



# 鄂尔多斯盆地西缘石炭系羊虎沟组油砂的发现与油源分析

席胜利<sup>1,2)</sup>, 黄军平<sup>3)</sup>, 张才利<sup>2,4)</sup>, 李相博<sup>3)</sup>, 井向辉<sup>2,4)</sup>, 林俊峰<sup>5)</sup>, 郭玮<sup>2,4)</sup>, 张艳<sup>6)</sup>

- 1) 中国石油长庆油田公司, 陕西西安, 710018;
- 2) 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安, 710018;
- 3) 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州, 730020;
- 4) 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安, 710018;
- 5) 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作, 454003;
- 6) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

**内容提要:**为明确新近在鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井羊虎沟组发现的油砂地球化学特征及其油气来源, 利用气相色谱-质谱联用技术(GC/MS)和同位素质谱技术对 YT2 井油砂中饱和烃生物标志物和抽提物及族组分的碳同位素进行了分析。分析结果表明:YT2 井油砂中正构烷烃系列化合物呈前峰型, 主峰碳为  $nC_{17}$ ;  $Pr/Ph$ 、 $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  值分别为 0.90、0.30 和 0.46, 指示了其源岩形成于偏还原的沉积环境; 萜烷系列化合物中, 三环萜烷系列相对含量丰富, 以  $C_{23}$  三环萜烷为主峰, 呈近似正态分布特征; 甾烷系列化合物以  $C_{27}$  规则甾烷为优势; 具有低的藿烷/甾烷比值, 反映其有机质来源以低等生物藻类为主; 饱和烃和芳烃馏分的碳同位素分别为  $-31.5\text{‰}$  和  $-30.5\text{‰}$ 。生物标志化合物和稳定碳同位素分析表明 YT2 井羊虎沟组油砂具有明显的海相原油特征, 意味着在鄂尔多斯盆地西缘首次发现了海相成因原油。通过与奥陶系平凉组、石炭系羊虎沟组、三叠系延长组和侏罗系延安组烃源岩生物标志物和碳同位素特征的系统对比分析, 认为该油砂可能来源于平凉组海相烃源岩。

**关键词:**鄂尔多斯盆地; 石炭系; 油砂; 海相; 生物标志物; 碳同位素

鄂尔多斯盆地蕴藏着丰富的油气资源, 是我国重要的油气生产基地, 盆地面积约为  $25 \times 10^4 \text{ km}^2$  (Deng Xiuqin et al., 2011) (图 1)。目前已发现的油气资源中, 天然气主要分布在上、下古生界中, 而原油主要分布在中生界侏罗系和三叠系中 (Cong Lin et al., 2010), 且已发现的原油均为陆相原油, 迄今为止尚未在鄂尔多斯盆地中发现海相原油 (Yang Hua et al., 2016)。鄂尔多斯盆地西部古生界发育有奥陶系平凉组海相烃源岩 (Chen Mengjin et al., 2007)、石炭系羊虎沟组海陆过渡相烃源岩 (Wang Chongjing et al., 2014)、三叠系延长组烃源岩 (王毅等, 2016) 和侏罗系延安组烃源岩 (Yan

Jinpeng et al., 2013), 这四套烃源岩均具有较好的油气生成潜力。银探 2 (YT2) 井是该区近期钻探的一口探井, 在上古生界石炭系羊虎沟组首次发现有油砂的存在 (图 2)。目前还未见文献对鄂尔多斯盆地西缘油砂进行过报道。本文通过对 YT2 井石炭系油砂中所含生物标志化合物分布与碳同位素组成的精细剖析, 探讨了其成因类型及其可能来源, 并指出了鄂尔多斯盆地西缘的古生界可能是一个值得关注的原油勘探领域。

## 1 样品及方法

油砂样品 1 个, 来自于鄂尔多斯盆地西缘 YT2

注: 本文为国家油气重大科技专项 (编号 2017ZX05001-003、2017ZX05001-005); 国家自然科学基金项目 (编号 41772099); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (编号 2017CFA027) 联合资助成果。

收稿日期: 2020-10-05; 改回日期: 2021-03-02; 网络发表日期: 2021-10-09; 责任编辑: 邱楠生; 责任编辑: 周健。

作者简介: 席胜利, 男, 1965 年生。博士, 教授级高级工程师, 主要从事石油与天然气地质综合研究。E-mail: xsl\_cq@petrochina.com.cn。  
通讯作者: 黄军平, 男, 1983 年生。高级工程师, 主要从事石油地质综合研究和有机地球化学研究工作。E-mail: cnhjp2007@163.com。

**引用本文:** 席胜利, 黄军平, 张才利, 李相博, 井向辉, 林俊峰, 郭玮, 张艳. 2022. 鄂尔多斯盆地西缘石炭系羊虎沟组油砂的发现与油源分析. 地质学报, 96(3): 1041~1052, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021095.  
Xi Shengli, Huang Junping, Zhang Caili, Li Xiangbo, Jing Xianghui, Lin Junfeng, Guo Wei, Zhang Yan. 2022. Discovery of oil sands in the Yanghugou Formation in the western margin of Ordos basin and its source analysis. Acta Geologica Sinica, 96(3): 1041~1052.

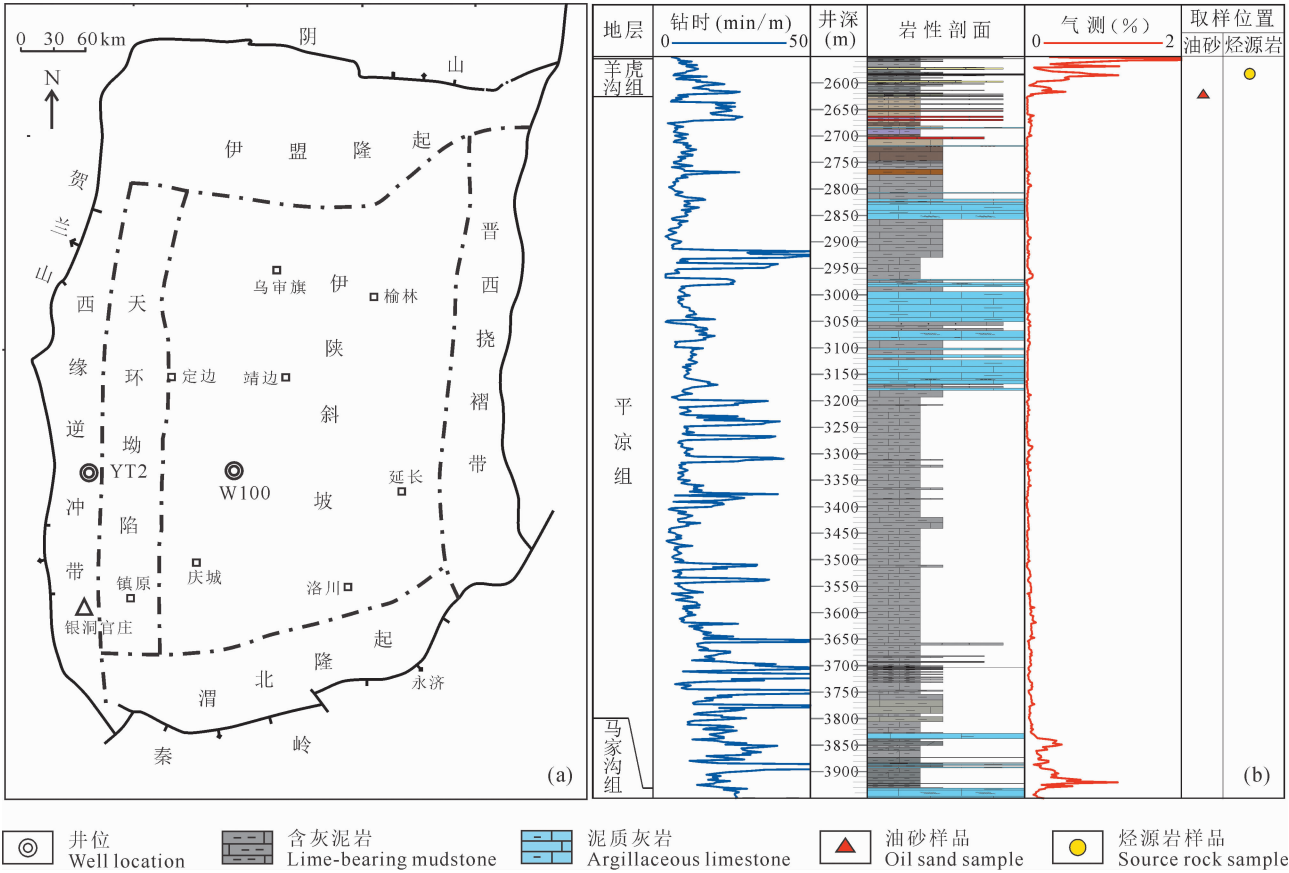


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分(a)及 YT2 井柱状图(b)

Fig. 1 Division scheme of tectonic units in the Ordos basin (a) and the profile of well YT2 (b)



图 2 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井石炭系岩芯(a)和油砂(b)照片

Fig. 2 Photos of core (a) and oil sand (b) in well YT2 in the western margin of the Ordos basin

