奥陶统地层 (图 1b), 活跃于加里东期并在此后的构造活动中再度活化, 而横切 I 号断层的多个北东—南西向转换断层 (形成于晚奥陶世) 及其相关的微断裂、裂缝体系已被证实是重要的油气垂向运移通道 (图 6), 对混源油气的形成发挥了至关重要的作用。

塔中 I 号断裂等一些主干运移通道 (与 I 号断层斜交的 NE-SW 向走滑断层), 显然承担了多期成藏阶段油气的输导角色。这种与多套源岩相沟通的多期有效的优势运移通道, 为油气二次运移途中发生混源提供了有利条件。塔里木盆地至少有加里东、海西、喜马拉雅多期构造运动, 其导致的油气藏的破坏、油气的调整与重新分配, 是调整型混源油气形成的主要机制。在塔中绝大多数原油中, 都检测到了降解油与未降解油混合的证据 (另文阐述), 表明其为混源油的主要类型之一。幕式构造运动、快速成藏可能也是碳酸盐岩区原生型混源油气藏形成的重要机制, 否则似乎无法解释具有强非均质性的碳酸盐岩储层中油气的广泛混源现象。

3 塔里木盆地海相油气混源相对贡献

同位素受成熟度的影响相对较小, 这对利用同位素进行塔中混源油相对贡献定量研究意义重大。塔中原油成熟度差异明显、具有次生改造与多期成藏特性, 如果利用生物标志物进行混源定量, 其校对程序应该比定量过程更为复杂, 这将严重影响计算结果的可信度。塔中、轮南地区原油正构烷烃碳同位素分布较为稳定, 特别是中间中等分子量正构烷烃 (图 4), 本研究选用 nC_{20} 的同位素值作为参照物进行混源定量计算。计算公式如下:

$$m(\%) = (c_i \times \delta C_i - c_Eb \times \delta C_Eb) / (c_Ea \times \delta C_Ea - c_Eb \times \delta C_Eb) \times 100, \quad (1)$$

其中, δC_i 为原油 i 的 nC_{20} 碳同位素值; δC_Ea 为端元油 A ($\in O_1$ 成因) 的 nC_{20} 碳同位素值; δC_Eb 为端元

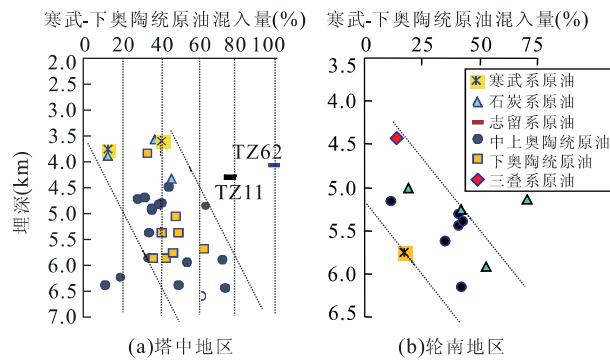


图 7 塔中、轮南地区 $C-O_1$ 成因原油混入量与埋深关系

Fig. 7 Percent of $C-O_1$ genetic affinity oils mixed versus oil burial depth

油 B(O_{2+3} 成因)的 nC_{20} 碳同位素值; c_i 、 c_{Ea} 、 c_{Eb} 为原油 i、端元油 A、B 的 nC_{20} 浓度; m 为测试原油中端元油 A 的混入比例。公式(1)右侧参数均为可实际测定值。计算结果如图 7 所示。结果表明, 塔中原油中寒武系一下奥陶统成因原油的混入量约为 11%~100% (均值 45%), 并有随油藏埋深增加而增加的趋势(图 7a), 表明相当的 $C-O_1$ 原生油藏最初存在于深层, 这与烃源岩的空间分布相吻合。因此, 深层可能仍有寻找原生 $C-O_1$ 成因油藏的可能性。对轮南地区原油的混源定量计算结果表明, 该区原油也普遍混有 $C-O_1$ 成因原油, 初步估算的 $C-O_1$ 成

因液态油的混入量分布范围为 11%~70% (均值 36%) (图 7b), 小于塔中地区。塔中、塔北等周边地带油源相对贡献的变化, 表明源岩生烃中心的变迁和/或输导格架的差异。

