

doi:10.3799/dqkx.2015.098

# 珠 I 坳陷油源对比及恩平组烃源岩的相对贡献

国朋飞<sup>1</sup>, 何生<sup>1\*</sup>, 柴德蓉<sup>1</sup>, 殷世艳<sup>2</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 河北联合大学矿业工程学院, 河北唐山 063009

**摘要:** 恩平组烃源岩成藏贡献研究对于拓展珠 I 坳陷勘探新领域以及发现新的储量具有重要的应用价值, 目前相关研究较少。在油源对比的基础上, 将生标绝对含量与端元油配比实验相结合, 研究了珠 I 坳陷恩平组烃源岩对单井油样的相对贡献。油源对比结果指示, 研究区原油可分为 3 类: 第 1 类源自始新统文昌组中深湖相烃源岩, 主要分布在惠陆低凸起、番禺 4 洼、流花凸起等地区; 第 2 类源自始新统一渐新统恩平组湖沼相烃源岩, 仅分布在惠州凹陷北部; 第 3 类为混源油, 发现于惠州凹陷南部和恩平凹陷。甾萜类绝对含量等 7 个指标建立的混源比例图版适用于计算油样中前两类烃源岩的相对贡献。计算结果表明, 文昌组烃源岩是珠 I 坳陷的主力烃源岩, 恩平组烃源岩仅对惠州凹陷和恩平凹陷中的部分油样存在贡献。

**关键词:** 油源对比; 恩平组; 相对贡献; 端元油配比实验; 珠 I 坳陷; 石油地质; 地球化学。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2015)07-1177-10

收稿日期: 2014-11-18

## Oil-Source Correlation and Relative Contribution of Source Rock from Enping Formation in Zhu I Depression

Guo Pengfei<sup>1</sup>, He Sheng<sup>1\*</sup>, Chai Derong<sup>1</sup>, Yin Shiyan<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

**Abstract:** Study of the contribution from Enping Formation to oil accumulation in Zhuyi depression has an important application value to the enlargement of exploration area and the discovery of new reserves, and the related research is less. In this paper, the correlation of oil and source rock in Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin is discussed first, and then the relative contribution of source rock in the Eocene to Oligocene Enping Formation (Ee) was investigated by combining end-member oil mixing experiment and biomarkers absolute concentrations. Oil-source correlation results show that the oils in Zhu I depression can be divided into three classes. The first class derived from Eocene deep-water lacustrine Wenchang Formation (Ew) mainly distributes in Huilu low uplift, Panyu 4 sag and Liuhua uplift, etc. The second class derived from the Ee distributes only in the northern of Huizhou sag. The third class (mixed oils) derived from both the Ew and the Ee distributes in the southern of Huizhou sag and Enping sag. End-member oil mixing experiment shows that the plate established by concentration and geochemical indexes, such as steranes and terpanes concentration, was suitable to indicate the relative contribution of two types of source rock in Zhu I depression. Results show that mudstones in the Ew was the main source rock in Zhu I depression, the relative contribution of the Ee is only appear in the Huizhou sag and Enping sag.

**Key words:** oil-source correlation; Enping Formation; relative contribution; end-member oil mixing experiment; Zhu I depression; petroleum geology; geochemistry.

**基金项目:** 高等学校学科创新引智计划资助项目(No.B14031); 国家自然科学基金项目(No.41072093)。

**作者简介:** 国朋飞(1988-), 男, 在读博士生, 主要从事石油地质、油气地球化学方面的研究工作。E-mail: guopengfei1218@sina.com

\* **通讯作者:** 何生, E-mail: shenghe@cug.edu.cn

**引用格式:** 国朋飞, 何生, 柴德蓉, 等, 2015. 珠 I 坳陷油源对比及恩平组烃源岩的相对贡献. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1177-1186.

含油气盆地常发育多套烃源岩层系,不同烃源岩生成的原油混合形成混源油,确定混源油中不同烃源岩的相对贡献是油气勘探的研究热点.目前,主要利用油源碳同位素组成、生标组成特征及绝对含量、端元油配比实验等方法对混源油进行定量研究(Peters *et al.*, 1989; Arouri and Mckirdy, 2005; 张敏等, 2007).由于构造条件、气候环境的影响,不同烃源岩的碳同位素组成常存在差异.因此,碳同位素组成可指示混源油中不同烃源岩的相对贡献(Peters *et al.*, 1989; Hughes and Dzou, 1995; 王文军等, 1999; 陈建平等, 2004).对于碳同位素组成差异较小的烃源岩,可利用油源生标组成特征及其绝对含量进行混源油定量研究.三环二萜、五环三萜、甾烷、类异戊二烯烃等生标组成特征曾被用于揭示不同盆地中的油气混源现象(Dzou *et al.*, 1999; Peters *et al.*, 1999; 侯读杰, 2000; 李素梅等, 2002, 2011; Pan *et al.*, 2007);生标绝对含量可以指示原油的混源比例,其有效性已被塔里木盆地海相油气、渤海湾盆地陆坳油田多源多期混源油等研究实例证明(陈建平等, 2007; 张敏等, 2007; 吕慧等, 2009).此外,端元油配比实验作为一种模拟混合实验也被用于混源油研究.该方法首先将端元油(单一烃源岩生成的原油)按照一定的比例混合,然后建立混源比例图版,最后利用该图版计算烃源岩的相对贡献(Zhang *et al.*, 2003).Arouri and Mckirdy(2005)曾用该方

法分析了澳大利亚 Eromanga 盆地中二叠系和侏罗系烃源岩的相对贡献.国内学者也利用端元油配比实验研究了不同地区混源油中烃源岩的相对贡献,并详细讨论了该方法的适用性(Zhang *et al.*, 2003; 宋孚庆等, 2004; 张水昌等, 2004; 梁宏斌等, 2005; 陶国亮等, 2010).

