

利用三环萜烷对比泌阳凹陷生物降解油源

国鹏飞^{1,2}, 何生^{1,2}, 朱书奎^{1,2}, 柴德蓉^{1,2}, 殷世艳³

(1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 3. 河北联合大学矿业工程学院, 河北唐山 063009)

摘要:以南襄盆地泌阳凹陷北部斜坡带生物降解油为例,在评价三环萜烷抗生物降解能力的基础上,研究了三环萜烷在生物降解油油源对比中的应用。对比分析表明,三环萜烷至少可以抵抗 8 级强度的原油生物降解, $C_{23} \sim C_{26}/C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷、 $C_{19} \sim C_{26}/C_{28} \sim C_{29}$ -三环萜烷及 $C_{19} \sim C_{26}$ -三环萜烷/ C_{29} -Ts 等参数是有效的油源对比指标。三环萜烷指标、碳稳定同位素及三芳甾烷组成特征指示,泌阳凹陷北部斜坡带核三下亚段生物降解油来自深凹区核三下亚段烃源岩,核三上亚段生物降解油主要来自深凹区核三上亚段烃源岩。在珠江口盆地珠 I 坳陷中,上述三环萜烷参数确定的油源关系与现有认识一致,进一步表明了这些参数的有效性。

关键词:三环萜烷;生物降解油;油源对比;泌阳凹陷;珠 I 坳陷

中图分类号:TE122.1⁺14

文献标识码:A

Application of tricyclic terpanes in biodegraded oil-source correlation in Biyang Sag

Guo Pengfei^{1,2}, He Sheng^{1,2}, Zhu Shukui^{1,2}, Chai Derong^{1,2}, Yin Shiyan³

(1. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences,

Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract: Biodegraded oils from the northern slope of the Biyang Sag were analyzed to examine the application of tricyclic terpanes to biodegraded oil-source correlation. Tricyclic terpanes are resistant to biodegradation (biodegradation rank 8). New tricyclic terpane parameters, such as $(C_{23} \sim C_{26}/C_{19} \sim C_{22})$ -tricyclic terpanes, $(C_{19} \sim C_{26}/C_{28} \sim C_{29})$ -tricyclic terpanes and $(C_{19} \sim C_{26})$ -tricyclic terpanes/ C_{29} -Ts are effective oil-source correlation parameters. Correlation results suggested that the biodegraded oils in the lower member of Eh_3 on the northern slope of the Biyang Sag came from the mudstones in the lower member of Eh_3 of the central sag, and the oils in the upper member of Eh_3 mainly came from the mudstones in the upper member of Eh_3 of the central sag. The correlation results of oils and source rocks in the Zhu I Depression of the Pearl River Mouth Basin determined by the three tricyclic terpane parameters were consistent with previous results, further supporting the effectiveness of the parameters.

Key words: tricyclic terpanes; biodegraded oils; oil-source correlation; Biyang Sag; Zhu I Depression

与正常原油相比,生物降解油的体积、API 值减小,密度、黏度、非烃类气体、NSO 化合物及微量元素含量增加^[1-3]。原油中不同烃类抵抗生物降解的能力存在差异,尤其是生物标志化合物。部分生标的降解顺序已被经验性地鉴定为:正构烷烃、类异戊二烯烷烃、规则甾烷、五环三萜烷、重排甾烷、25-降藿烷、25,30-二降藿烷、 C_{24} -四环二萜烷、Tm、伽马蜡烷等^[4]。Wenger 和 Peters 等^[4-5]根据原油中不同化合物遭受的降解情况将原油的降

解等级划分为 10 级(1~10 级)。由于生标遭受降解的非同步性,大部分地化参数已无法用于生物降解油油源对比研究^[6-8]。“沥青质钒离子催化氧化”、“沥青包裹体生标测试”等方法常用的生物降解油油源对比方法,但这些方法实验过程复杂,分析结果受实验误差的影响较大^[9-11]。原油中抗降解能力较强的化合物,如芳烃化合物、伽马蜡烷、降藿烷等也被用于油源对比研究,且取得了一定的效果^[12-14]。

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-11-20。

作者简介:国鹏飞(1988—),男,在读博士生,主要研究方向为油气地球化学。E-mail:guopengfei1218@sina.com。

基金项目:高等学校学科创新引智计划资助项目(B14031)和国家自然科学基金项目(41072093)资助。

© The Author(s) 2015. This article is published with open access by *Petroleum Geology & Experiment*.

虽然生物降解油源对比研究已经取得了许多认识,但抗降解油源对比指标筛选等方面的研究还不够深入。三环萜烷是原油生标的重要组成部分,广泛存在于生物降解油中。本文以泌阳凹陷北部斜坡带生物降解油为例,在评价三环萜烷抗降解能力的基础上,利用三环萜烷指标、油源碳稳定同位素、三芳甾烷组成等对比了其油源,并探讨了三环萜烷指标在成熟探区(珠江口盆地珠 I 坳陷)中的有效性。

1 区域地质概况

泌阳凹陷是南襄盆地的一个次级凹陷,位于河南省泌阳县(图 1),是我国东部典型的新生代富烃凹陷之一。泌阳凹陷基底为北秦岭褶皱带秦岭群和二郎坪群变质岩系,沉积盖层由老到新依次发育古近系大仓房组、玉皇顶组、核桃园组、廖庄组等^[15-16]。核桃园组为泌阳凹陷强烈断陷阶段形成的烃源岩层系,自下而上分为核三段、核二段和核一段。核三段地层沉积时,气候相对潮湿,湖水较深,藻类等水生生物发育。凹陷中心主要发育中深湖相沉积,形成了有机质丰度高、类型好的烃源岩层段;凹陷边缘主要发育辫状河三角洲、扇三角洲相沉积,形成了优质储层;上覆泥岩为良好盖层。泌阳凹陷北部斜坡带生、储、盖匹配良好^[17],分布有古城、井楼和杨楼等油田,由于储层(如核三下亚段砂岩)埋深较浅,其中的原油普遍遭受了生物降解^[17-19]。