井羊虎沟组;平凉组烃源岩样品 6 个,取自 YT2 井西南部的银洞官庄剖面,羊虎沟组烃源岩样品 3 个,取自 YT2 井,延长组烃源岩样品 7 个,取自午 100 井。首先,对烃源岩、油砂中的可溶有机质进行抽提,而后采用硅胶/氧化铝柱色谱法进行族组分分离,详细的实验流程见 Bao Jianping et al. (2018)。然后对饱和烃进行色谱-质谱分析,样品的分析测试在中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室

完成。

饱和烃色谱质谱分析条件:仪器为 Agilent7890-5975c 气相色谱质谱联用仪,色谱柱为 HP-5ms 弹性石英毛细柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),升温程序:50℃恒温 1 min,20℃/min 升温至 120℃,以 4℃/min 升至 250℃,再以 3℃/min 升至 310℃保持 30 min。进样口温度 300℃,载气为氦气,载气流速为 1 mL/min。检测方式为 SIM,电离

能量为 70 eV。同位素质谱分析使用仪器为 EA-Precision 元素分析-稳定同位素质谱仪,具体实验方法见 Song Li et al. (2019),在中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室完成。

2 油砂地球化学特征

2.1 正构烷烃与类异戊二烯烷烃分布特征

如图 3 所示,YT2 井油砂中正构烷烃系列分布完整;碳数介于  $C_{11} \sim C_{35}$  之间,以  $nC_{17}$  为主峰,呈前峰型分布特征,原油中的正构烷烃系列轻质组分优势明显,其  $nC_{21-}/nC_{22+}$  值约为 2.21,TAR( $nC_{27} + nC_{29} + nC_{31}$ )/( $nC_{15} + nC_{17} + nC_{19}$ )比值约为 0.17,反映油砂的有机质来源以低等水生生物为主,陆源高等植物的贡献有限(Bourbonniere et al., 1996; Peters et al., 2005)。油砂的正构烷烃系列中低碳数  $nC_{15}$ 、 $nC_{17}$ 、 $nC_{19}$  含量丰富,具有一定的奇碳优势,这种情况在南堡凹陷原油(Lu Hong et al., 1998)、柴达木盆地古近系烃源岩(Zhu Yangming et al., 2003)和金湖凹陷古近系烃源岩(Song Ning et al., 2007)也有发现,被认为与特殊的低等生物藻类有关。

在姥鲨烷、植烷系列化合物中,油砂的 Pr/Ph 比值为 0.90,指示 YT2 井油砂的烃源岩沉积时为偏还原的沉积条件。此外,油砂的 Pr/ $nC_{17}$  和 Ph/ $nC_{18}$  值分别为 0.30 和 0.46,表明 YT2 井油砂具有明显的海相原油的特点(图 4)。

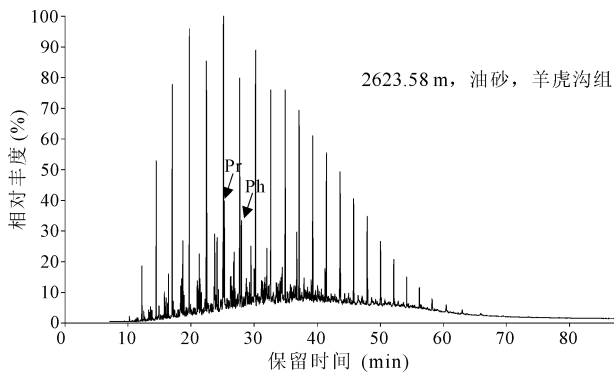


图 3 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂链烷烃系列分布(TIC)  
Fig. 3 Distribution of chain alkanes of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

2.2 二环倍半萜系列化合物

YT2 井油砂中二环倍半萜系列化合物的分布特征如图 5 所示,该系列化合物以  $C_{16}$  升补身烷为优势,重排化合物含量较低,而这种分布特征明显不同于陆源植物来源的原油,前人对陆相原油的研究中

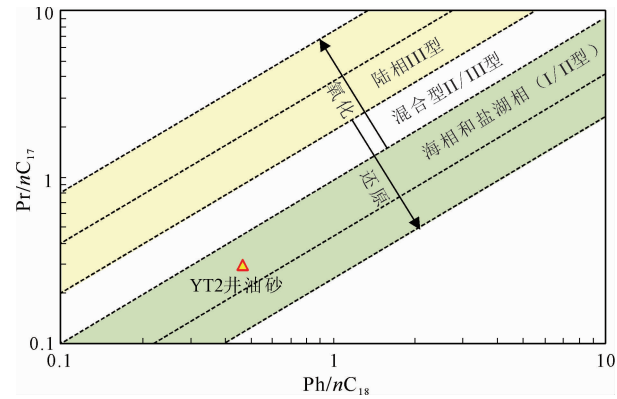


图 4 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂 Pr/ $nC_{17}$  与 Ph/ $nC_{18}$  相关图(图版据 Zhao Jingzhou et al., 2020)  
Fig. 4 The plots of Pr/ $nC_{17}$  and Ph/ $nC_{18}$  of oil sand in well YT2 in the western margin of the Ordos basin(after Zhao Jingzhou et al., 2020)

发现陆相原油普遍具有较高含量的重排补身烷(张敏等, 1997; Zhang Wanfeng, 2015; Ji et al., 2016)。重排补身烷的形成机理类似于重排甾烷和重排藿烷(张敏等, 1997; Zhang Chunming et al., 2002; Zhang et al., 2004)。因此补身烷、藿烷、甾烷对应的重排化合物可能具有相似的沉积环境指示意义。如塔里木盆地高含量的重排藿烷被认为是在弱氧化沉积环境和黏土矿物催化作用下形成的(Zhao Mengjun et al., 2001)。因此,YT2 井油砂可能形成于偏还原的海相沉积环境。

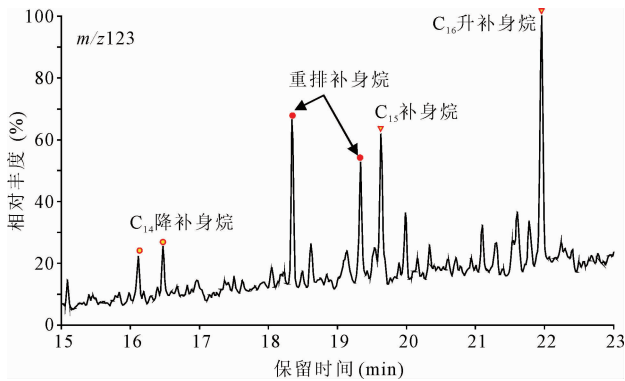


图 5 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂二环倍半萜系列化合物  
Fig. 5 Distributions of bicyclic sesquiterpenoids of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

2.3 萜烷系列分布与组成

YT2 井油砂中的  $C_{19-26}$  三环萜烷系列呈现以  $C_{23}$  为主峰的近正态分布,明显不同于煤系烃源岩的分布特征,同时  $C_{24}$  四环萜烷的相对丰度比  $C_{26}$  三环萜烷低(图 6),其  $C_{24}$  Te/ $C_{26}$  TT 值约为 0.33,显示出咸水湖相或海相原油的特征(Bao Jianping et al.,

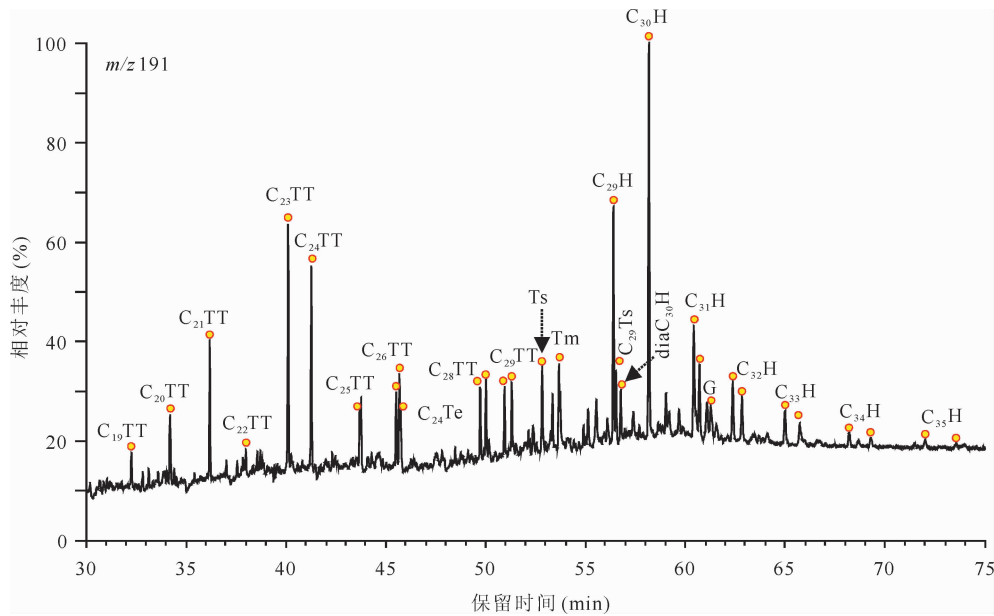


图 6 YT2 井油砂饱和烃  $m/z$  191 质量色谱图

Fig. 6 Mass chromatograms of  $m/z$  191 of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