珠 I 坳陷发育了两套烃源岩层系,即始新统文昌组烃源岩和始新统一渐新统恩平组烃源岩(朱伟林等, 2008).文昌组烃源岩主要为中深湖相暗色泥岩,是珠 I 坳陷的主要烃源岩;恩平组烃源岩主要为湖沼相含煤泥岩,是珠 I 坳陷的重要烃源岩(Zhang *et al.*, 2004; 邵磊等, 2005; 朱俊章等, 2007a, 2007b; 李友川等, 2009).恩平组烃源岩的相对贡献一直是该区的研究热点和难点.Zhang *et al.*(2003)对珠 I 坳陷油源进行详细研究后认为,恩平组烃源岩对惠州凹陷内的油藏具有重要贡献,且其生成的原油不容易被识别.为了进一步评价恩平组烃源岩的相对贡献,本文将生标组成特征、绝对含量和端元油配比实验结合起来研究了珠 I 坳陷的油源关系及恩平组烃源岩的相对贡献.

## 1 区域地质概况

珠 I 坳陷是珠江口盆地的次级坳陷之一.珠江口盆地位于太平洋板块、欧亚板块和印度板块交汇的南

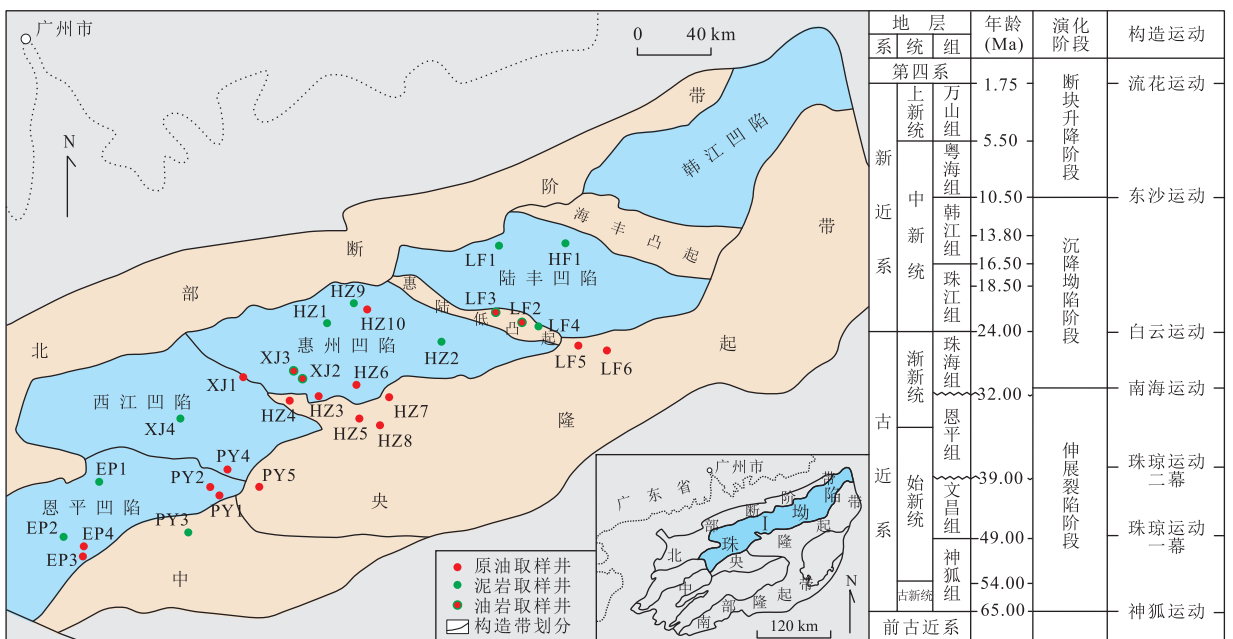


图 1 珠 I 坳陷位置、构造单元及油岩样品取样井位

Fig.1 Location, tectonic units and sampled wells of Zhu I depression

海北部,可划分为5个一级构造单元,即北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带(王善书,1982)。珠I坳陷位于北部坳陷带东北部,包括韩江、陆丰、惠州、西江、恩平等凹陷。新生代以来,珠I坳陷主要经历了神狐运动、珠琼运动、南海运动、白云运动、东沙运动、流花运动等构造运动(吴娟,2013)。构造运动以珠海组沉积期为分界线分为古近纪张裂阶段和新近纪裂后阶段(陈维涛等,2012)。