4 混源成藏模式

塔中地区不同层系原油性质差异显著(李素梅等, 2008b), 因构造单元而异, 反映油气成藏地质条件对原油性质具有控制作用。I 号坡折带以轻质凝析油为主, 成熟度相对较高(李素梅等, 2008a)。主要为奥陶系碳酸盐岩储层, 连通性差, 油气运移取决于断裂、裂缝和溶蚀孔洞等发育情况(图 8a)。I 号坡折带油质总体好于内侧(如 TZ47-15 井区及中央断带)(李素梅等, 2008b), 反映 I 号构造带储层的强非均质性、I 号断裂对油气运移与聚集的控制作用。I 号构造带不同区块油气比与油气产量不尽相同, 进一步反映储层的强非均质性。多项油气运移示踪显示, 切割 I 号断层的转换断层在油气运移中也发挥了重要作用, 可充当多个油气垂向运移注入点(图 8)。TZ47-15 井区主要为稠油、正常黑油, 成熟度相对较低。奥陶系、石炭系和志留系原油性质极其相似, 表明上下层系油气成因相同、为统一的成藏体系(李素梅等, 2008b)。该井区原油具有明显的从西

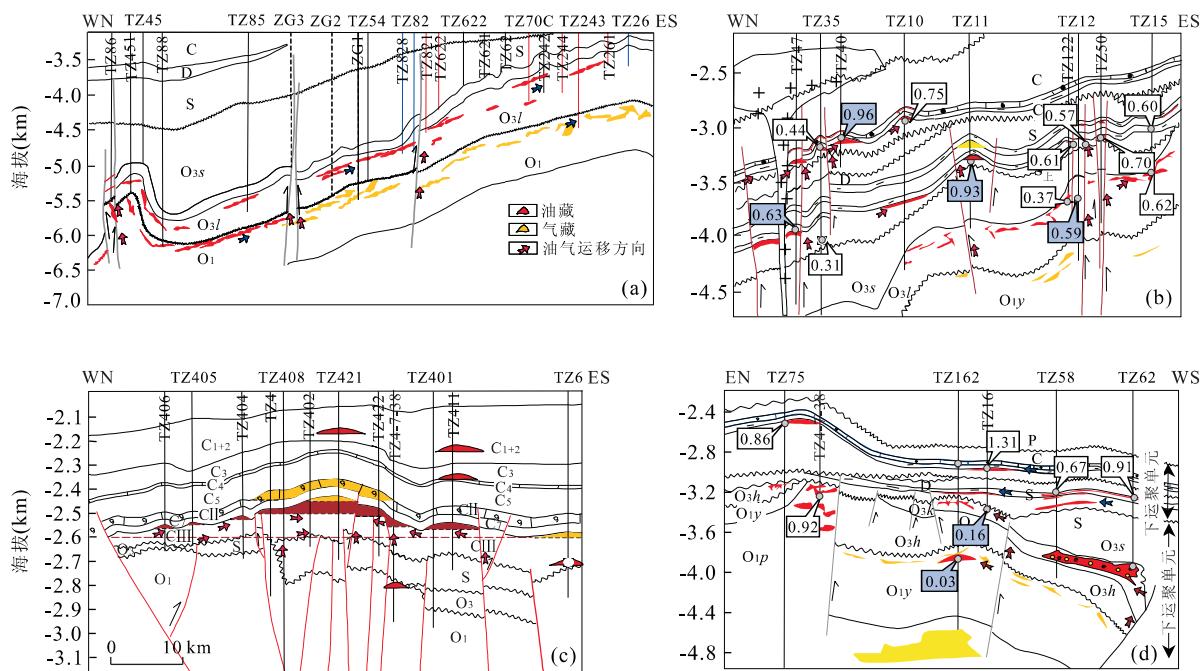


图 8 塔中隆起油气运移模式示意图

Fig. 8 Hydrocarbons migration patterns for the Tazhong oils

b, d 标注参数分别为三环/五环萜、 $C_{21}-C_{22}/C_{29}$ — 留烷

向东的运移效应(图 8b)(刘洛夫和康永尚,1998;陈元壮等,2004). 包裹体成分分析显示,TZ47-15 井区有多源、多期成藏特征(李素梅等,2009b),多期充注、调整混源机制明显.