2017)。此外,基于 Xiao Hong et al. (2019)依据  $C_{19+20}$  TT、 $C_{21}$  TT、 $C_{23}$  TT 相对含量建立的图版, YT2 井油砂也同样显示出咸水湖相或海相原油的特征(图 7)。

YT2 井中常规  $C_{27-35}$  藿烷系列占绝对优势,而新藿烷(Ts 和  $C_{29}$  Ts)和重排藿烷( $diaC_{30}$  H)含量较低,其  $C_{29}$  Ts/ $C_{29}$  H 比值为 0.33,  $diaC_{30}$  H/ $C_{30}$  H 比值为 0.15。而新藿烷和重排藿烷的形成需要弱氧化沉积-成岩条件和黏土矿物的催化作用(Wang Chunjiang et al., 2000; Peters et al, 2005; Bao Jianping et al., 2017)。因此推测, YT2 井油砂中这类标志物的含量偏低意味着其烃源岩可能形成于偏还原的沉积环境。

对于陆相烃源岩或原油来说,如渤中凹陷湖相烃源岩的  $C_{23}$  三环萜烷与  $C_{30}$  藿烷的比值为 0.01~0.29,平均为 0.05(Hao et al., 2011);南堡凹陷原油三环萜烷/五环萜烷的比值为 0.03~0.39,平均为 0.11(Li Sumei et al., 2008);鄂尔多斯盆地陇东西峰地区三叠系原油三环萜烷/藿烷的比值为 0.06~0.16,平均为 0.10(Ji Limin, 2005);即使达到高成熟阶段的库车凹陷三叠系黄山组该比值也仅有 0.26(Liu Hongxing et al., 2018)。对于海相烃源岩或原油来说,如四川盆地海相烃源岩中三环萜烷/五环萜烷的比值为 0.3~1.42,平均为 0.72(肖玉亮, 2016);阿巴拉契亚盆地的泥盆纪海相页岩中三环萜烷/五环萜烷比值为 0.28~2.38,平均为 0.76,

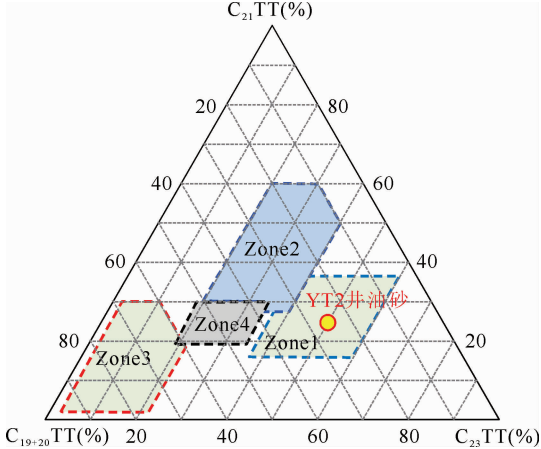


图 7 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂三环萜烷系列化合物分布特征(据 Xiao Hong et al., 2019)

Fig. 7 Distribution of tricyclic terpanes of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

(after Xiao Hong et al., 2019)

Zone 1—海相/咸水湖相烃源岩和原油; Zone 2—淡水湖相烃源岩和原油; Zone 3—沼泽相烃源岩和原油; Zone 4—河流/三角洲相烃源岩和原油

Zone 1—Marine/saline lacustrine source rocks and crude oil; Zone 2—freshwater lacustrine source rocks and crude oil; Zone 3—swamp facies source rocks and crude oil; Zone 4—fluvial / delta source rocks and crude oil

即使对于镜质组反射率小于 0.6% 的样品,其三环萜烷/五环萜烷比值平均也有 0.42(Hackley et al., 2013),这种差异足以对海相和陆相的烃源岩或原油加以区分。YT2 井油砂中三环萜烷/藿烷的比值为

0.67,此外油砂中还发现有比较丰富的长链  $C_{28}$ 、 $C_{29}$  三环萜烷(图 6),而丰富的长链三环萜烷含量一般出现在咸水湖相或海相烃源岩或原油中(Shi Yang et al., 2010; Jiang Lian et al., 2015; Tao et al., 2015),这指示 YT2 井油砂可能为海相来源。

伽马蜡烷在烃源岩和原油中普遍存在,但是高丰度的伽马蜡烷常用于指示烃源岩沉积时的水体分层环境(Sinninghe et al., 1995),而这种分层水体通常是由高盐度所致,因此高含量的伽马蜡烷指示相关有机质沉积时的高盐度、强还原环境,且伽马蜡烷指数( $Ga/C_{30}H$ ,伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷)越高,反映的古盐度也越高(Fu et al., 1990; Duan Yi et al., 2004; Peters et al., 2005)。虽然高丰度的伽马蜡烷常用来反映高盐的沉积环境,但是高盐环境并不总是出现高伽马蜡烷(Moldowan et al., 1985),如塔里木盆地奥陶系来源的海相原油就表现为低伽马蜡烷含量(Bao Jianping et al., 2012)。YT2 井油砂的伽马蜡烷指数为 0.13,并不能据此判断其烃源岩的沉积环境是海相还是非海相,还需根据其他生标特征进行深入分析。

2.4 甾烷系列分布与组成

如图 8 所示,YT2 井油砂显示较高含量的孕甾烷和升孕甾烷,(孕甾烷+升孕甾烷)/ $\alpha\alpha\alpha C_{29}$  甾烷值为 1.15,高含量的孕甾烷和升孕甾烷指示低等水生生物对生源的贡献(Yin Wei et al., 2005; Wang Jie et al., 2009)。此外,有机质的热降解也

是产生高含量的孕甾烷和升孕甾烷的重要原因(Huang Difan et al., 1990),但研究表明 YT2 井油砂处于低熟—成熟阶段(见第三节),因此较高的孕甾烷和升孕甾烷含量应该是受有机质来源的控制,而非成熟度的影响。同时,YT2 井油砂具有明显的  $C_{27}$  规则甾烷优势(图 8),也说明了有机质来源以低等生物藻类为主(Volkman, 1986)。

重排甾烷是甾烷系列化合物的重要组成部分,研究认为酸性氧化环境有利于重排甾烯的形成,而重排甾烯进一步演化为重排甾烷(Peters et al., 2005; Tian Derui et al., 2019)。在对渤海湾盆地的研究中也发现,沙一段较低的  $C_{27}$  重排甾烷/ $C_{27}$  规则甾烷比值(平均 0.46)反映碱性还原环境,而东营组较高的  $C_{27}$  重排甾烷/ $C_{27}$  规则甾烷比值(平均 0.79)反映酸性氧化环境(Hao et al., 2011; Tian Derui et al., 2019)。

渤中坳陷的湖相烃源岩的 S/H 比值为 0.06~0.57,平均为 0.18(Hao et al., 2011),反映在陆相沉积中原核生物具有重要贡献。而高含量的甾烷以及高的 S/H 比值似乎主要来源于低等生物藻类,反映海相有机质的特征(Moldowan et al., 1985; Peters et al., 2005)。Zhu Yangming(1997)根据 H/S 比值和三环萜烷/藿烷比值之间的相关关系,将塔里木盆地海相原油和陆相原油进行了很好的划分,陆相原油具有明显较高的藿烷/甾烷(H/S)比值和较低的三环萜烷/藿烷比值,而海相原油则具有明

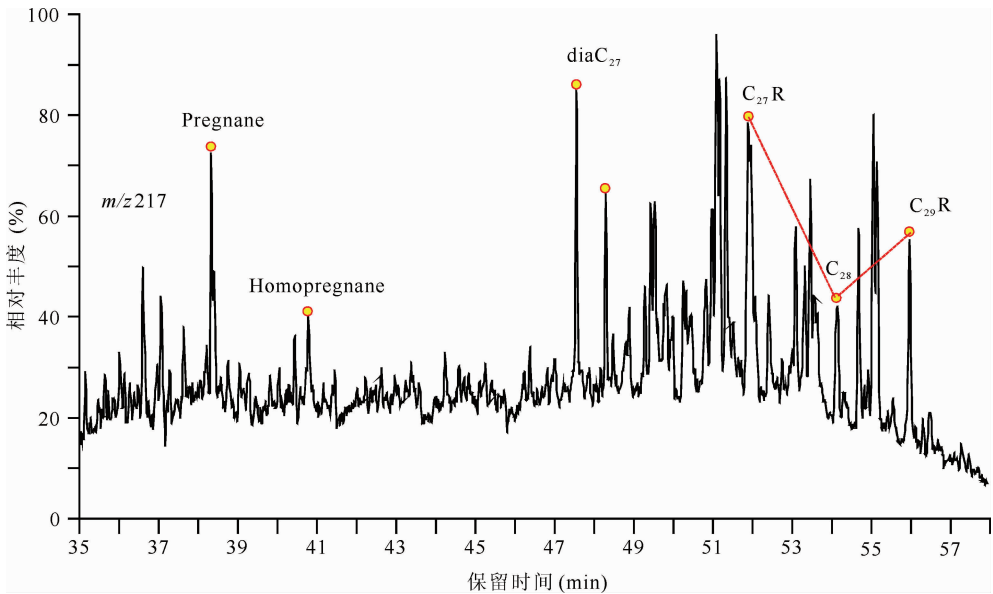


图 8 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井羊虎沟组油砂甾烷系列化合物分布特征  
Fig. 8 The distributions of steranes of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