在特殊的构造背景下,珠I坳陷相继发育了陆相湖盆沉积、海陆过渡相沉积和海相沉积。古新统神狐组、始新统一渐新统文昌组和恩平组为陆相湖盆沉积,渐新统珠海组为海陆过渡相沉积,中新统珠江组及上覆地层主要为海相沉积(王福国等,2008)。文昌组(Ew)沉积时,断裂活动强烈,盆地整体下沉,湖水较深,中深湖相沉积占据重要地位,形成了以暗色泥岩为主的中深湖相烃源岩;文昌组浅湖相泥岩沉积时,湖水分层难以形成,沉积环境偏氧化,有机质保存条件较差。因此,文昌组烃源岩主要为中深湖相暗色泥岩。恩平组(Ee)沉积时,湖盆断裂及沉降缓慢,湖水较浅,湖沼相和浅湖相沉积广泛分布,形成了以含煤泥岩为主的湖沼相烃源岩(马宁等,2012)。珠I坳陷的位置、构造单元及油岩样品取样井位如图1所示。

## 2 样品与实验

### 2.1 原油及泥岩样品

本研究所用原油及泥岩样品均取自珠I坳陷,其中原油取自20口井,共23个样品;烃源岩取自14口井,共40余块样品。原油样品主要分布在惠陆低凸起、惠州凹陷及南缘、番禺低隆起、恩平凹陷等地区,泥岩样品主要取自惠州凹陷、恩平凹陷、陆丰凹陷和西江凹陷。原油及泥岩样品的取样井位如图1所示。

### 2.2 实验方法

配比实验中,按照不同的比例分别取适量的端元油,配比比例有8:0、7:1、6:2、5:3、4:4、3:5、2:6、1:7和0:8(体积比、文昌组端元油在前),利用超声水浴将原油混合均匀。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30~40 mg原油或泥岩抽提物溶于50 mL正己烷,静置12 h;过滤除去沥青质,滤液浓缩至5 mL;移入层析柱,分别用正己烷、二氯甲烷和正己烷混合液、无水乙醇、氯仿冲洗出饱和烃、芳烃和胶质3种族组分。取适量饱和烃族组分,利用孔径为0.5 nm的分子筛脱除正构烷烃。生标绝对定量中

使用的标准物质为四氘代C<sub>27</sub>-胆甾烷(饱和烃定量)和氘代蒾(芳烃定量)。

饱和烃气相色谱(GC)和饱和烃气-质谱(GC-MS)测试分别由Agilent 7890A气相色谱仪和Agilent 7890A-5975C气-质联用仪完成,实验条件按国家标准设定。饱和烃(脱除正构烷烃)全二维气相色谱-飞行时间质谱(GC×GC-TOFMS)测试由Leco Pegasus IV全二维气-质联用仪完成。升温程序:一维初温为60℃(停留1 min),以2℃/min升高到310℃(停留30 min);二维初温为70℃(停留1 min),以2℃/min升高到320℃(停留30 min);调制周期为6 s,载气(高纯He)流速为1.2 mL/min,不分流进样。

## 3 结果与讨论

### 3.1 油源对比

**3.1.1 源岩对比** 珠I坳陷文昌组中深湖相暗色泥岩(文昌组烃源岩)和恩平组湖沼相含煤泥岩(恩平组烃源岩)的有机质类型、TOC(全称total organic carbon)丰度均存在明显差异。文昌组烃源岩有机质类型为II<sub>1</sub>~I型,恩平组烃源岩为II<sub>2</sub>~III型;文昌组TOC平均值为2.80%(11口井,191个数据),恩平组TOC平均值为3.68%(34口井,820个数据),两套烃源岩的热解数据如图2所示。文昌组和恩平组烃源岩的倍半萜烷、三环萜烷、规则甾烷、双杜松烷等生标组成亦存在明显差异,两套烃源岩的不同地化参数如表1所示。文昌组暗色泥岩Pr/Ph、

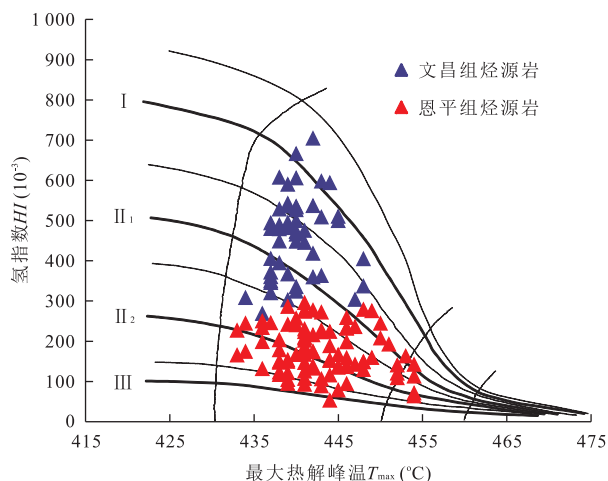


图2 珠I坳陷文昌组与恩平组烃源岩热解数据对比  
Fig.2 Rock evaluation data of source rocks from the Ew and Ee in Zhu I depression