2 样品与实验

2.1 原油和泥岩样品

泥岩及原油样品均取自泌阳凹陷,原油样品主要来自北部斜坡带,泥岩样品主要来自中部深凹带(图 1,表 1,2)。泌阳凹陷原油主要为正常原油和稠油(以生物降解油为主),前者主要分布在双河、下二门、梨树凹、安棚等油田,后者主要分布在古城、井楼、杨楼和新庄等油田。正常原油密度介于 0.84~0.91 g/cm³之间,平均为 0.88 g/cm³,黏度普遍小于 100 mPa·s;生物降解油密度介于 0.89~0.97 g/cm³之间,平均为 0.93 g/cm³,黏度普遍大于 300 mPa·s。

2.2 实验条件

泥岩样品粉碎至 200 目,利用氯仿抽提出其中的可溶有机质(索氏抽提仪,72 h)。取适量(30~40 mg)的原油及泥岩抽提物溶于 50 mL 正己烷,静置 12 h;过滤取得沥青质,滤液浓缩至 5 mL,加入层析柱(氧化铝、硅胶,2:3),分别用正己烷、二氯甲烷和正己烷混合液、氯仿和无水乙醇冲洗出饱和烃、芳烃和胶质 3 种族组分。饱和烃 GC 测试由 Agilent 7890A 气相色谱仪完成,色谱柱为 DB-Petro(30 m×0.25 mm×0.25 μm),检测器为氢火焰离子化检测器(FID),载气为氮气,流速为 1 mL/min,不分流进样;升温程序为 60 °C 停留 1 min,然后以 3 °C/min 升温至 300 °C,停留 30 min。饱和烃、芳烃 GC-MS 测试由 Agilent 7890A-5975C 气