显较低的藿烷/甾烷(H/S)比值和较高的三环萜烷/藿烷比值。YT2 井油砂的生标特征与塔里木盆地海相原油及平凉组海相烃源岩的特征相似,均具有低的藿烷/甾烷(H/S)比值和高的三环萜烷/藿烷比值,暗示 YT2 井油砂为海相成因(图 9)。

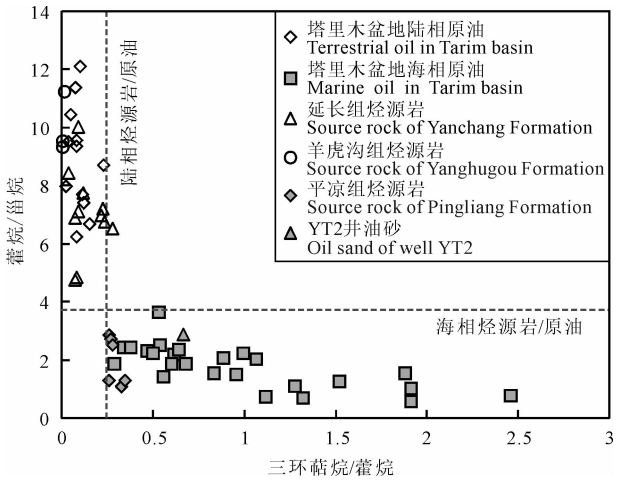


图 9 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂藿烷/甾烷、三环萜烷/藿烷分布图(塔里木盆地原油数据据 Zhu Yangming, 1997)

Fig. 9 The plots between hopane/sterane and tricyclic terpane/hopane of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin (crude oils data of Tarim basin from Zhu Yangming, 1997)

2.5 原油族组成碳同位素特征

YT2 井油砂样品及其族组成的碳同位素分布规律为:油砂抽提物为  $-31.2\text{‰}$ ;饱和烃为  $-31.5\text{‰}$ ;芳烃为  $-30.5\text{‰}$ ;非烃为  $-28.4\text{‰}$ ;沥青质为  $-29.0\text{‰}$ ,反映油砂及其族组成具有相对较轻的碳同位素,指示其母质来源以低等水生生物为主。图 10 是 YT2 井油砂饱和烃、芳烃碳同位素的分布图,图中的斜线( $\delta^{13}\text{C}_{\text{芳烃}} = 1.14 \delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}} + 5.46$ )由 Sofer(1984)根据大量原油饱和烃、芳烃碳同位素数据分析统计得出,可以区分海相原油与陆相原油。而 YT2 井油砂处于海相原油一侧,意味着该油砂可能为海相成因。

3 原油成熟度

Tm( $\text{C}_{27}17\alpha$ -三降藿烷)的稳定性比 Ts( $\text{C}_{27}18\alpha$ -三降藿烷)要差,随着成熟度的增加,Tm 会向 Ts 转化,因此 Ts/Tm 比值可以反映原油成熟度的相对高低(Moldowan et al., 1991; Peters et al., 2005, Li Mengru et al., 2018)。YT2 井油砂中 Ts/Tm 的比值 1.20,显示出成熟原油的特征。

前人研究证实,甾烷异构化参数可以有效反映

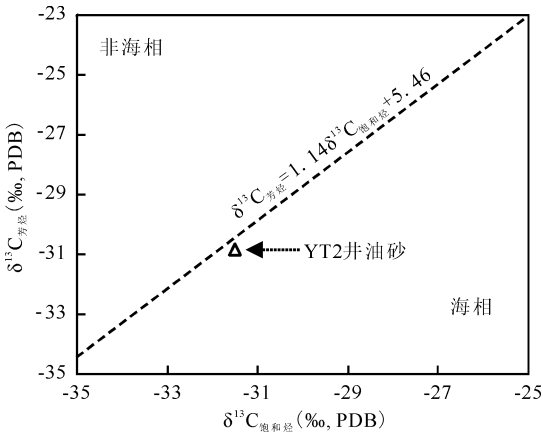


图 10 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂饱和烃、芳烃碳同位素分布图

Fig. 10 The plot of carbon isotope between saturated hydrocarbon and aromatic hydrocarbon of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

原油的成熟度(Peters et al., 2005)。Huang et al. (1990)研究认为, $\text{C}_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和  $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 在 0.25 以下为未成熟原油,0.25~0.4 为低成熟原油,大于 0.4 为成熟原油。王铁冠在总结国内多个地区低熟油的  $\text{C}_{29}$  甾烷异构化参数后也指出, $\text{C}_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和  $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 在小于 0.4 时为低熟原油(王铁冠等,1995; Peters et al., 2005)。YT2 井油砂的  $\text{C}_{29}20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 为 0.45, $\text{C}_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 为 0.56,属于成熟原油。

4 油源对比

4.1 烃源岩特征

鄂尔多斯盆地西缘主要发育平凉组海相烃源岩(Chen Mengjin et al., 2007)、羊虎沟组海陆过渡相烃源岩(Wang Chongjing et al., 2014)、延长组湖相烃源岩(王毅等,2016)和延安组煤系烃源岩(Yan Jinpeng et al., 2013)。鄂尔多斯盆地西缘马家沟组厚千余米,但其有机碳含量整体表现为有机质丰度低、有机质类型差的非烃源岩(Xu Huazheng et al., 2010)。鄂尔多斯盆地西缘银洞官庄剖面平凉组有机碳为 0.14%~0.85%,平均为 0.52%;有机质类型为 I~II<sub>1</sub>型;根据沥青反射率换算的等效镜质组反射率为 0.57%~0.94%,平均 0.80%,已经达到成熟阶段。平凉组海相烃源岩的有机碳丰度不高,因所取样品为露头样品,可能会因风化作用对有机碳丰度产生影响,前人在对岩芯样品的分析中发现,平凉组有机碳最高可以达到 1.20%(Chen Mengjin et al., 2006),具备较好的生烃能力(Sun

Yipu et al., 2008)。羊虎沟组烃源岩主要为海陆过渡相,有机碳平均为 3.25%,干酪根类型以陆生腐殖型有机质为主,局部有腐泥型有机质(Wang Chongjing et al., 2014)。延长组长 7 段烃源岩有机碳含量为 1.76%~6.28%,平均含量 3.92%,镜质组反射率为 0.5%~1.2%,有机质类型以 I 型和 II 型为主(Jiang Chengfu et al., 2013),具有较好的生气潜力。延安组烃源岩有机碳含量为 0.30%~3.05%,平均为 1.85%,有机质类型以 III 型为主,镜质组反射率为 0.81%左右(Han Zongyuan, 2012)。

#### 4.2 地球化学特征对比

根据对烃源岩可溶有机质的饱和烃色质分析,平凉组烃源岩具有如下特征:链烷烃系列化合物表现为前峰型,主峰碳为  $nC_{15} \sim nC_{19}$ ;Pr/Ph 比值为 0.39~2.25,平均 1.23,倍半萜系列以  $C_{16}$  升补身烷为主,重排补身烷含量较低;三环萜烷系列化合物以  $C_{21}$  或  $C_{23}$  三环萜烷为主峰,整体呈正态分布特征;五环三萜系列化合物呈正态分布,伽马蜡烷含量不高;甾烷系列化合物具有明显的  $C_{27}$  优势(图 11a)。羊虎沟组烃源岩具有如下特征:链烷烃系列化合物表现为双峰型,Pr/Ph 比值为 3.84~4.15,三环萜烷系列化合物以  $C_{19}$  或  $C_{20}$  为主峰,整体随碳数增加而降低,相对于五环三萜系列含量较低;五环三萜系列化合物呈正态分布,伽马蜡烷含量不高;甾烷系列化合物具有明显的  $C_{29}$  优势(图 11b)。延长组烃源岩链烷烃系列化合物表现为前峰型,主峰碳为  $nC_{16} \sim nC_{20}$ ;Pr/Ph 比值为 0.65~1.19,平均值为 1.00,重排补身烷含量较低;三环萜烷系列化合物以  $C_{23}$  三环萜烷为主峰,整体呈正态分布特征;五环三萜系列化合物呈正态分布,伽马蜡烷含量不高;除个别样品外,甾烷系列化合物具有明显的  $C_{27}$  优势(图 11c)。延安组烃源岩链烷烃系列化合物表现为后峰型,以  $nC_{25}$  为主峰,具有明显的姥鲛烷优势,三环萜烷系列化合物不发育,甾烷系列化合物具有明显的  $C_{29}$  优势(图 11d)(Wang et al., 1995)。