表 1 珠 I 坳陷文昌组与恩平组烃源岩地球化学参数对比

Table 1 Geochemical parameters comparison of source rock from the Ew and Ee in Zhu I depression

| 烃源岩 | 凹陷   | TOC  | Pr/Ph | TeT/C <sub>30</sub> H | C <sub>27</sub> S/C <sub>29</sub> S | C <sub>19</sub> ~C <sub>22</sub> TT/<br>C <sub>23</sub> ~C <sub>26</sub> TT | Bi/C <sub>30</sub> H | C <sub>30</sub> S/C <sub>29</sub> S |
|-----|------|------|-------|-----------------------|-------------------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|
| 恩平组 | 陆丰凹陷 | 1.75 | 4.40  | 0.08                  | 0.74                                | 1.76  | 0.06                 | 0.22                                |
|     | 惠州凹陷 | 5.12 | 3.15  | 0.16                  | 0.55                                | 3.32  | 0.91                 | 0.15                                |
|     | 西江凹陷 | 2.32 | 2.45  | 0.08                  | 0.53                                | 1.82  | 0.72                 | 0.14                                |
|     | 恩平凹陷 | 3.23 | 2.72  | 0.11                  | 0.64                                | 2.37  | 2.66                 | 0.15                                |
|     | 平均值  | 3.68 | 3.27  | 0.12                  | 0.60                                | 2.55  | 0.97                 | 0.16                                |
| 文昌组 | 陆丰凹陷 | 2.42 | 3.43  | 0.05                  | 0.75                                | 0.94  | 0.05                 | 0.34                                |
|     | 西江凹陷 | 4.56 | 2.17  | 0.05                  | 0.76                                | 1.73  | 0.22                 | 0.15                                |
|     | 恩平凹陷 | 1.30 | 1.10  | 0.14                  | 1.00                                | 1.22  | 0.57                 | 0.19                                |
|     | 平均值  | 2.80 | 2.63  | 0.06                  | 0.80                                | 1.22  | 0.20                 | 0.26                                |

注: TeT. 四环萜烷; H. 藿烷; S. 规则甾烷; TT. 三环萜烷; Bi. 双杜松烷; C<sub>30</sub>S. C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷.

四环萜烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>27</sub>-规则甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷、C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷和 C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷分别为 2.63、0.06、0.80、1.22、0.20 和 0.26.文昌组中深湖相泥岩 Pr 相对 Ph 具有微弱优势, C<sub>27</sub>~C<sub>29</sub>- $\alpha\alpha\alpha$ 20R-规则甾烷呈“V”字型分布, 富含 C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷, C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷相对含量较 C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷高, C<sub>24</sub>-四环萜烷相对含量较低, 几乎不含双杜松烷.恩平组烃源岩 Pr 相对 Ph 具有明显优势, C<sub>27</sub>~C<sub>29</sub>- $\alpha\alpha\alpha$ 20R-规则甾烷呈反“L”型分布, 几乎不含 C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷, C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷、C<sub>24</sub>-四环萜烷相对含量较高, C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷相对含量较低, 富含双杜

松烷.恩平组烃源岩 Pr/Ph、四环萜烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>27</sub>-规则甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷、C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷和 C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷分别为 3.27、0.12、0.60、2.55、0.97 和 0.16.

3.1.2 原油分类 不同化合物的绝对含量是有效的原油分类指标(张敏等, 2007; 吕慧等, 2009). 利用 C<sub>14</sub>~C<sub>16</sub>-倍半萜烷、补身烷、C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷、双杜松烷等生标的绝对含量可将珠 I 坳陷的原油区分为 3 类, 分类结果见图 3. 第 1 类原油包括 LF2、LF3、LF5、LF6、HZ4、HZ8、PY1、PY2、PY4、PY5 等油样, 其密度和粘度平均值分别为 0.89 g/cm<sup>3</sup> 和

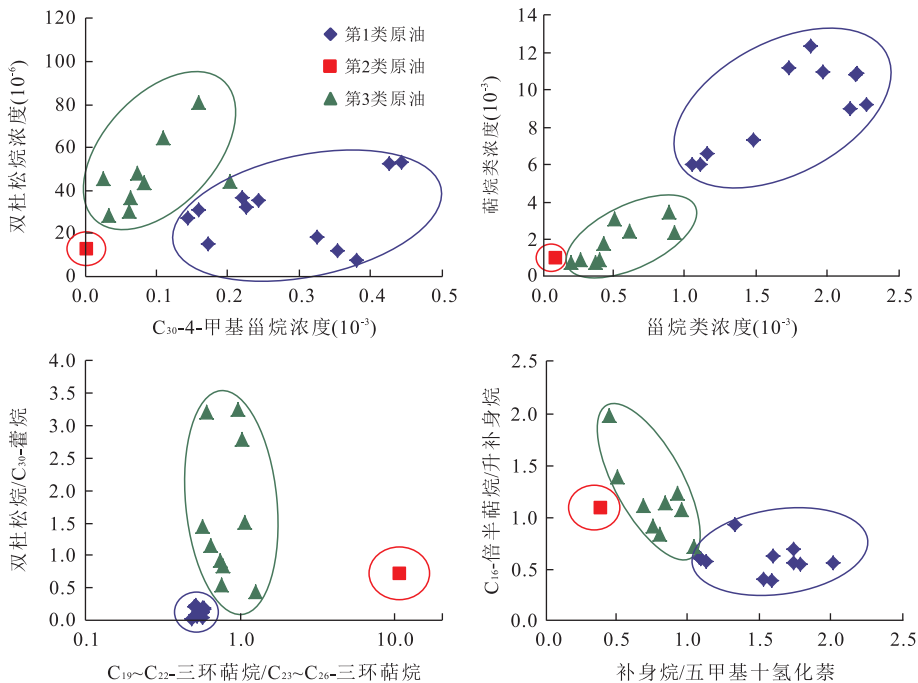


图 3 珠 I 坳陷原油生标绝对含量及组成特征对比

Fig.3 Biomarker concentrations and composition features of oils in Zhu I depression