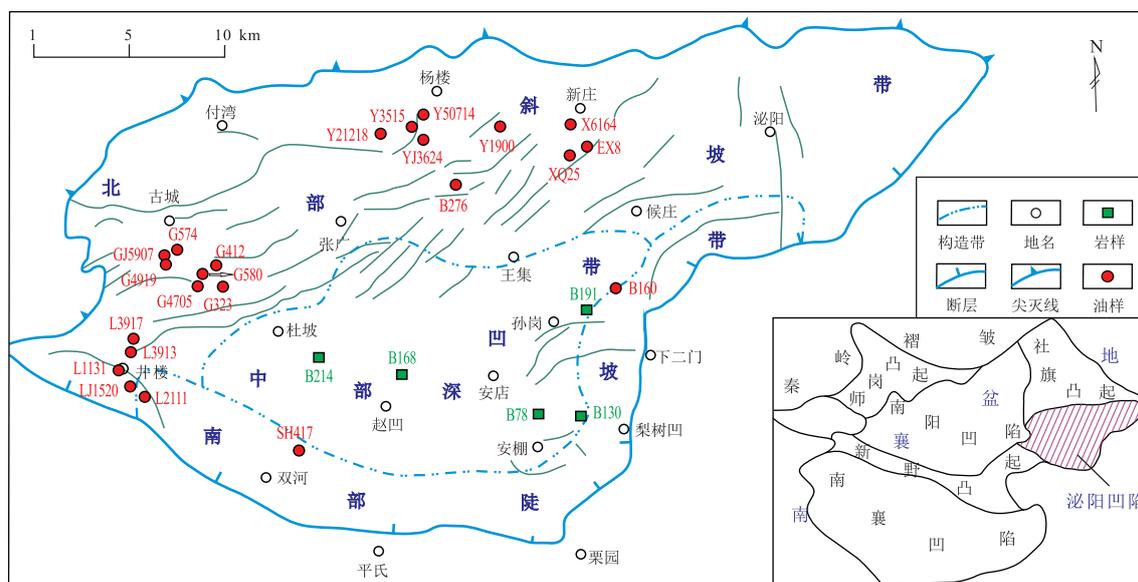


图 1 南襄盆地泌阳凹陷位置 构造单元及油岩样品取样井位

Fig.1 Location, tectonic units and sampled wells of Biyang Sag, Nanyang Basin

表 1 南襄盆地泌阳凹陷原油埋深、层段及族组成等基本信息

井号 (样品号)	地区	深度/m	层位	降解 等级	族组成/%			
					饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
G412	古城	631.4-634.2	Eh ₃ ⁵	4	36.4	35.1	24.6	3.8
G4705	古城	610.0-638.8	Eh ₃ ⁵	6	46.2	22.2	26.8	4.8
G4919	古城	563.4-588.0	Eh ₃ ⁵	6	46.6	24.2	24.2	5.0
GJ5907	古城	231.4-241.0	Eh ₃ ⁴	7	41.4	21.6	30.0	7.1
G574	古城	262.8-271.0	Eh ₃ ⁴	8	38.3	26.2	29.2	6.4
G580	古城	190.0-199.6	Eh ₃ ⁴	8	33.1	19.7	41.8	5.4
L3917	井楼	279.2-282.0	Eh ₃ ⁴	6	49.6	26.6	21.4	2.4
L1131	井楼	369.6-380.4	Eh ₃ ⁵	7	51.1	25.2	18.3	5.4
L2111	井楼	207.6-232.6	Eh ₃ ³	7	46.8	27.1	22.0	4.1
LJ1520	井楼	123.6-134.8	Eh ₃ ³	7	41.2	31.5	24.0	3.3
L3913	井楼	157.0-162.8	Eh ₃ ⁴	8	36.6	29.1	27.2	7.1
Y3515	杨楼	896.6-899.6	Eh ₃ ⁵	3	39.3	24.5	29.8	6.4
YJ3624	杨楼	854.8-862.4	Eh ₃ ⁵	3	37.7	25.5	33.5	3.4
Y50714	杨楼	750.0-759.2	Eh ₃ ⁵	5	31.0	28.1	38.9	2.0
Y1900	杨楼	578.0-590.0	Eh ₃ ³	6	24.1	22.0	40.3	13.7
Y21218	杨楼	794.0-812.0	Eh ₃ ⁴	6	42.1	26.0	30.7	1.2
XQ5	新庄	665.4-675.8	Eh ₃ ¹	6	49.8	31.2	16.7	2.4
EX8	新庄	683.0-688.4	Eh ₃ ²	7	48.6	27.8	18.4	5.1
X6164	新庄	291.6-304.8	Eh ₃ ²	7	43.3	29.0	22.6	5.1
B276	王集	1 079.9-1 089.6	Eh ₃ ⁴	2	46.6	22.7	26.8	3.9
SH417	双河	1 732.8-1 773.0	Eh ₃ ⁴	0	72.0	11.8	8.7	7.6
B160	下二门	2 561.0-2 577.0	Eh ₃ ⁴	0	79.1	9.9	4.5	6.5

表 2 南襄盆地泌阳凹陷典型烃源岩取样信息

井号(样品号)	区块	深度/m	层段	岩性
B168	赵凹	2 024.8	Eh ₃ ⁴	深褐灰色泥岩
B214	杜坡	1 842.9	Eh ₃ ⁶	灰褐色页岩
B191	下二门	2 595.5	Eh ₃ ⁴	灰褐色页岩
B130	梨树凹	2 488.2	Eh ₃ ²	深灰褐色泥岩
B78	安棚	2 831.5	Eh ₃ ³	深褐灰色页岩

相色谱-质谱联用仪完成,色谱柱为 HP-5MS(60 mm×0.25 mm×0.25 μm),载气为氮气,流速为 1 mL/min,不分流进样,检测器质量扫描范围为 50~550;升温程序为 50 ℃ 停留 1 min,然后以 3 ℃/min 升温至 300 ℃,停留 30 min。实验用正己烷、二氯甲烷和氯仿等试剂购自美国天地试剂。

3 结果与讨论

3.1 三环萜烷的抗降解性

3.1.1 原油降解序列

为了讨论三环萜烷抵抗生物降解的能力,利用原油生标 GC、GC-MS 等测试数据,参考 Wenger (2002)^[5]的标准建立了一个原油降解序列。这个

序列由油样 B160、B276、G412、L3917、L1131 和 L3913 共 6 个原油组成(图 2)。族组成分析表明,生物降解油的饱和烃含量降低,胶质含量明显增加(表 1),且埋深随降解等级的增加而减小。

GC-FID 可以反映原油饱和烃组成的整体面貌,如正构烷烃组成、甾萜类生标的相对含量等。由油样 B160 至油样 G412,正构烷烃、类异戊二烯烷烃(Pr、Ph)逐渐被降解直至完全被消耗。从油样 L3917 开始,甾萜类生物标志化合物逐渐遭受降解;油样 L3913 中的甾萜类已遭受明显蚀变,其相对含量降低;油样 B160 至油样 L3913,谱图基线抬升越来越明显,“基线鼓包化合物”(UCMs)含量逐渐增加(图 2)。这些特征表明油样 B160 至油样 L3913 遭受的生物降解程度逐渐加深。

进一步地,利用饱和烃 GC-MS 分析数据对比了 6 个油样的甾萜类组成特征。油样 B160 埋藏深度较大(超过 2 500 m),成熟度较高,没有遭受生物降解,其三环萜烷、低分子量甾萜烷、重排甾萜烷含量较高,C₃₀-藿烷为 m/z191 化合物的主峰。油样 B276、G412 的甾萜类组成与本区低熟正常原油相似,具有三环萜烷、低分子量甾萜烷和重排甾萜烷含量低的特点。油样 L3917、L1131 和 L3913 的甾萜类遭受了生物降解,它们的三环萜烷、低分子量甾萜烷、重排甾萜烷的含量逐渐增加,C₃₀~C₃₅-升藿烷系列、C₂₇~C₂₉-规则甾萜烷的相对含量逐渐减少。油样 L3913 仅残余三环萜烷、降藿烷、伽马蜡烷、低分子量甾萜烷和重排甾萜烷等甾萜类化合物。正构烷烃和甾萜类组成特征指示油样 B276、G412、L3917、L1131 和 L3913 的降解等级分别为 2、4、6、7、8 级,油样 B160 为正常原油。这组降解等级逐渐加深的原油为研究三环萜烷的抗降解性提供了保证。

3.1.2 三环萜烷抗降解能力

三环萜烷是原油中萜类化合物的重要组成部分,其碳数可以从 C₁₉延伸到 C₅₄^[18-20]。6 个油样生物降解油的三环萜烷组成相似,其 C₁₉~C₂₂-三环萜烷与 C₂₃~C₂₆-三环萜烷都呈均势分布,C₂₆~C₂₉-三环萜烷的相对含量较低;油样 L1131 和 L3913 的三环萜烷没有呈现出类似 C₃₀~C₃₅-升藿烷系列和 C₂₇~C₂₉-规则甾萜烷的降解(图 3)。进一步地,计算了单体三环萜烷的相对百分含量(图 4)。结果指示,6 个油样的单体三环萜烷相对百分含量近似,降解等级较高的油样 L3917(6 级)、L1131(7 级)和 L3913(8 级)三环萜烷组成与正常原油 B160 的三环萜烷组成差异很小。这表明三环萜烷具有非常强的抗生物降解的能力,其至少可以抵抗 8 级原油生物降解。