经过长期勘探,目前已经在鄂尔多斯盆地中侏罗统直罗组至上三叠统延长组发现大量工业油流。大量学者对中生界石油的来源进行了研究,一致认为中生界油源来源于长 4 段至长 9 段的湖相烃源岩(Yang Hua et al., 2016)。通过大量的饱和烃色质、同位素分析发现,盆地中不同地区、不同产层的原油普遍具有姥植均势、低伽马蜡烷的特征; $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾烷主要呈“V”字型分布特征(Yang Hua et

al., 2016);原油碳同位素组成偏轻,小于  $-30\%$  (Duan Yi et al., 2007; Hou Linhui et al., 2007; Yang Hua et al., 2010; Chen Lijun et al., 2014)。这些特征与 YT2 井油砂基本相同,仅仅据此很难加以区分。根据原油中重排藿烷的相对含量,前人将鄂尔多斯盆地中生界原油划分为三种类型,分别为 I 型低含量  $C_{30}$  重排藿烷原油、II 型中等含量  $C_{30}$  重排藿烷原油、III 型高含量  $C_{30}$  重排藿烷原油(Liu Guangdi et al., 2013; Yang Hua et al., 2016)。YT2 井油砂的  $C_{30}$  重排藿烷/ $C_{29}$  降藿烷比值与  $C_{30}$  重排藿烷/ $C_{30}$  藿烷比值分别为 0.23 和 0.13,对应于 I 型低重排藿烷原油。但是与 Yang Hua et al. (2016) 的 I 型原油相比, YT2 井油砂具有明显丰富的三环萜烷系列化合物。而与 Liu Guangdi et al. (2013) 的 I 型原油相比, I 型原油具有明显的 Ts 优势,而 YT2 井油砂 Ts、Tm 含量基本相等。此外,在已发表的所有鄂尔多斯中生界原油样品中均未发现有较高丰度的  $C_{28}$ 、 $C_{29}$  长链三环萜烷,而 YT2 井油砂中还含有丰富的  $C_{28}$ 、 $C_{29}$  长链三环萜烷(图 6),与塔里木盆地海相原油相似(图 12)。

对比发现, YT2 井油砂与平凉组海相烃源岩具有较好的相似性,而与石炭系羊虎沟组、三叠系延长组和侏罗系延安组烃源岩均存在明显差异。平凉组烃源岩与 YT2 井油砂的 Pr/Ph 值均较低,指示了还原环境;而羊虎沟组烃源岩的 Pr/Ph 比值平均为 4.01,指示了偏氧化的沉积环境,另外延安组也具有明显的姥鲛烷优势(Wang et al., 1995)。此外, YT2 井油砂具有丰富的三环萜烷系列化合物且以  $C_{23}$  TT 为主峰,整体呈正态分布,甾烷系列化合物均具有  $C_{27}$  规则甾烷优势(图 6);而羊虎沟组、延安组烃源岩的三环萜烷系列化合物含量较低,以  $C_{19}$  TT 为主峰;甾烷系列化合物均为  $C_{29}$  规则甾烷优势(图 11b、d)。从生物标志物谱图上看,似乎平凉组烃源岩、延长组烃源岩与 YT2 井油砂特征相似(图 6, 图 11a、c),但是平凉组烃源岩与 YT2 井油砂的藿烷与甾烷比值较低,分别为 1.91 和 2.86,而延长组烃源岩的比值明显较高,平均为 7.05(图 9)。同时,平凉组烃源岩干酪根与 YT2 井油砂还具有近似的碳同位素值,分别为  $-31.7\%$  和  $-31.2\%$ ;而羊虎沟组干酪根碳同位素为  $-23.0\%$ ,延安组干酪根碳同位素为  $-25.4\%$ (Wang et al., 1995),与油砂存在较大差异。因此推测 YT2 井油砂可能来源于平凉组海相烃源岩。

油源对比显示新发现的油砂与平凉组烃源岩特

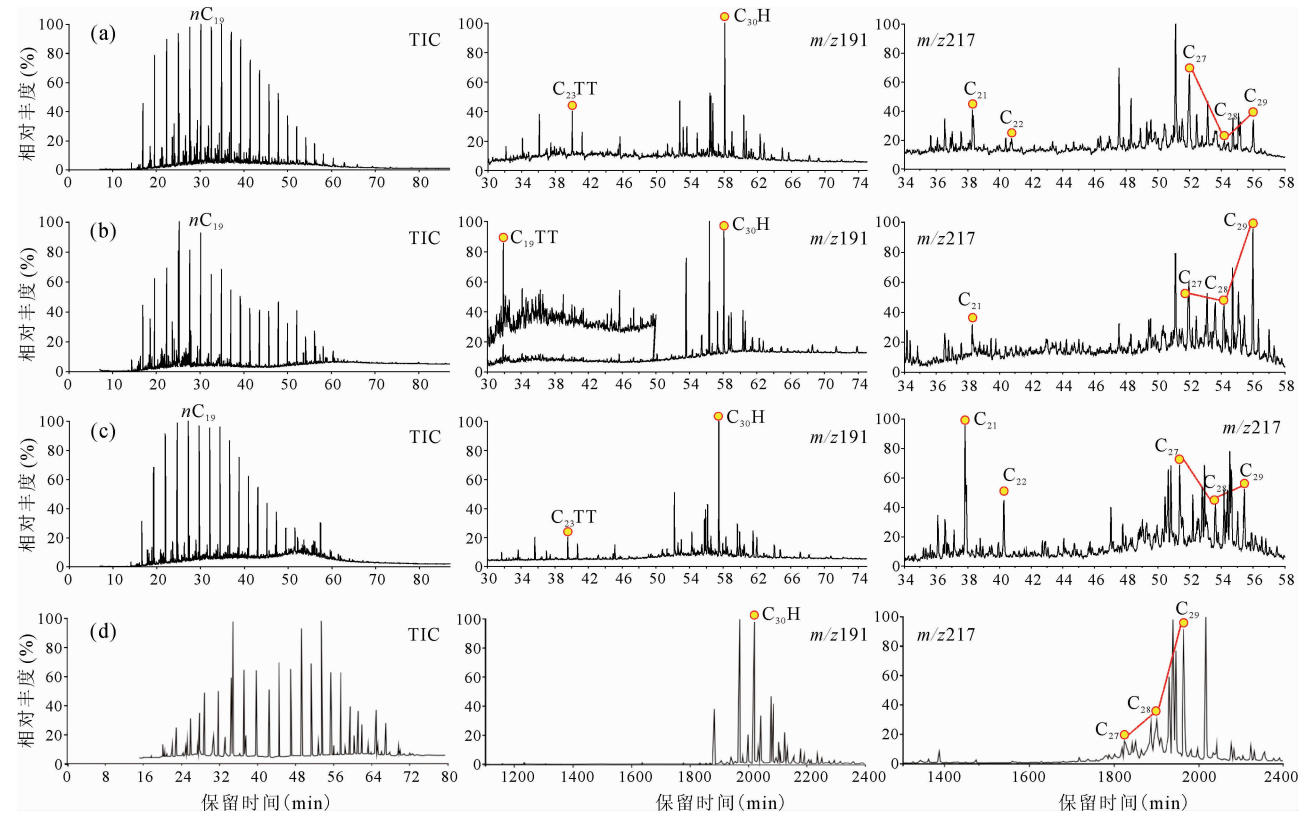


图 11 鄂尔多斯盆地西缘平凉组(a)、羊虎沟组(b)、延长组(c)和延安组(d,据 Wang et al. , 1995)烃源岩生物标志物分布特征  
Fig. 11 Distribution characteristics of biomarkers in source rocks of the Pingliang Formation (a), the Yanghugou Formation (b), the Yanchang Formation (c) and Yanan Formation (d, after Wang et al. , 1995) in western margin of the Ordos basin

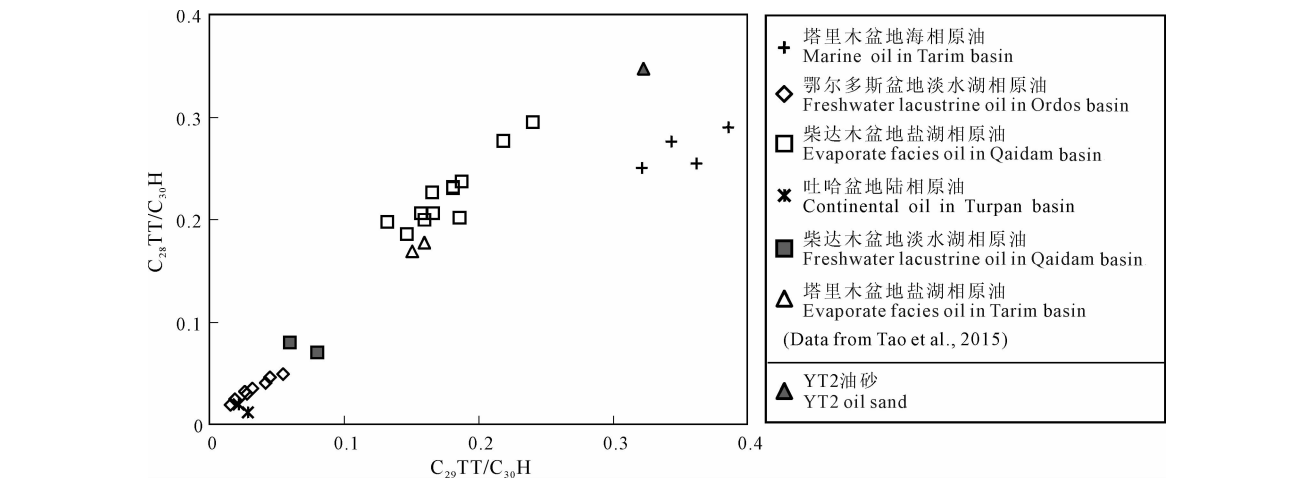


图 12 鄂尔多斯盆地西缘 YT2 井油砂  $C_{28} TT/C_{30} H$  与  $C_{29} TT/C_{30} H$  交汇图  
Fig. 12 Cross plot of  $C_{28} TT/C_{30} H$  vs  $C_{29} TT/C_{30} H$  of oil sand in well YT2 in the western margin of Ordos basin