TZ4 井区油气性质明显不同于邻区,具有高含硫芳烃特征(Li *et al.*, 2009),表明其与周边地区至少当前并非同一运聚成藏体系,油区范围内油气以垂向运移为主(图 8c),具有多期成藏、调整特征(杨楚鹏等,2008). TZ16 井区原油性质较为复杂,上构造层石炭、志留系原油性质不同于下构造层奥陶系(图 8d)(李素梅等,2008b),前者受晚期充注油气影响较明显. 根据烃类及非烃的分子示踪、原油性质的分析,可总结出塔中油区范围内原油存在以下几种运移模式(图 8):(1) I 号构造带分块垂向运移为主兼侧向运移模式;(2) 塔中 47-15 井区长距离侧向运移兼垂向运移模式;(3) 塔中 4 井区双向、垂向运移模式;(4) 塔中 16 井区双层(O 与 C-S) 分隔运移模式.

按照油气混源时间,塔里木海相油气混源成藏模式至少有以下几种:早期成藏后期调整的“次生调整型”混源模式、边运移边混合的“原生型”混源模式、同一油藏多期充注的“异源多期充注型”混源模式等,这 3 种模式可能贯穿于几乎全部的油气成藏过程,受油气成藏年代、优势运移通道、储层连通性、烃源岩生排烃期、构造活动时间与强度等多种因素控制.

5 结论

单体同位素、包裹体成分等精细油—油、油—岩对比表明,塔里木盆地塔中、轮南地区为广泛的寒武系一下奥陶统、中上奥陶统成因原油的混源油,而非先前认为的主要来自 C_1-O_1 或 O_{2+3} . 油气混含量高低不等,塔中 C_1-O_1 成因原油的混入量(11%~100%,均值 45%,31 个样品)高于轮南,轮南(11%~70%,均值 36%,12 个样品)高于塔河地区. 塔里木盆地油气高比例混源表明深层油气勘探潜力巨大. 塔中古 7、8 等下奥陶统工业凝析油气井的成功钻探,证实了这种可能性.

从定量角度进行精细油源对比是主力烃源岩确定与油气资源评价的关键与依据. 复杂油气区油源研究,必须建立在对油气成藏过程、烃类演化特征充分了解的基础上,采用多馏分、多参数综合研究途径. 不同油源对比指标的不一致暗示油气的混源特征.

塔里木盆地油气混源模式多样,包括“次生调整型”混源、“异源多期充注型”混源、发生于运移途径中“原生型”混源等多种形式. 鉴于塔里木盆地储层较强的非均质性和油气的广泛混源,构造活动中的幕式充注、快速混源成藏可能是塔中碳酸盐岩油气藏混源油形成的主要机制.

致谢: 特别感谢澳大利亚 CSIRO 刘可禹博士帮助测试包裹体同位素;诚挚感谢中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院李梅、卢玉红、张海祖博士协助样品的采集;衷心感谢长江大学赵红、陈祖林协助完成大量实验工作.

References

- Cai, C. F., Li, K. K., Ma, A. L., et al., 2009. Distinguishing Cambrian from Upper Ordovician source rocks: evidence from sulfur isotopes and biomarkers in the Tarim basin. *Organic Geochemistry*, 40(7): 755–768. doi: 10.1016/j.orggeochem.2009.04.008
- Cai, C. F., Li, K. K., Wu, G. H., et al., 2007. Sulfur isotopes as markers of oil-source correlation and thermochemical sulphate reduction in central Tarim. In: Abstracts of International Meeting of Organic Geochemistry, September, 19–24, O36, Torquay, UK, 297–298.
- Chen, L. X., Yang, H. J., Wu, G. H., et al., 2008. Characteristics of the Ordovician reef-shoal reservoir in Tazhong No. 1 slope-break zone, Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(3): 327–330 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Z., Liu, L. F., Chen, L. X., et al., 2004. Hydrocarbon migration of Silurian paleo-pools in Tazhong and Tabei areas of Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 473–482 (in Chinese with English abstract).
- England, W. A., Mackenzie, A. S., 1989. Some aspects of the organic geochemistry of petroleum fluids. *Geologische Rundschau*, 78(1): 291–303. doi: 10.1007/BF01988365
- Graham, S. A., Brassell, S., Carroll, A. R., et al., 1990. Characteristics of selected petroleum source rocks, Xianjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74(4): 493–512. doi: 10.1306/44B4C26AF—170A—11D7—8645000102C1865D
- Jiang, C. Q., Li, M. W., Osadetz, K. G., et al., 2001. Bakken/Madison petroleum systems in the Canadian Williston basin. Part 2: molecular markers diagnostic of Bakken and Lodgepole source rocks. *Organic Geochemistry*, 32(9): 1037–1054. doi: 10.1016/S0146–6380