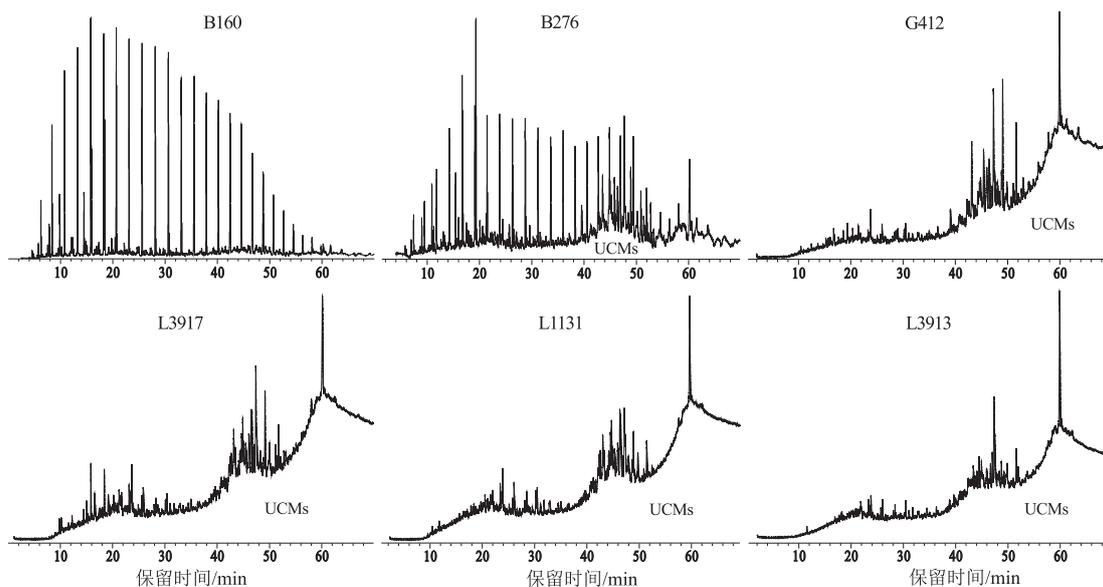


图 2 南襄盆地泌阳凹陷 6 个典型油样的饱和烃 GC-FID 图

Fig.2 GC-FID chromatograms of six typical oils from Biyang Sag, Nanxiang Basin

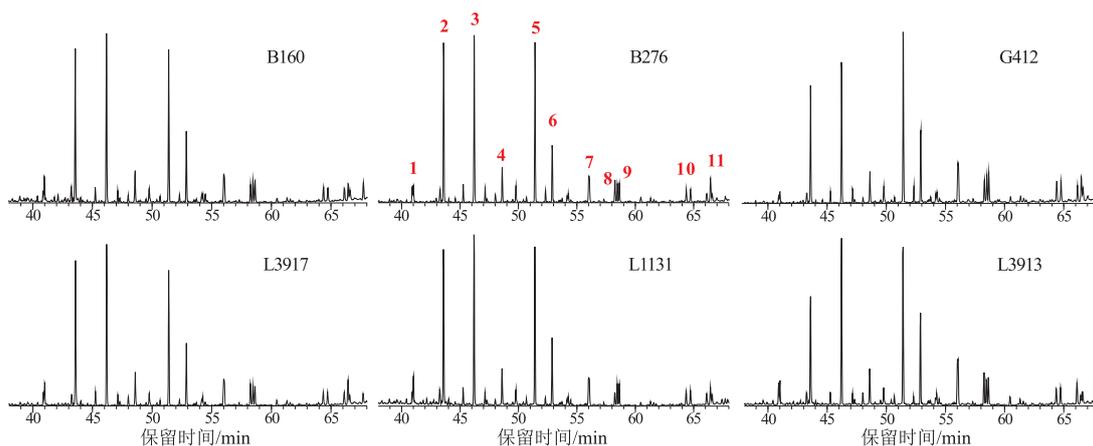


图 3 南襄盆地泌阳凹陷 6 个典型油样的三环萜烷组成

- 1. C₁₉-三环萜烷; 2. C₂₀-三环萜烷; 3. C₂₁-三环萜烷; 4. C₂₂-三环萜烷; 5. C₂₃-三环萜烷; 6. C₂₄-三环萜烷;
- 7. C₂₅-三环萜烷; 8. C₂₄-四环萜烷; 9. C₂₆-三环萜烷; 10. C₂₈-三环萜烷; 11. C₂₉-三环萜烷

Fig.3 Tricyclic terpane compositions of six typical oils from Biyang Sag, Nanxiang Basin

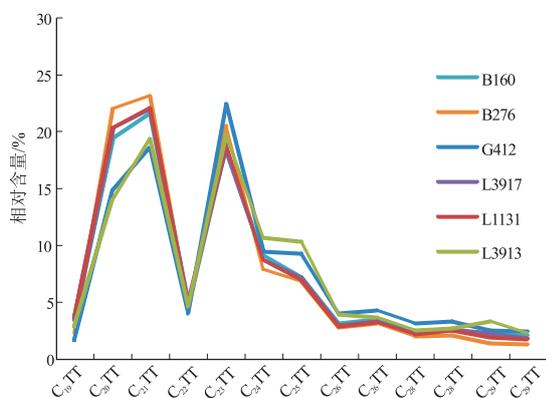


图 4 南襄盆地泌阳凹陷 6 个典型油样中单体三环萜烷(TT)的相对百分含量

Fig.4 Relative contents of (C₁₉-C₂₉)-tricyclic terpanes (TT) of six typical oils from Biyang Sag, Nanxiang Basin