征最为相似。研究表明,鄂尔多斯盆地西缘广泛分布上奥陶统平凉组烃源岩,泥质烃源岩累计厚度为 100~200 m(Du Jinhu et al. , 2019),有机碳丰度最高可以达到 4.55%,平均 0.58%(Guo Yanru et al. , 2016),有机质类型为腐泥型(I 型)(Ni Chunhua et al. , 2011),等效镜质组反射率为

0.94%~1.24%(Zhu Jianhui et al. , 2011),刚好处于生油窗范围内,具备大量生油的条件。平凉组与羊虎沟组直接接触(图 1),上覆羊虎沟组—太原组泥岩盖层封闭能力好(Ma Xiaogang, 2012),有利于就近聚集成藏。因此,鄂尔多斯盆地西缘的古生界可能是一个值得关注的原油勘探领域。

5 结论

(1)YT2 井油砂饱和烃中正构烷烃系列具有前峰型分布特征,较低的 Pr/Ph 比值,丰富的三环萜烷系列化合物以 C<sub>23</sub> TT 为主峰,甾烷系列化合物中 C<sub>27</sub> 规则甾烷具有明显优势,较低的藿烷/甾烷比值,结合饱和烃、芳烃的碳同位素特征,综合分析认为 YT2 井油砂为海相成因。

(2)通过生物标志物、碳同位素分析, YT2 井油砂与平凉组海相页岩的特征相似,均具较低的 Pr/Ph 比值,低的藿烷/甾烷比值,均含有丰富的三环萜烷含量和相似的分布特征,甾烷系列化合物均以 C<sub>27</sub> 规则甾烷为优势,而与羊虎沟组、延长组和侏罗系烃源岩存在明显差异,推测其可能来源于平凉组海相烃源岩。

References

Bao Jianping, Kong Jie, Zhu Cuishan, Zhang Qiucha, Li Mei, Lu Yuhong, Zhang Wenyan. 2012. Geochemical characteristics of a novel kind of marine oils from Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(3): 580~587 (in Chinese with English abstract).

Bao Jianping, He Dan, Zhu Cuishan, Liu Ruizhang, Wang Wenjun, Liu Hongyu. 2017. Geochemical characteristics and origin of a crude oil from well Xuwen X3 in the Maichen Sag, Beibuwan basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 28(5): 665~676 (in Chinese with English abstract).

Bao Jianping, Wu Hao, Zhu Cuishan, Wang Zhifeng, Wang Liqun, Chen Yan, Zhou Fei. 2018. Geochemical characteristics of coal-derived oils in the Niudong area in the northern Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1056~1069 (in Chinese with English abstract).

Bourbonniere R A, Meyers P A. 1996. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie. *Limnology and Oceanography*, 41: 352~359.

Chen Mengjin, Wang Xinmin, Hu Guoyi, Li Jian. 2006. Formation condition and exploration potential of Ordovician natural gas reservoir in eastern Ordos basin. *China Petroleum Exploration*, (1): 25~30 (in Chinese with English abstract).

Chen Mengjin, Ning Ning, Hu Guoyi, Li Jian. 2007. Characteristics and influencing factors of Pingliang Formation source rocks, west Ordos basin. *Science Bulletin*, 52(SI): 78~85 (in Chinese).

Chen Lijun, Wang Le, He Wenzhong, Leng Danfeng, Duan Yuliang. 2014. Geochemical characteristics of crude oil and oil source correlation in Xiasiwan oilfield of Ordos basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 28(4): 51~57 (in Chinese with English abstract).

Cong Lin, Li Wenlong. 2010. Accumulation mechanism and distributing regulation of petroleum, natural gas, coal in Ordos basin. *Science Technology and Engineering*, 10(29): 7123~7127 (in Chinese with English abstract).

Deng Xiuqin, Fu Jinhua, Yao Jingli, Pang Jinlian, Sun Bo. 2011. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang formation in Ordos basin and breakthrough in petroleum exploration. *Journal of Palaeogeography*, 13(4): 443~455 (in Chinese with English abstract).

Du Jinhu, Li Xiangbo, Bao Hongping, Xu Wanglin, Wang Yating,

Huang Junping, Wang Hongbo, Wanyan Rong, Wang Jing. 2019. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 866~882.

Duan Yi, Wang Zhiping, Zhang Hui, Wu Baoxiang, Wang Chuanyuan, Meng Zifang, Zhang Xiaobao, Zhou Shixin. 2004. Geochemical characteristics of hydrocarbons in crude oils from the Qaidam basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(4): 359~364 (in Chinese with English abstract).

Duan Yi, Zhang Shengli, Zheng Zhaoyang, Wu Baoxiang. 2007. Study on genesis of crude oil in the Yan'an Formation of the Maling oilfield, Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(10): 1407~1415 (in Chinese with English abstract).

Fu J M, Sheng G, Xu J, Eglinton G, Gowar A P, Jia R F, Fan S F, Peng P A. 1990. Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese nonmarine sediments. *Organic Geochemistry*, 16(4-6): 769~779.

Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Zhang Yueqiao, Xu Wanglin, Bao Hongping, Zhang Yanling, Gao Jianrong, Song Hui. 2016. Development characteristics and new exploration areas of marine source rocks in Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(8): 939~951 (in Chinese with English abstract).

Hackley P C, Ryder R T, Trippi M H, Alimi H. 2013. Thermal maturity of northern Appalachian basin Devonian shales: insights from sterane and terpane biomarkers. *Fuel*, 106: 455~462.

Han Zongyuan. 2012. Organic geochemical characteristics of source rock in well Zhentan1, Ordos basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 19(5): 10~14 (in Chinese with English abstract).

Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, Yang Y Y. 2011. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay basin, China. *Organic Geochemistry*, 42: 323~339.

Hou Linhui, Peng Pingan, Yu Chiling, Zhang Wenzheng, Zhang Hui. 2007. Geochemical characteristic and oil-source analysis of crude oils in Jiuyan-Xifeng oilfield, Ordos basin. *Geochimica*, 36(5): 497~506 (in Chinese with English abstract).

Huang Difan, Zhang Dajiang, Li Jinchao. 1989. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes. *Petroleum Exploration and Development*, 3: 8~15 (in Chinese with English abstract).

Huang D F, Li J C, Zhang D J. 1990. Maturation sequence of continental crude oils in hydrocarbon basins in China and its significance. *Organic Geochemistry*, 16(1-3): 521~529.

Ji Limin. 2005. The oil-source correlation, biological source and paleo-climate studies of Triassic source rocks in Xifeng area of east Gansu Province. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

Ji L, He C, Zhang M, Wu Y, Li X. 2016. Bicyclic alkanes in source rocks of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos basin and their inconsistency in oil-source correlation. *Marine and Petroleum Geology*, 72: 359~373.

Jiang Chengfu, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, Wan Yongping, Lei Yuhong, Sun Jianbo, Guo Chao. 2013. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in 7th Member of Yanchang Formation, southeast Ordos basin. *Geology in China*, 40(6): 1880~1888.

Jiang Lian, Zhang Min. 2015. Diahopanoid compounds and their significances for the crude oils in Bawu oilfield of Lishu) fault depression. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 34(6): 39~47 (in Chinese with English abstract).

Jiang L, George S C, Zhang Min. 2018. The occurrence and distribution of rearranged hopanes in crude oils from the Lishu depression, Songliao basin, China. *Organic Geochemistry*, 115: 205~219.