- (01)00079—1
- Li, S. M., Li, M. W., Pang, X. Q., et al., 2003. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay basin—part 1: source rock characterization. *Organic Geochemistry*, 34(3): 389—412. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00210-3
- Li, S. M., Li, M. W., Pang, X. Q., et al., 2009. Origin of crude oils with unusually high dibenzothiophene concentrations in the Tazhong uplift, Tarim basin. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(1): 60. doi: 10.1016/j.gexplo.2008.12.053
- Li, S. M., Pang, X. Q., Jin, Z. J., 2002. Distribution and significance of steroids in Bamianhe oilfield, East China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 711—717 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2008a. Geochemical characteristics and implication of high thermal maturity oils in Tazhong-I faulted slope break zone. *Oil & Gas Geology*, 29(2): 210—216 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2008b. Characteristics and genetic type of the oils in the Tazhong uplift. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 635—642 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2009a. MCI analysis and its significance of palaeozoic reservoir in Tarim central uplift. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(1): 34—41 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2009b. Approaches and techniques for quantitative predication of mixed oils. *Geological Science and Technology Information*, 28(1): 75—81 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Jin, Z. J., et al., 2010. Mixed-source oils from subtle pools in the Dongying south slope of Bohai Bay basin: insight from biomarkers and compound specific isotope analyses. *Marine and petroleum Geology*. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.04.004
- Liang, D. G., Zhang, S. C., Zhang, B. M., et al., 2000. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim basin. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 534—547 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Kang, Y. S., 1998. Investigation on secondary migration of oils in central Tarim, Tarim basin using pyrolytic nitrogen compounds. *Geochimica*, 27(5): 475—482 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. G., Xiao, Z. Y., Xu, S. P., et al., 2004. Aryl-isoprenoids in crude oil and its implication in geological exploration. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(2): 215—218 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. G., Xu, S. P., Lu, H., et al., 2003. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim basin, NW China: implications from aryl isoprenoids in crude oils. *Organic Geochemistry*, 34(4): 629—634. doi: 10.1016/S0146-6380(03)00063-9
- Tang, Y. J., Wang, T. G., 2007. Molecular fossils and oil-source rock correlations of Cambrian heavy oil in Tadong 2 well in Tarim basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 31(6): 18—22 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. G., Wang, T. G., Zhang, W. B., et al., 2006. Molecular geochemistry and classifications of genetic types of petroleum from Tahe oilfield of the northern Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6): 901—909 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. M., Xiao, Z. Y., 2004. A review on the source rocks for the marine oils in the Tarim basin. *Chinese Science Bulletin*, 49(Suppl. I): 1—8 (in Chinese).
- Xiao, Z. Y., Huang, G. H., Lu, Y. H., et al., 2004. Origin of oils from well Tadong 2 in Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(Suppl.): 66—72 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Z. Y., Lu, Y. H., Sang, H., et al., 2005. A typical Cambrian oil reservoir: origin of oil reservoir in well TZ62, Tarim basin. *Geochimica*, 34(2): 155—160 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. P., Zhang, B. M., Wang, F. Y., et al., 2008. Reassessment of the Carboniferous oil pooling in Tz-4 field, the Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 29(2): 181—188 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Hanson, A. D., Moldowan, J. M., et al., 2000a. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 31(4): 273—286. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00003-6
- Zhang, S. C., Liang, D. G., Li, M. W., et al., 2002. Molecular fossils and oil-source rock correlations in Tarim basin, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 47(suppl.): 16—23 (in Chinese).
- Zhang, S. C., Liang, D. G., Zhang, B. M., et al., 2004a. Marine petroleum formation in Tarim basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 270—340 (in Chinese).
- Zhang, S. C., Wang, Z. M., Wang, F. Y., et al., 2004b. Oil accumulation history in Tadong 2 oil reservoir in Tarim basin, NW China—a case study of oil stability and