3.2 三环萜烷用于油源对比

前人通过研究三环萜烷前驱物、有机质来源及保存条件、碳同位素组成等发现,三环萜烷组成特征可指示烃源岩有机质来源^[21-30]。

3.2.1 泌阳凹陷北部斜坡带油源对比

泌阳凹陷主要烃源岩为古近系核桃园组三段(核三段)泥岩。核三段又可分为核三上亚段和核三下亚段。前已述及,三环萜烷具有极强的抗降解能力,且具有生源指示意义。因此利用三环萜烷、C₂₉-Ts 等对比了研究区生物降解油的油源(图 5)。由图 5 可见,核三上亚段油源分布在左下方,核三下亚段则分布在右上方,两者可被较好地区分开。核三下亚段油源具有较丰富的C₁₉~C₂₆-三环萜烷,

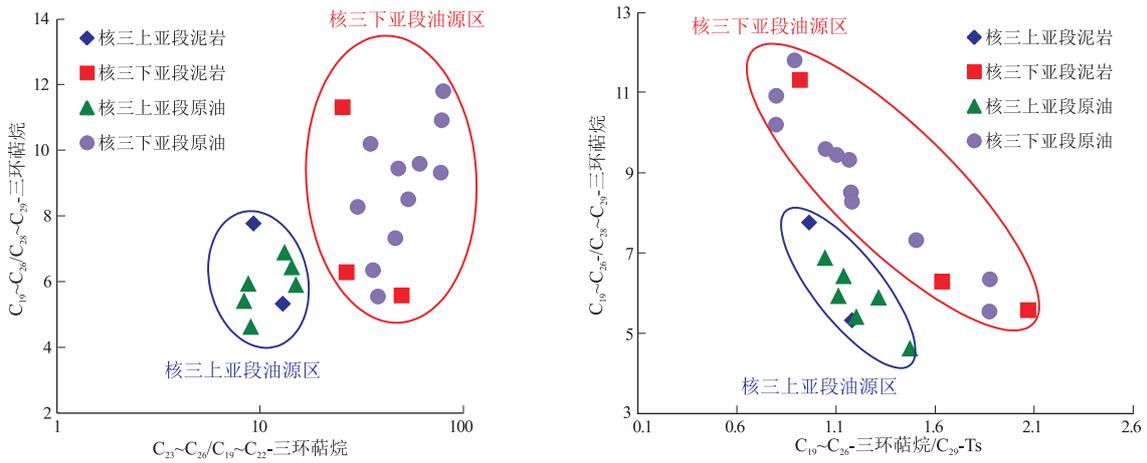


图 5 南襄盆地泌阳凹陷北部斜坡带生物降解油油源对比

Fig.5 Oil-source correlation of biodegraded oils from northern slope of Biyang Sag, Nanxiang Basin

尤其是 $C_{23} \sim C_{26}$ -三环萜烷,而核三上亚段油源 $C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷的相对含量较核三下亚段油源高。油源对比结果表明,泌阳凹陷北部斜坡带核三上亚段生物降解油主要来自深凹区核三上亚段泥岩,核三下亚段生物降解油主要来自深凹区核三下亚段泥岩。

3.2.2 其他证据

为了验证三环萜烷确定的油源关系的可靠性,对比了泌阳凹陷北部斜坡带油源的其他地化数据,如碳稳定同位素组成、三芳甾烷组成等。

碳稳定同位素组成是很好的油源对比指标,不同有机质来源、沉积环境形成的烃源岩,其碳同位素组成有一定的差异。Ⅲ、Ⅱ₂型干酪根及其生成的原油碳同位素组成较重,Ⅰ和Ⅱ₁型干酪根及其生成的原油碳同位素较轻^[31]。由原油及烃源岩的碳同位素组成折线图(图 6)所示,核三上、下亚段原油及泥岩抽提物的碳同位素组成介于-28.63‰~

-26.5‰之间,与淡水浮游生物的 $\delta^{13}C$ 值较为接近,这表明核三段烃源岩母质多为浮游生物来源,陆源高等植物的贡献较小^[31]。但核三上亚段油源碳稳定同位素较核三下亚段偏轻 1‰,两者区别明显。

三芳甾烷抗生物降解能力较强,降解等级达到 10 级时三芳甾烷才遭受生物降解^[4], $C_{26}-20S$ -三芳甾烷/ $C_{28}-20S$ -三芳甾烷比值是指示湖相沉积盆地物源输入、沉积环境(如水体盐度)等的有效标志。淡水环境沉积的有机质中 $C_{28}-20S$ -三芳甾烷占有一定的优势,而咸水、半咸水环境中沉积的有机质中 $C_{26}-20S$ -三芳甾烷的丰度较高^[32]。泌阳凹陷泥岩(4 个)及原油(11 个)的三芳甾烷组成存在差异。核三上亚段油源 $C_{28}-20S$ -三芳甾烷含量较高, $C_{26}-20S$ -三芳甾烷含量较低;相反,核三下亚段油源 $C_{28}-20S$ -三芳甾烷含量较低, $C_{26}-20S$ -三芳甾烷含量较高,在相关交汇图中核三上、下亚段油源可以被区分开(图 7)。总之,油源碳同位素、三芳甾烷组成特征指示:泌阳凹陷北部斜坡带核三上亚段生物降解油主要来自核三上亚段泥岩,核三下亚段生物降解油来自核三下亚段泥岩,与三环萜烷指标确定的油源关系一致。

通过上述分析不难发现,三环萜烷抗降解能力较强且具有一定的生源指示意义,适用于生物降解油油源对比。下面以油源关系明确的珠 I 坳陷为例讨论其有效性。

3.2.3 成熟探区

珠江口盆地珠 I 坳陷主要发育始新统至渐新统文昌组、恩平组 2 套烃源岩,2 套烃源岩对珠 I 坳陷油气成藏均有重要贡献^[33-34]。文昌组生成的原油富含 $C_{30}-4$ -甲基甾烷,贫含双杜松烷;相反,恩平组生成的原油贫含 $C_{30}-4$ -甲基甾烷,富含双