表2 珠I坳陷3类原油不同生标绝对含量平均值对比( $10^{-3}$ )

Table 2 Main biomarker concentrations of the three oil classes in Zhu I depression

| 项目    | 正构烷烃   | 倍半萜烷 | 五环三萜 | 甾烷   | 三环萜烷 | C <sub>30</sub> -4-甲基甾烷 | 双杜松烷  |
|-------|--------|------|------|------|------|-------------------------|-------|
| 第1类原油 | 331.18 | 2.85 | 8.39 | 1.17 | 0.69 | 0.29                    | 0.030 |
| 第2类原油 | 479.06 | 1.62 | 0.81 | 0.09 | 0.18 | 痕量                      | 0.013 |
| 第3类原油 | 499.02 | 2.68 | 2.23 | 0.46 | 0.29 | 0.14                    | 0.050 |

表3 珠I坳陷3类原油地球化学参数对比

Table 3 Geochemical parameters comparison of the three oil classes in Zhu I Depression

| 原油种类 | 构造位置   | Pr/Ph | C <sub>19</sub> ~C <sub>22</sub> /<br>C <sub>23</sub> ~C <sub>26</sub> TT | C <sub>19</sub> TT/<br>C <sub>23</sub> TT | TT/PT | C <sub>30</sub> DH/C <sub>30</sub> H | C <sub>30</sub> S/C <sub>29</sub> S | Bi/C <sub>30</sub> H |
|------|--------|-------|---|---|-------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 第1类  | 惠州凹陷南缘 | 2.68  | 0.51  | 0.35                                      | 0.18  | 0.10                                 | 1.43                                | 0.22                 |
|      | 惠陆低凸起  | 2.23  | 0.58  | 0.48                                      | 0.14  | 0.15                                 | 0.75                                | 0.15                 |
|      | 番禺低隆起  | 1.56  | 0.53  | 0.32                                      | 0.19  | 0.10                                 | 1.05                                | 0.05                 |
|      | 平均值    | 2.12  | 0.55  | 0.40                                      | 0.17  | 0.12                                 | 0.98                                | 0.13                 |
| 第3类  | 恩平凹陷   | 2.53  | 0.84  | 1.19                                      | 0.31  | 0.11                                 | 1.65                                | 1.54                 |
|      | 惠州凹陷南缘 | 2.44  | 0.81  | 0.75                                      | 0.39  | 0.22                                 | 0.98                                | 1.47                 |
|      | 平均值    | 2.47  | 0.81  | 0.87                                      | 0.37  | 0.19                                 | 1.16                                | 1.49                 |
| 第2类  | 惠州凹陷北部 | 4.83  | 10.79   | 21.76                                     | 0.30  | 0.15                                 | 0.08                                | 0.71                 |

注: TT, 三环萜烷; PT, 五环萜烷; DH, 重排藿烷; H, 藿烷; C<sub>30</sub>S, C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷; S, 规则甾烷; Bi, 双杜松烷。

26.61 mPa·s, 主要分布在惠陆低凸起、番禺4洼等地区; 第2类原油仅有HZ10油样, 其密度和粘度平均值分别为0.78 g/cm<sup>3</sup>和3.00 mPa·s, 分布于惠州凹陷北部; 第3类原油包括XJ1、XJ2、XJ3、HZ3、HZ5、HZ6、HZ7、EP3、EP4等油样, 其密度和粘度平均值分别为0.84 g/cm<sup>3</sup>和15.46 mPa·s, 主要分布在惠州凹陷南部和恩平凹陷。3类原油中不同生标的绝对含量如表2所示。第1类原油的生标绝对含量远高于第2类, 其倍半萜烷浓度为 $2.850 \times 10^{-3}$ , 甾萜类为 $10.250 \times 10^{-3}$ , 三环萜烷为 $0.690 \times 10^{-3}$ , C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷为 $0.290 \times 10^{-3}$ , 双杜松烷为 $0.030 \times 10^{-3}$ ; 第2类原油中倍半萜烷、甾萜类、三环萜烷和双杜松烷的绝对含量分别仅为 $1.620 \times 10^{-3}$ 、 $1.080 \times 10^{-3}$ 、 $0.180 \times 10^{-3}$ 和 $0.013 \times 10^{-3}$ , C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷几乎没有检出(痕量)。除正构烷烃和双杜松烷外, 第3类原油中生标的绝对含量介于前2类原油之间。

珠I坳陷中不同种类原油的生标组成也存在显著差异, 3类原油的地化参数对比见表3。第1类原油的Pr/Ph、C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、C<sub>19</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>-三环萜烷、三环萜烷/五环萜烷、C<sub>30</sub>-重排藿烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷和双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷分别为2.12、0.55、0.40、0.17、0.12、0.98和0.13。这类原油中C<sub>27</sub>~C<sub>29</sub>- $\alpha\alpha\alpha$ 20R-规则甾烷呈“V”字型分布, C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷和补身烷系列相对丰富, C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷相对含量低于C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷, C<sub>24</sub>-四环萜烷相对含量