- cracking. *Petroleum Exploration and Development*, 31(6): 25—31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Wang, F. Y., et al., 2000b. Middle–Upper Ordovician: the main source of the oils in the Tarim basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(1–2): 16—22 (in Chinese).
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Wang, F. Y., et al., 2001. Two main sets of marine source rocks in Tarim basin—part I: characteristics of organic matter, developing environment and controlling factors. *Advance in Natural Science*, 11(3): 261—268 (in Chinese).
- Zhang, W. Z., Pei, G., Guan, D. S., 1992. An investigation of compound specific isotope of light hydrocarbons in Palaeozoic and Mesozoic oils in Ordos basin. *Chinese Science Bulletin*, 3: 248—251 (in Chinese).
- Zhao, M. J., Huang, D. F., 1995. Preliminary discussion on carbon isotopic distribution pattern of individual hydrocarbons from crude oil and its relationship to oil-forming environment. *Geochimica*, 24(3): 254—260 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., Wang, Z. M., Pan, W. Q., et al., 2008. Lower Palaeozoic source rocks in Manjiaer sag, Tarim basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(4): 417—423 (in Chinese with English abstract).
- 梁狄刚,张水昌,张宝民,等,2000.从塔里木盆地看中国海相生油问题.地学前缘,7(4): 534—547.
- 刘洛夫,康永尚,1998.运用原油吡咯类含氮化合物研究塔里木盆地塔中地区石油的二次运移.地球化学,27(5): 475—482.
- 孙永革,肖中尧,徐世平,等,2004.塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义.新疆石油地质,25(2): 215—218.
- 唐友军,王铁冠,2007.塔里木盆地塔东2井寒武系稠油分子化石与油源分析.中国石油大学学报(自然科学版),31(6): 18—22.
- 王传刚,王铁冠,张卫彪,等,2006.塔里木盆地北部塔河油田原油分子地球化学特征及成因类型划分.沉积学报,24(6): 901—909.
- 王招明,肖中尧,2004.塔里木盆地海相原油的油源问题的综合述评.科学通报,49(增刊Ⅰ): 1—8.
- 肖中尧,黄光辉,卢玉红,等,2004.塔里木盆地塔东2井原油成因分析.沉积学报,22(增刊): 66—72.
- 肖中尧,卢玉红,桑红,等,2005.一个典型的寒武系油藏:塔里木盆地塔中62井油藏成因分析.地球化学,34(2): 155—160.
- 杨楚鹏,张宝民,王飞宇,等,2008.塔里木盆地塔中4石炭系油藏成藏过程再认识.石油与天然气地质,29(2): 181—188.
- 张水昌,梁狄刚,黎茂稳,等,2002.分子化石与塔里木盆地油源对比.科学通报,47(增刊): 16—23.
- 张水昌,梁狄刚,张宝民,等,2004a.塔里木盆地海相油气的生成.北京:石油工业出版社,270—340.
- 张水昌,王招明,王飞宇,等,2004b.塔里木盆地塔东2油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究.石油勘探与开发,31(6): 25—31.
- 张水昌,张宝民,王飞宇,等,2000b.中—上奥陶统:塔里木盆地的主要油源层.海相油气地质,5(1—2): 16—22.
- 张水昌,张宝民,王飞宇,等,2001.塔里木盆地两套海相有效烃源层—I.有机质性质、发育环境及控制因素.自然科学进展,11(3): 261—268.
- 张文正,裴戈,关德师,1992.鄂尔多斯盆地中、古生界原油轻烃单体系列碳同位素研究.科学通报,3: 248—251.
- 赵孟军,黄第藩,1995.初论原油单体烃系列碳同位素分布特征与生油环境之间的关系.地球化学,24(3): 254—260.
- 赵孟军,王招明,潘文庆,等,2008.塔里木盆地满加尔凹陷下古生界烃源岩的再认识.石油勘探与开发,35(4): 417—423.

附中文参考文献

- 陈利新,杨海军,邬光辉,等,2008.塔中I号坡折带奥陶系礁滩体油气藏的成藏特点.新疆石油地质,29(3): 327—330.
- 陈元壮,刘洛夫,陈利新,等,2004.塔里木盆地塔中、塔北地区志留系古油藏的油气运移.地球科学——中国地质大学学报,29(4): 473—482.
- 李素梅,庞雄奇,金之钧,2002.八面河地区原油、烃源岩中甾类化合物的分布特征及其应用.地球科学——中国地质大学学报,27(6): 711—717.
- 李素梅,庞雄奇,杨海军,等,2008a.塔中I号坡折带高熟油气地球化学特征及其意义.石油与天然气地质,29(2): 210—216.
- 李素梅,庞雄奇,杨海军,等,2008b.塔中隆起原油特征与成因类型.地球科学——中国地质大学学报,33(5): 635—642.
- 李素梅,庞雄奇,杨海军,等,2009a.塔中古生界储层中流体包裹体成分分析及其意义.矿物岩石地球化学通报,28(1): 34—41.
- 李素梅,庞雄奇,杨海军,2009b.混源油气定量研究思路与方