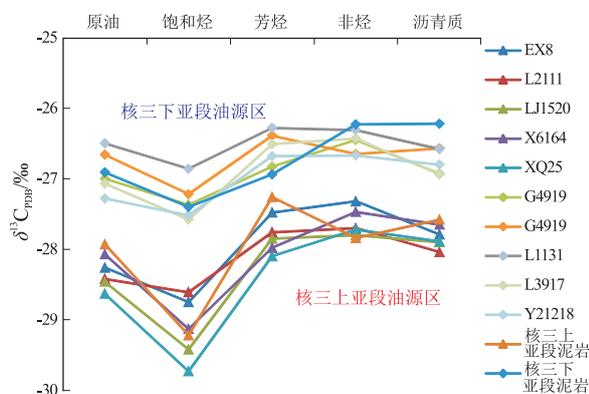


图 6 南襄盆地泌阳凹陷核三上、下亚段油源碳稳定同位素组成对比

Fig.6 Comparison of $\delta^{13}C$ in oils and rocks from Upper and Lower members of Eh_3 formations in Biyang Sag, Nanxiang Basin

杜松烷; 混源油生标组成特征介于前两者之间^[27,35]。根据这些特征, 珠 I 坳陷的油源可建立良好的对比关系(图 8a,b)。其中第一类原油来自文昌组烃源岩, 第二类原油来自恩平组烃源岩, 混源油则兼有 2 套烃源岩的贡献。

本文建立的三环萜烷参数, 如 $C_{23} \sim C_{26}/C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷、 $C_{19} \sim C_{26}/C_{28} \sim C_{29}$ -三环萜烷及 $C_{19} \sim C_{26}$ -三环萜烷/ C_{29} -Ts 等同样适用于珠 I 坳陷油源对比研究(图 8c,d)。这些三环萜烷参数确定的油

源关系与现有认识一致, 即第一类原油来自文昌组烃源岩, 第二类原油来自恩平组烃源岩, 混源油则兼有 2 套烃源岩的贡献。

4 结论

(1) 油样 B276、G412、L3917、L1131 和 L3913 的降解程度逐渐加深, 降解等级分别为 2、4、6、7 和 8 级, 油样 B160 为正常原油。这组原油的三环萜烷组成特征指示三环萜烷的抗降解能力较强, 至少

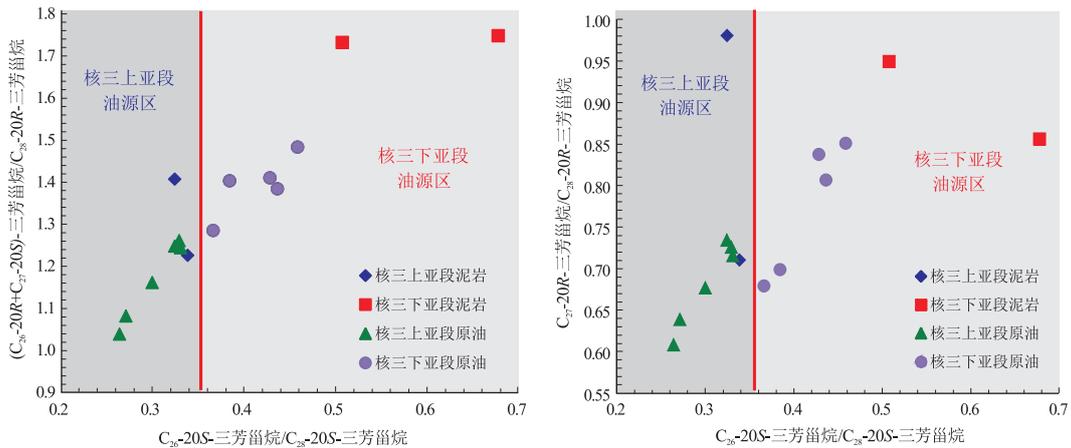


图 7 南襄盆地泌阳凹陷核三上 下亚段油源三芳甾烷组成对比

Fig.7 Composition of tri-aromatic steroids in oils and mudstones from upper and lower members of E₃ formations in Biyang Sag, Nanxiang Basin