低于C<sub>26</sub>-三环萜烷, C<sub>16</sub>-倍半萜烷与8 $\beta$ (H)-升补身烷的比值较小, 几乎不含双杜松烷。第2类原油富含三环萜烷、五甲基十氢化萜和双杜松烷, 补身烷系列相对含量较低, 几乎不含C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷, C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷相对C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷丰富, C<sub>24</sub>-四环萜烷相对含量远高于C<sub>26</sub>-三环萜烷。这类原油的Pr/Ph、C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、C<sub>19</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>-三环萜烷、三环萜烷/五环萜烷、C<sub>30</sub>-重排藿烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷和双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷分别为4.83、10.79、21.76、0.30、0.15、0.08和0.71。第3类原油的Pr/Ph、C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、C<sub>19</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>-三环萜烷、三环萜烷/五环萜烷、C<sub>30</sub>-重排藿烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷和双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷分别为2.47、0.81、0.87、0.37、0.19、1.16和1.49, 这些参数值多介于前两类原油之间。

**3.1.3 油源对比** 根据两套烃源岩和3类原油的生标组成特征, 筛选出C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、C<sub>19</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>-三环萜烷、双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷、姥鲨烷/植烷、三环萜烷/五环萜烷、C<sub>30</sub>-重排藿烷/C<sub>30</sub>-藿烷和C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷等有效的油源对比指标。其中C<sub>19</sub>~C<sub>22</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>~C<sub>26</sub>-三环萜烷、C<sub>19</sub>-三环萜烷/C<sub>23</sub>-三环萜烷、双杜松烷/C<sub>30</sub>-藿烷、C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷/C<sub>29</sub>-规则甾烷、三环萜烷/五环萜烷等指标可反映烃源岩有机质的来源, 姥鲨烷/植烷指示烃源岩沉积环境的氧化还原性, C<sub>30</sub>-重排

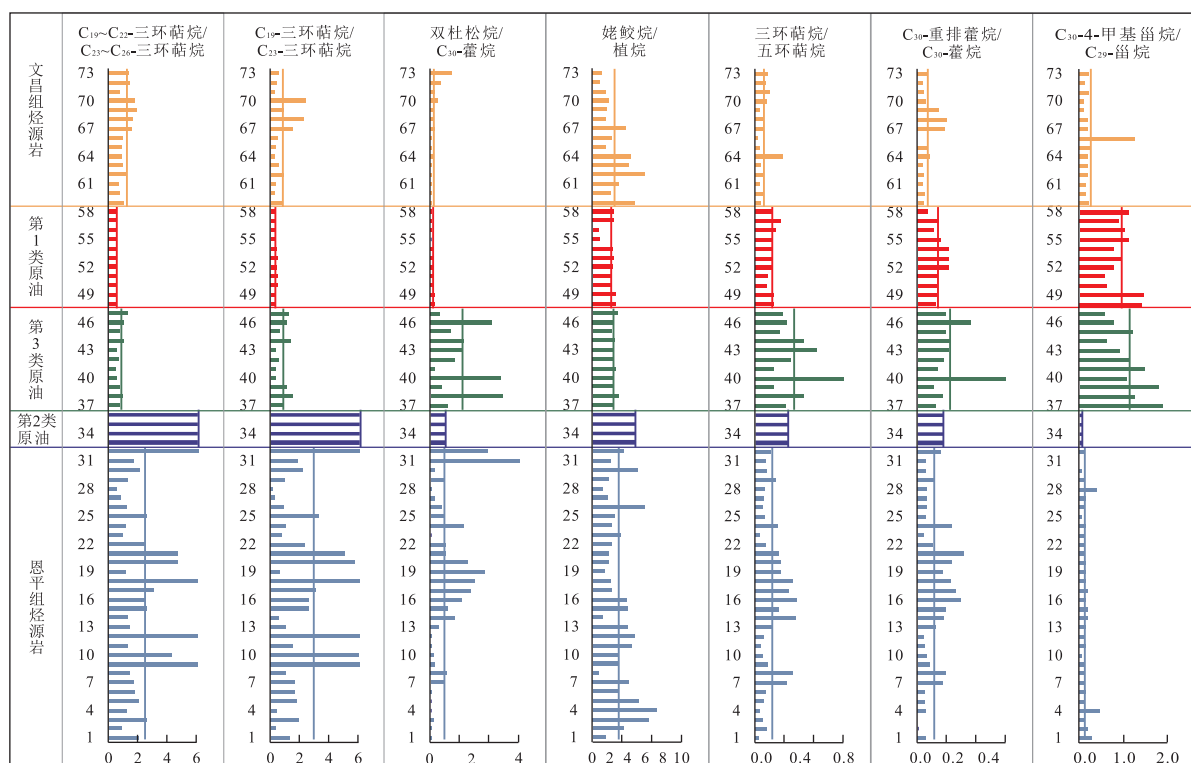


图 4 珠 I 坳陷原油与烃源岩对比

Fig.4 Oil-source correlation of Zhu I depression

横坐标代表地球化学参数值,纵坐标代表不同的油岩样品

藿烷/ $C_{30}$ -藿烷则是成熟度和烃源岩有机质输入指标. 珠 I 坳陷油源对比如图 4 所示.