Li Mengru, Tang Youjun, Liu Yan, Hu Hui, He Qichuan. 2018. Geochemical characteristics and oil-source correlation in crude oils from different regions of Jiangling depression. *Natural Gas*

- Geoscience, 29(9): 1240 ~ 1251 (in Chinese with English abstract).
- Li Sumei, Jiang Zhenxue, Dong Yuexia, Wang Xudong. 2008. Genetic type and distribution of the oils in the Nanpu depression Bohai Bay basin. *Geoscience*, 22(5): 817 ~ 823 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongxing, Wang Deng, Ji Zhongyun, Zhao Hanqing. 2018. Geochemical characteristics of source rocks from the Yinan 2 well in the eastern Kuche depression. *Resources Environment & Engineering*, 32(2): 233 ~ 236 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, Ma Haiyong, Du Yuguo. 2013. Geochemical characteristics and genetic types of crude oil from Yanchang Formation in Longdong area, Ordos basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 108 ~ 115 (in Chinese with English abstract).
- Lu Hong, Wang Tieguan, Xu Xinde, Zheng Hongju, Yin Wenqing. 1998. Organic geochemical characteristics of Crude oils in Nanpu sag. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 20(3): 28 ~ 35 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaogang. 2012. Study on geological conditions of hydrocarbon accumulation in Ordovician reservoir in the southern part of the western margin of Ordos basin. Xi'an: Northwest University.
- Moldowan J M, Fago F J, Carlson R M K, Young D C, Duven G A, Clardy J, Schoell M, Pillinger C T, Watt D S. 1991. Rearranged hopanes in sediments and petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11): 3333 ~ 3353.
- Moldowan J M, Seifert W K, Galloegos E J. 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 69(8): 1255 ~ 1268.
- Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Wang Guoshou, Liu Yunli, Yang Fan. 2011. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation, southern margin of the Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 32(1): 38 ~ 46 (in Chinese with English abstract).
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. *The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*. Cambridge: Cambridge University Press, 1155.
- Shi Yang, Bao Jianping, Zhu Cuishan, Zhan Zhaowen, Yuan Li, Xu Wen. 2010. Comparative study on geochemistry between crude oils from Qigequan and Xianshuiquan oilfields in western Qaidam basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(1): 132 ~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Sinninghe Damsté J S, Kenig F, Koopmans M P, Köter J, Schouten S, Hayes J M, Leeuw J W. 1995. Evidence for gammacerane as an indicator of water-column stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895 ~ 900.
- Sofer Z. 1984. Stable carbon isotope compositions of crude oils; application to source depositional environments and petroleum alteration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 68(1): 31 ~ 49.
- Song Li, Chen Ruiqian, Shan Fei. 2019. Reconstructing redox conditions of Upper Cretaceous source rocks in the Houjingou section of the Songliao basin. *Geological Journal of China Universities*, 25(6): 838 ~ 846 (in Chinese with English abstract).
- Song Ning, Wang Tieguan, Li Meijun. 2007. An *n*-alkane coexisting even and odd carbon number predominance of Paleogene in Jinhu sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(2): 307 ~ 313 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yipu, Wang Chuangang, Wang Yi, Yang Liwei, Xu Huazheng, Liu Wenbin, Wu Tianhong. 2008. Geochemical characteristics and exploration potential of middle Ordovician Pingliang Formation in the Ordos basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(2): 162 ~ 168 (in Chinese with English abstract).
- Tao S, Wang C, Du J, Liu L, Chen Z. 2015. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 460 ~ 467.
- Tian Derui, Niu Chengmin, Wang Deying, Pan Wenjing, Zhang Rucui. 2019. Geochemistry and oil-source correlation of crude oil in the LD29 oilfield, slope belt in the southern sag of the Liaodong depression, Bohai sea. *Geological Journal of China Universities*, 25(4): 527 ~ 537 (in Chinese with English abstract).
- Volkman J K, Allen D I, Stevenson P L, Burton H R. 1986. Bacterial and algal hydrocarbons in sediments from a saline Antarctic lake, Ace Lake. *Organic Geochemistry*, 10(4-6): 671 ~ 81.
- Wang Chongjing, Xu Hao, Yang Guang, Cai Daiyong, Xia Yongxiang. 2014. Geological conditions of Yanghugou Formation shale gas accumulation on western margin of Ordos basin. *Coal Geology of China*, 26(2): 18 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunjiang, Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xiao Qianhua, Li Jinyou, Zhang Yali, Piao Mingzhi. 2000. Geochemical properties and applications of 18 $\alpha$ (H)-neohopane and 17 $\alpha$ (H) rearranged hopanes. *Science Bulletin*, 45(13): 1366 ~ 1372.
- Wang H D, Allen J, Philp R P. 1995. An organic geochemical investigation of oils and source rocks from two Mesozoic formations of Shanganning basin, China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 11(4): 277 ~ 288.
- Wang Jie, Wang Tieguan, Chen Jianfa, Feng Zihui, Jiang Xingchao. 2009. Geochemical characteristics and maturity difference of crude oil from Shuangcheng-Taipingchuan area in Songliao basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(1): 65 ~ 70 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, Zhu Zhili. 2019. Distribution patterns and geochemical implications of C<sub>19</sub> - C<sub>23</sub> tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments. *Geochimica*, 48(2): 161 ~ 170 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huazheng, Wang Chuangang. 2010. Development environment and lithological sequence of marine source rock; taking Ordos basin as an example. *Acta Petrolei Sinica*, 31(1): 25 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jinpeng, Jiao Tao, Lv Yujie. 2013. Evaluation of hydrocarbon generation potentials of hydrocarbon source rock in Yan'an Formation, Ningdong oil field. *Mud Logging Engineering*, 24(2): 84 ~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Lin Hongbin, Wu Kai, Luo Lirong. 2010. Origin of Chang 10 oil reservoir in northern Shaanxi region of Ordos basin. *Geochimica*, 39(3): 274 ~ 279 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Peng Pingan, Liu Fei, Luo Lirong. 2016. Oil detailed classification and oil-source correlation of Mesozoic lacustrine oil in Ordos basin. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(2): 198 ~ 205 (in Chinese with English abstract).
- Yin Wei, Zheng Ronghe, Meng Xianlong, You Weifeng. 2005. Geochemical behaviors of crude oils in central Junggar basin. *Oil & Gas Geology*, 26(4): 461 ~ 466 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunming, Guo Kangliang, Zhang Jun, Wang Zhonghao. 2002. Characteristics and significance of bicyclic sesquiterpanes. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 24(2): 30 ~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Li S, Yang J, Yang S, Wang J. 2004. Petroleum migration and mixing in the Pearl River Mouth basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 215 ~ 224.
- Zhang Wanfeng. 2015. Geochemical characteristics and identification of mixed crude oil in the Pearl River Mouth basin. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jingzhou, Meng Xuangang, Han Zaihua. 2020. Near-source hydrocarbon accumulation; geochemical evidence of lacustrine

crude oil from the Member 6 of Yanchang Formation, eastern margin of Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1513~1526.

Zhao Mengjun, Zhang Shuichang. 2001. The special sedimentary facies indicated by 17 $\alpha$  (H)-diahopanes in Tarim basin. *Petroleum Exploration and Development*, 28(1): 36~38 (in Chinese with English abstract).

Zhu Jianhui, Lü Jianhong, Miao Jiujun, Yuan Dongshan, Zhang Yanxia. 2011. Hydrocarbon generation potential of lower Paleozoic source rocks in southwestern margin of Ordos basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(6): 662~670 (in Chinese with English abstract).

Zhu Yangming. 1997. Geochemical characteristics of terrestrial oils of the Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(2): 26~30 (in Chinese with English abstract).

Zhu Yangming, Su Aiguo, Liang Digang, Cheng Keming, Weng Huanxin, Peng Dehua. 2003. Distribution characterization and origin of n-alkanes in saline lacustrine source rocks of Qaidam basin. *Geochemica*, 32(2): 117~123 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

包建平, 何丹, 朱翠山, 刘玉瑞, 王文军, 刘宏宇. 2017. 北部湾盆地迈陈凹陷徐闻 X3 井原油地球化学特征及其成因. *天然气地球科学*, 28(5): 665~676.

包建平, 孔婕, 朱翠山, 秋茶, 李梅, 卢玉红, 张文艳. 2012. 塔里木盆地一类新海相原油的地球化学特征. *沉积学报*, 30(3): 580~587.

包建平, 吴浩, 朱翠山, 王志峰, 汪立群, 陈琰, 周飞. 2018. 柴达木盆地北缘牛东地区煤成油及其地球化学特征. *地质学报*, 92(5): 1056~1069.

陈孟晋, 宁宁, 胡国艺, 李剑. 2007. 鄂尔多斯盆地西部平凉组烃源岩特征及其影响因素. *科学通报*, 52(SI): 78~85.

陈孟晋, 王新民, 胡国艺, 李剑. 2006. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系天然气成藏条件与勘探潜力. *中国石油勘探*, 1: 25~30.

陈立军, 王乐, 何文忠, 冷丹凤, 段玉良. 2014. 鄂尔多斯盆地下寺湾油田原油地球化学特征及油源对比. *石油地质与工程*. 28(4): 51~57.

丛琳, 李文龙. 2010. 鄂尔多斯盆地油、气、煤成藏机理及分布规律. *科学技术与工程*, 10(29): 7123~7127.

邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 庞锦连, 孙勃. 2011. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破. *古地理学报*, 13(4): 443~455.

段毅, 王智平, 张辉, 吴保祥, 王传远, 孟自芳, 张晓宝, 周世新. 2004. 柴达木盆地原油烃类地球化学特征. *石油实验地质*, 26(4): 359~364.

段毅, 张胜斌, 郑朝阳, 吴保祥. 2007. 鄂尔多斯盆地马岭油田延安组原油成因研究. *地质学报*, 81(10): 1407~1415.

杜金虎, 李相博, 包洪平, 徐旺林, 王雅婷, 黄军平, 王宏波, 完颜容, 王菁. 2019. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域. *石油勘探与开发*, 46(5): 820~835.

韩宗元. 2012. 鄂尔多斯盆地镇探 1 井烃源岩有机地球化学特征. *油气地质与采收率*, 19(5): 10~14.

侯林慧, 彭平安, 于赤灵, 张文正, 张辉. 2007. 鄂尔多斯盆地姬塬—西峰地区原油地球化学特征及油源分析. *地球化学*, 36(5): 497~506.