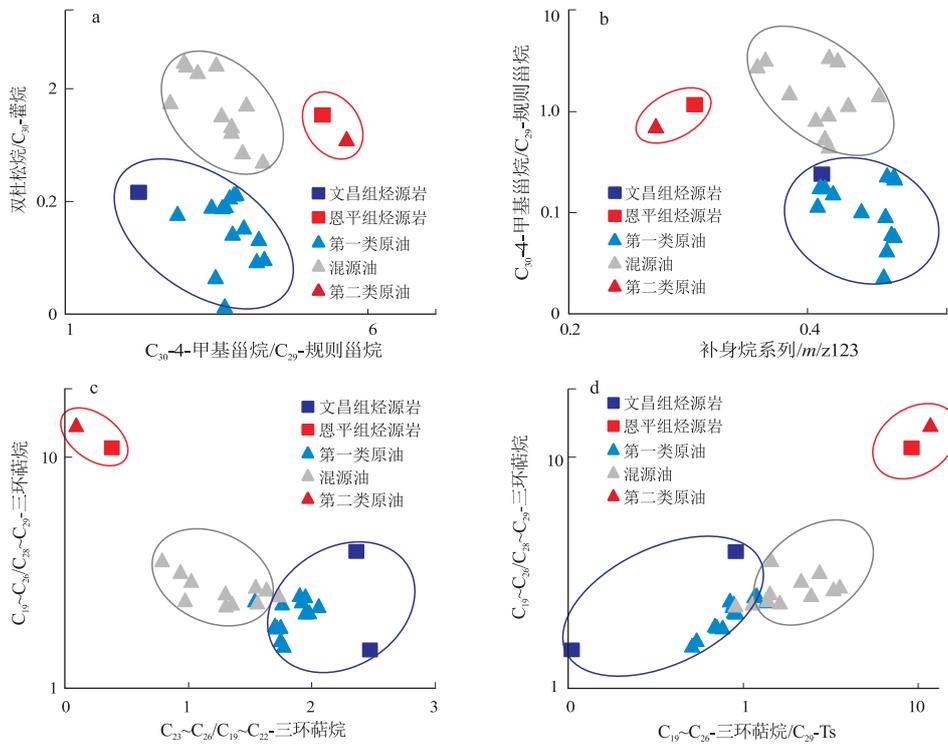


图 8 三环萜烷参数应用于珠 I 坳陷油源对比

补身烷系列表示补身烷+升补身烷; m/z123 表示 4,4,8,8,9-五甲基十氢化萘+C₁₄~C₁₆-倍半萜+补身烷+升补身烷

Fig.8 Oil-source correlation of Zhu I Depression using tricyclic terpanes parameters

可以抵抗 8 级强度的生物降解。

(2) 三环萘烷参数, 如 $C_{23} \sim C_{26}/C_{19} \sim C_{22}$ -三环萘烷、 $C_{19} \sim C_{26}/C_{28} \sim C_{29}$ -三环萘烷及 $C_{19} \sim C_{26}$ -三环萘烷/ C_{29} -Ts 等是有效的生物降解油源对比指标。上述参数指示, 泌阳凹陷北部斜坡带核三下亚段生物降解油来自深凹区核三下亚段烃源岩, 核三上亚段生物降解油主要来自深凹区核三上亚段烃源岩。油源碳稳定同位素、三芳甾烷组成特征及成熟探区(珠 I 坳陷)的应用进一步表明了这些三环萘烷油源对比指标的有效性。

Open Access

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

参考文献:

- [1] Head I M, Jones D M, Larter S R. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil [J]. *Nature*, 2003, 426 (6964): 344-352.
- [2] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993: 100-170.
- [3] 何生, 叶加仁, 徐思煌, 等. 石油及天然气地质学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
He Sheng, Ye Jiaren, Xu Sihuang, et al. Oil and gas geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [4] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker guide: biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history, vol 2 [M]. Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2005: 645-705.
- [5] Wenger L M, Davis C L, Isaksen G H. Multiple controls on petroleum biodegradation and impact on oil quality [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2002.
- [6] 包建平, 朱翠山. 生物降解作用对辽河盆地原油甾萘烷成熟度参数的影响 [J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊 III): 38-46.
Bao Jianping, Zhu Cuishan. The effects of biodegradation on biomarker maturity indicators in sequentially biodegraded oils from Liaohe Basin, China [J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(1): 42-50.
- [7] 倪春华, 包建平, 顾忆. 生物降解作用对芳烃生物标志物参数的影响研究 [J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 386-389.
Ni Chunhua, Bao Jianping, Gu Yi. Study of biodegradation effect on aromatic biomarker parameters [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(4): 386-389.
- [8] 黄海平, 杨杰, Larter S R. 生物降解作用对储层抽提物中多甲基取代萘分布的影响 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(3): 281-288.
Huang Haiping, Yang Jie, Larter S R. Biodegradation effect on distributions of multiple methylated naphthalenes in reservoir extracts [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(3): 281-288.
- [9] Ma Anlai, Zhang Shuichang, Zhang Dajiang. Ruthenium-ion-catalyzed oxidation of asphaltenes of heavy oils in Lunnan and Tahe oilfields in Tarim Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(11): 1502-1511.
- [10] 徐冠军, 张大江, 王培荣. 用沥青质中生物标志化合物判别生物降解油的油源 [J]. 科学通报, 2003, 48(4): 400-404.
Xu Guanjun, Zhang Dajiang, Wang Peirong. Using the biomarkers bounded on the asphaltene for biodegraded oil-source correlation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 400-404.
- [11] 吴应琴, 夏燕青, 王永莉, 等. 严重生物降解稠油沥青质包裹体中生标研究 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 480-483.
Wu Yingqin, Xia Yanqing, Wang Yongli, et al. Study on the biomarkers of asphaltene inclusions in severely biodegraded thick oils [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 480-483.
- [12] Fazeelat T, Asif M, Jalees M I, et al. Source correlation between biodegraded oil seeps and a commercial crude oil from the Punjab Basin, Pakistan [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 77(1): 1-9.
- [13] 李水福, 胡守志, 何生, 等. 泌阳凹陷北部斜坡带生物降解油的油源对比 [J]. 石油学报, 2010, 31(6): 946-951.
Li Shuifu, Hu Shouzhi, He Sheng, et al. Oil-source correlation for biodegraded oils in the north slope of the Biyang Depression [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(6): 946-951.
- [14] 胡守志, 李水福, 何生, 等. 南襄盆地泌阳凹陷西部稠油地化特征及意义 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 387-392.
Hu Shouzhi, Li Shuifu, He Sheng, et al. Geochemical characteristics and significance of heavy oils from the west area of Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 387-392.
- [15] 陈亮, 王华, 韩晋阳, 等. 泌阳凹陷下二门地区南部核三上亚段层序地层特征及地层-岩性圈闭预测 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 26-31.
Chen Liang, Wang Hua, Han Jinyang, et al. Sequence stratigraphy and stratum-lithology trap prediction of the Eh3 upper member of Hetaoyuan Formation in south Xiaermen Oilfield, Biyang Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 26-31.
- [16] 李海华. 南襄盆地泌阳凹陷层序地层学与隐蔽油气藏研究 [J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 47-51.
Li Haihua. Study of sequence stratigraphy and subtle reservoirs in the Biyang sag of the Nanxiang basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(1): 47-51.
- [17] 王华, 何生, 甘华军, 等. 泌阳凹陷不同环境烃源岩成烃差异研究 [R]. 武汉: 中国地质大学(武汉)资源学院, 2009.
Wang Hua, He Sheng, Gan Huajun, et al. Hydrocarbon generating differences of source rocks in different environments from Biyang Depression [R]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) Faculty of Resources, 2009.