文昌组烃源岩和第 1 类原油的  $C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷/ $C_{23} \sim C_{26}$ -三环萜烷、 $C_{19}$ -三环萜烷/ $C_{23}$ -三环萜烷、双杜松烷/ $C_{30}$ -藿烷、姥鲛烷/植烷、三环萜烷/五环萜烷、 $C_{30}$ -重排藿烷/ $C_{30}$ -藿烷的地化参数低于恩平组烃源岩和第 2 类原油,  $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷则高于后者, 第 3 类原油介于前两类原油之间. 这表明, 第 1 类原油产自文昌组中深湖相烃源岩, 第 2 类原油产自恩平组湖沼相烃源岩, 第 3 类原油则兼有两套烃源岩的贡献, 为混源油. 第 2 类和第 3 类原油(混源油)的存在指示恩平组湖沼相烃源岩具有一定的生烃潜力. 下面利用端元油配比实验建立混源比例图版, 定量研究两类烃源岩对不同地区油藏的相对贡献.

### 3.2 恩平组烃源岩的相对贡献

**3.2.1 端元油** 油源对比结果表明, HZ8A 油样来自文昌组中深湖相烃源岩, HZ10 油样来自恩平组湖沼相烃源岩. 为了确定这两个油样是否可以作为端元油, 利用全二维气相色谱-飞行时间质谱(GC×GC-TOFMS)对其饱和烃馏分(脱除正构烷烃)进行了详细分析, 分析结果如图 5 所示. 明显地,

端元油 HZ8A 含有更多的三环萜烷、四环甾烷、五环萜烷等生标, 其甾萜类绝对含量为  $10.20 \times 10^{-3}$ , 端元油 HZ10 甾萜类绝对含量仅为  $1.08 \times 10^{-3}$ . 物理性质上, 前者为正常原油, 密度和粘度约为  $0.89 \text{ g/cm}^3$  和  $37.00 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 碳同位素组成为  $-26.6\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ , 下同); 后者为轻质油, 密度和粘度仅为  $0.78 \text{ g/cm}^3$  和  $3.00 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 碳同位素组成为  $-28.4\text{‰}$ , 差别明显. 生标组成上, HZ8A 油样富含指示湖相藻类有机质输入的  $C_{30}$ -4-甲基甾烷、 $C_{27}$ -规则甾烷、 $C_{23} \sim C_{26}$ -三环萜烷和  $C_{14} \sim C_{16}$ -补身烷, 姥植比较小; HZ10 油样则富含指示陆源高等植物输入的  $C_{24}$ -四环萜烷、双杜松烷、 $C_{29}$ -规则甾烷、 $C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷和五甲基十氢化萘, 姥植比较高.

此外, 珠 I 坳陷油气充注期主要为中中新世韩江组沉积时期(16.4~10.0 Ma)和晚中新世粤海组沉积时期(10.0~5.5 Ma), 持续时间均较短, 且以第 2 期充注为主(吴娟, 2013). 油气充注期内同一烃源岩生成的原油成熟度差异较小, 且端元油 HZ8A 和 HZ10 在油气充注期内持续接受原油充注. 因此, 端元油 HZ8A 和 HZ10 的成熟度与两套烃源岩生成原油的平均成熟度相一致. 生标组成特征、绝对含量、物性、成熟度等的对比分析表明, HZ8A 和

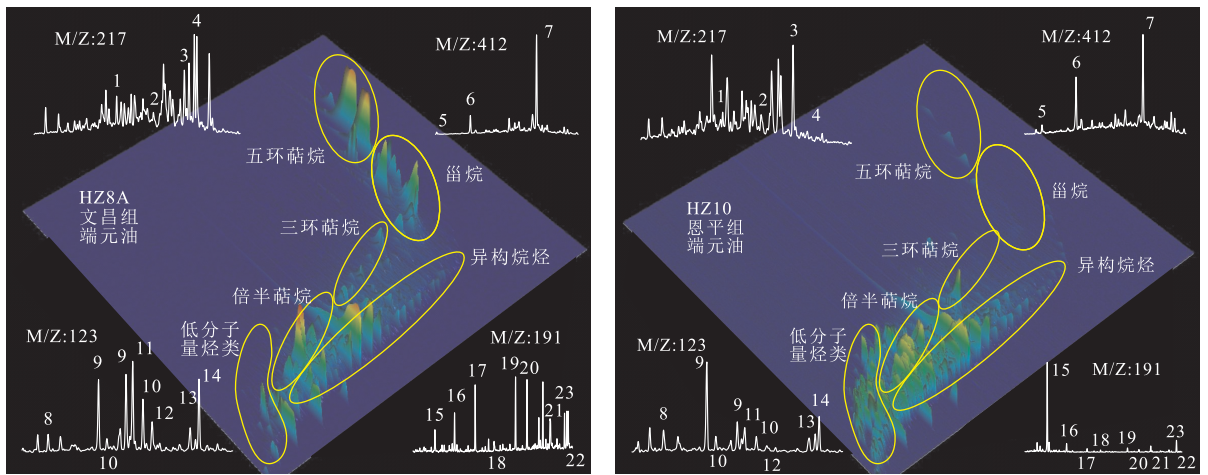


图 5 珠 I 坳陷端元油饱和烃组成(脱除正构烷烃)全二维气相色谱—飞行时间质谱对比

Fig.5 Composition comparison of saturated hydrocarbons (without normal-alkanes) of two end-member oils in Zhu I depression using GC×GC-TOFMS total ion chromatogram