郭彦如, 赵振宇, 张月巧, 徐旺林, 包洪平, 张延玲, 高建荣, 宋微. 2016. 鄂尔多斯盆地海相烃源岩系发育特征与勘探新领域. *石油学报*, 37(08): 939~951.

黄第藩, 张大江, 李晋超. 1989. 论 4—甲基萘烷和孕甾烷的成因. *石油勘探与开发*, (3): 8~15.

吉利民. 2005. 陇东西峰地区三叠系油源、成烃母质及其发育的古环境研究. 武汉: 中国地质大学博士学位论文.

姜连, 张敏. 2015. 梨树断陷八屋油田原油重排藿烷类化合物及其地质意义. *大庆石油地质与开发*, 34(6): 39~47.

姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 万永平, 雷裕红, 孙建博, 郭超. 2013. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长 7 段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价. *中国地质*, 40(6): 1880~1888.

李梦茹, 唐友军, 刘岩, 胡辉, 贺其川. 2018. 江陵凹陷不同地区原油地球化学特征及油源对比. *天然气地球科学*, 29(9): 1240~1251.

李素梅, 姜振学, 董月霞, 王旭东. 2008. 渤海湾盆地南堡凹陷原油成因类型及其分布规律. *现代地质*, 22(5): 817~823.

刘洪星, 王登, 纪中云, 赵汗青. 2018. 库车坳陷东部依南 2 井烃源岩地球化学特征. *资源环境与工程*, 32(2): 233~236.

柳广弟, 杨伟伟, 冯渊, 马海勇, 独育国. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组原油地球化学特征及成因类型划分. *地学前缘*, 20(2): 108~115.

卢鸿, 王铁冠, 徐新德, 郑红菊, 尹文庆. 1998. 南堡凹陷原油的有机地球化学特征. *江汉石油学院学报*, 20(3): 29~35.

马晓刚. 2012. 鄂尔多斯盆地西缘南段奥陶系成藏地质条件研究. 西安: 西北大学硕士学位论文.

倪春华, 周小进, 王果寿, 刘运黎, 杨帆. 2011. 鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征. *石油与天然气地质*, 32(1): 38~46.

施洋, 包建平, 朱翠山, 詹兆文, 袁莉, 徐文. 2010. 柴达木盆地西部七个泉与咸水泉油田原油地球化学特征对比研究. *天然气地球科学*, 21(1): 132~138.

宋力, 陈睿倩, 商斐. 2019. 松辽盆地后金沟剖面上白垩统烃源岩氧化还原环境重建. *高校地质学报*, 25(6): 838~846.

宋宁, 王铁冠, 李美俊. 2007. 江苏金湖凹陷古近系奇碳优势和偶碳优势共存的正构烷烃. *沉积学报*, 25(2): 307~313.

孙宜朴, 王传刚, 王毅, 杨伟利, 许化政, 刘文斌, 伍天洪. 2008. 鄂尔多斯盆地中奥陶统平凉组烃源岩地球化学特征及勘探潜力. *石油实验地质*, 30(2): 162~168.

田德瑞, 牛成民, 王德英, 潘文静, 张如才. 2019. 渤海海域辽东南洼斜坡带旅大 29 油田原油地球化学特征与油源对比. *高校地质学报*, 25(04): 527~537.

王崇敬, 徐浩, 杨光, 曹代勇, 夏永翊. 2014. 鄂尔多斯西缘羊虎沟组页岩气聚集地质条件分析. *中国煤炭地质*, 26(2): 18~20.

王春江, 傅家谟, 盛国英, 肖乾华, 李金有, 张亚丽, 朴明植. 2000. 18 $\alpha$ (H)-新藿烷及 17 $\alpha$ (H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用. *科学通报*, 45(13): 1366~1372.

王杰, 王铁冠, 陈践发, 冯子辉, 蒋兴超. 2009. 松辽盆地双城—太平川地区原油地球化学特征及其成熟度差异. *海相油气地质*, 14(1): 65~70.

王铁冠, 钟宁宁, 侯杰读, 黄光辉, 包建平, 李贤庆. 1995. 低熟油气形成机理与分布. 北京: 石油工业出版社.

王毅, 杨伟利, 张刘平. 2016. 鄂尔多斯盆地油气成藏规律与主控因素. 北京: 石油工业出版社.

肖洪, 李美俊, 杨哲, 朱志立. 2019. 不同环境烃源岩和原油中 C<sub>19</sub>~C<sub>23</sub>三环藿烷的分布特征及地球化学意义. *地球化学*, 48(2): 161~170.

肖玉亮. 2016. 四川盆地海相烃源岩生物标志化合物特征及应用. 成都: 西南石油大学.

许化政, 王传刚. 2010. 海相烃源岩发育环境与岩石的沉积序列——以鄂尔多斯盆地为例. *石油学报*, 31(1): 25~30.

闫金鹏, 焦滔, 吕玉杰. 2013. 宁东油田延安组烃源岩生烃潜力评价. *录井工程*, 24(2): 84~88.

杨华, 张文正, 蔺宏斌, 吴凯, 罗丽荣. 2010. 鄂尔多斯盆地陕北地区长 10 油源及成藏条件分析. *地球化学*, 39(3): 274~279.

杨华, 张文正, 彭平安, 刘飞, 罗丽荣. 2016. 鄂尔多斯盆地中生界湖相油型油的精细划分与油源对比. *地球科学*, 38(2): 198~205.

尹伟, 郑和荣, 孟闲龙, 由伟丰. 2005. 准噶尔盆地中部原油地球化学特征. *石油与天然气地质*, 26(4): 461~466.

张春明, 郭康良, 张俊, 汪中浩. 2002. 双环倍半萜的分布特征及其意义. *江汉石油学院学报*, 24(2): 30~32.

张敏, 林壬子, 梅博文. 1997. 油藏地球化学——塔里木盆地库车含油气系统研究. 重庆: 重庆大学出版社.

张万峰. 2015. 珠江口盆地原油地球化学特征及混源油定量判别.

武汉:中国地质大学硕士学位论文.  
赵靖舟, 孟选刚, 韩载华. 2020. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地  
延长组湖盆东部“边缘”延长组 6 段原油的地球化学证据. 石油  
学报, 41(12): 1513~1526.  
赵孟军, 张水昌. 2001. 17 $\alpha$ (H)-重排藿烷在塔里木盆地中的指相意  
义. 石油勘探与开发, 28(1): 36~38.  
朱建辉, 吕剑虹, 缪九军, 袁东山, 张彦霞. 2011. 鄂尔多斯西南缘

下古生界烃源岩生烃潜力评价. 石油实验地质, 33(6): 662  
~670.  
朱扬明. 1997. 塔里木盆地陆相原油的地球化学特征. 沉积学报,  
15(2): 26~30.  
朱扬明, 苏爱国, 梁狄刚, 程克明, 翁焕新, 彭德华. 2003. 柴达木  
盆地咸湖相生油岩正构烷烃分布特征及其成因. 地球化学, 32  
(2): 117~123.

Discovery of oil sands in the Yanghugou Formation in the western  
margin of Ordos basin and its source analysis

XI Shengli<sup>1,2)</sup>, HUANG Junping<sup>\* 3)</sup>, ZHANG Caili<sup>2,4)</sup>, LI Xiangbo<sup>3)</sup>,  
JING Xianghui<sup>2,4)</sup>, LIN Junfeng<sup>5)</sup>, GUO Wei<sup>2,4)</sup>, ZHANG Yan<sup>6)</sup>

1) PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2) National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development,  
Xi'an, Shaanxi 710018, China;

3) Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;

4) Exploration and Development Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

5) School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

6) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

\* Corresponding author: cnhj2007@163.com

Abstract

In order to investigate the geochemical characteristics and sources of oil sands recently discovered in the Yanghugou Formation of the YT2 well in the western margin of Ordos basin, biomarkers and carbon isotope of the oil sands were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) and isotope mass spectrometry respectively. The results show that the normal alkanes in the oil sands displayed a significant unimodal distribution pattern with  $nC_{17}$  as the major peak; the value of Pr/Ph ratio was 0.90, and the values of Pr/ $nC_{17}$  and Ph/ $nC_{18}$  ratios were 0.30 and 0.46 respectively. These indicate that the source rock of the oil sands was deposited in reducing conditions. Tricyclic terpanes have a relatively high content, with  $C_{23}$  tricyclic terpanes as the main peak and showing approximate normal distribution characteristics; the content of  $C_{27}$  regular steranes is higher than  $C_{29}$  regular steranes; the value of hopanes/steranes ratio is relatively low, which indicate that organic matters were dominated by lower algae; and the carbon isotopes of saturated and aromatic fractions are  $-31.5\text{‰}$  and  $-30.5\text{‰}$  respectively. These geochemical characteristics of the oil sands from the YT2 well indicate that it originated from marine source rocks, which means that marine crude oil was discovered firstly in the western margin of Ordos basin. Oil to source correlation analysis with the source rocks of the Pingliang, the Yanghugou, the Yanchang, and the Yan'an Formations indicates that this oil sands may come from the Pingliang Formation marine shale.

**Key words:** Ordos basin; Carboniferous; oil sands; marine facies; biomarkers; carbon isotope