- [18] 国朋飞,何生,朱书奎,等.泌阳凹陷生物降解油“基线鼓包”成因及化合物组成[J].石油与天然气地质,2014,35(3):317-325.
Guo Pengfei, He Sheng, Zhu Shukai, et al. Genesis and composition of ‘baseline hump’ in biodegraded oil samples from Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 317-325.
- [19] 董田,何生,林社卿.泌阳凹陷核桃园组烃源岩有机地化特征及热演化成熟史[J].石油实验地质,2013,35(2):187-194.
Dong Tian, He Sheng, Lin Sheqing. Organic geochemical characteristics and thermal evolution maturity history modeling of source rocks in Eocene Hetaoyuan Formation of Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2): 187-194.
- [20] De Grande S M B, Aquino Neto F R, Mello M R. Extended tricyclic terpanes in sediments and petroleum [J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7): 1039-1047.
- [21] Ourisson G, Albrecht P, Rohmer M. Predictive microbial biochemistry: from molecular fossils to prokaryotic membranes [J]. Trends in Biochemical Sciences, 1982, 7(7): 236-239.
- [22] Volkman J K, Banks M R, Denwer K, et al. Biomarker composition and depositional setting Tasmanite oil shale from northern Tasmania, Australia [C]. Paris: 14th International Meeting on Organic Geochemistry, 1989: 18-22.
- [23] Revill A T, Volkman J K, O’leary T, et al. Hydrocarbon biomarkers, thermal maturity and depositional setting of tasmanite oil shales from Tasmania, Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(18): 3803-3822.
- [24] Behrens A, Schaeffer P, Bernasconi S, et al. 17(E)-13 α (H)-Malabarica-14(27), 17, 21-triene, an unexpected tricyclic hydrocarbon in sediments [J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(5): 379-383.
- [25] 陈建平,梁狄刚,王绪龙,等.彩南油田多源混合原油油源(三):油源的地质、地球化学分析[J].石油勘探与开发,2003,30(6):41-44.
Chen Jianping, Liang Digang, Wang Xulong, et al. Oil-source correlation of mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan Oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part III: Geological and geochemical analysis of possible oil sources in the Cainan Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 41-44.
- [26] 郝芳,邹华耀,方勇,等.断-压双控流体流动与油气幕式快速成藏[J].石油学报,2004,25(6):38-43.
Hao Fang, Zou Huayao, Fang Yong, et al. Overpressure-fault controlled fluid flow and episodic hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 38-43.
- [27] 张水昌,龚再升,梁狄刚,等.珠江口盆地东部油气系统地球化学-I:油组划分、油源对比及混源油确定[J].沉积学报,2004,22(增刊):15-26.
Zhang Shuichang, Gong Zaisheng, Liang Digang, et al. Geochemistry of petroleum systems in the eastern Pearl River Mouth Basin-I: oil family classification, oil-source correlation and mixed oil analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(S): 15-26.
- [28] 包建平,朱翠山,倪春华.北部湾盆地不同凹陷原油生物标志物分布与组成特征[J].沉积学报,2007,25(4):646-652.
Bao Jianping, Zhu Cuishan, Ni Chunhua, et al. Distribution and composition of biomarkers in crude oils from different sags of Beibuwan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 646-652.
- [29] 马中远,黄苇,李婧婧,等.塔中北坡SH9井区柯坪塔格组下段原油地球化学特征[J].石油实验地质,2013,35(5):559-563.
Ma Zhongyuan, Huang Wei, Li Jingjing, et al. Geochemical characteristics of crude oil from lower Kalpintag Formation in SH9 well area, northern slope of middle Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 559-563.
- [30] 路清华,邵志兵,贾存善,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系原油成因特征分析[J].石油实验地质,2013,35(3):320-324.
Lu Qinghua, Shao Zhibing, Jia Cunshan, et al. Genesis features of crude oil in Ordovician, Yubei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 320-324.
- [31] 王大锐.油气稳定同位素地球化学[M].北京:石油工业出版社,2000:146-244.
Wang Darui. Oil and gas stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 146-244.
- [32] 梅玲,张枝焕.南堡凹陷原油芳烃地球化学特征[J].石油天然气学报,2009,31(2):11-15.
Mei Ling, Zhang Zhihuan. Aromatic geochemical characteristics of crude oil of beach area in Nanpu Sag [J]. Journal of Oil & Gas Technology, 2009, 31(2): 11-15.
- [33] 陈斯忠,张明辉,张俊达.珠江口盆地东部油气生成与勘探[J].石油与天然气地质,1991,12(2):95-106.
Chen Sizhong, Zhang Minghui, Zhang Junda. Study on oil and gas generation and exploration in eastern Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1991, 12(2): 95-106.
- [34] 朱伟林,张功成,高乐.南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J].石油学报,2008,29(1):1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [35] 李友川,陶维祥,孙玉梅,等.珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征[J].石油学报,2009,30(6):830-834.
Li Youchuan, Tao Weixiang, Sun Yumei, et al. Classification and distribution of oil in Huizhou Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 830-834.

(编辑 徐文明)