1.  $C_{27}aaa$  20R-规则甾烷; 2.  $C_{28}aaa$  20R-规则甾烷; 3.  $C_{29}aaa$  20R-规则甾烷; 4.  $C_{30}$ -4-甲基甾烷; 5, 6. 双杜松烷; 7.  $C_{30}$ -藿烷; 8.  $C_{14}$ -倍半萜烷; 9. 五甲基十氢化萜; 10.  $C_{15}$ -倍半萜烷; 11.  $8\beta$ (H)-补身烷; 12.  $8\alpha$ (H)-补身烷; 13.  $C_{16}$ -倍半萜烷; 14.  $8\alpha$ (H)-升补身烷; 15~18.  $C_{19}$ ~ $C_{22}$ -三环萜烷; 19~22.  $C_{23}$ ~ $C_{26}$ -三环萜烷; 23.  $C_{24}$ -四环萜烷

HZ10 油样可分别代表文昌组烃源岩和恩平组烃源岩生成的原油,即端元油。

**3.2.2 混源比例图版** 配比实验中笔者共设置了 9 个不同比例(体积比)混合的原油, HZ8A; HZ10 分别为 8:0、7:1、6:2、5:3、4:4、3:5、2:6、1:7、0:8。混合原油利用 GC-MS 测试其生标组成, 计算不同的地化参数和不同生标的绝对含量。笔者对比分析发现, 甾萜类绝对含量、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷绝对含量、补身烷绝对含量、补身烷/五甲基十氢化萜、氧芴/硫芴、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷和  $nC_{21-}/nC_{22+}$  随着配比比例呈现规律性的变化趋势。甾萜类绝对含量、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷绝对含量、补身烷绝对含量、补身烷/五甲基十氢化萜和  $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷这 5 个指标随着文昌组端元油中混入恩平组端元油比例的增加, 呈现出逐渐减小的趋势, 氧芴/硫芴和  $nC_{21-}/nC_{22+}$  这两个指标则呈现出逐渐增大的趋势(图 6)。这些参数可较好地指示两套烃源岩及其生成原油的地化特征, 且这些指标呈现近似线性的变化趋势( $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷除外), 受成熟度干扰较弱, 是确定混源比例的良好指标。

随着文昌组端元油中混入的恩平组端元油的量逐渐增加时, 配比原油中甾萜类生标的绝对含量由  $10.200 \times 10^{-3}$  减小到  $1.080 \times 10^{-3}$ ,  $C_{30}$ -4-甲基甾烷由  $0.427 \times 10^{-3}$  减小到  $0.003 \times 10^{-3}$ , 补身烷系列由  $1.094 \times 10^{-3}$  减小到  $0.358 \times 10^{-3}$ ,  $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷由 1.45 减小到 0.08, 补身烷/五甲基十

氢化萜由 3.57 减小到 0.91。氧芴/硫芴由 1.30 增大到 3.14,  $C_{16}$ -倍半萜/升补身烷则由 0.57 增加到 1.09,  $nC_{21-}/nC_{22+}$  由 0.81 增大到 2.35。双杜松烷/ $C_{30}$ -藿烷由 0.23 增加到 0.72。为了在图 6 中将各参数的变化区间纳入一个区间, 实际绘制混源比例图版时, 采用甾萜类生标绝对含量  $\times 1.15$ 、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷绝对含量  $\times 19.00$ 、补身烷绝对含量  $\times 4.39$ 、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷  $\times 3.00$  和  $nC_{21-}/nC_{22+} \times 0.86$  的方式, 将不同的参数放大或缩小, 配比实验油样和其他原油样品均做同样的处理。这样便绘制出珠 I 坳陷原油混源比例指示图版, 如图 6 所示。该图版横坐标为恩平组端元油在混源油中所占的比例, 纵坐标为地球化学参数值和生物标志化合物绝对含量。利用该图版研究恩平组烃源岩的贡献时, 分别计算出 7 个混源指标指示的贡献值, 取平均值作为该油样的最终计算结果。此外, 双杜松烷/ $C_{30}$ -藿烷是补充性的混源指示参数, 当参数值  $< 0.23$  时, 指示原油全部来自文昌组中深湖相烃源岩, 当参数值异较高时(如  $> 1.00$  时), 原油中恩平组烃源岩的相对贡献则由混源比例图版确定。

**3.2.3 相对贡献** 为了研究珠 I 坳陷不同单井油样中两类烃源岩的相对贡献, 计算了每个油样中 7 个混源参数的值。HZ4、HZ8B、LF2、LF3、LF5、LF6、PY1、PY2、PY4、PY5 这 10 口井的 12 个油样中, 双杜松烷(W、T)含量非常低, 其双杜松烷/ $C_{30}$ -藿烷参数值均低于 0.23。综合对比认为, 上述油样中没有恩平

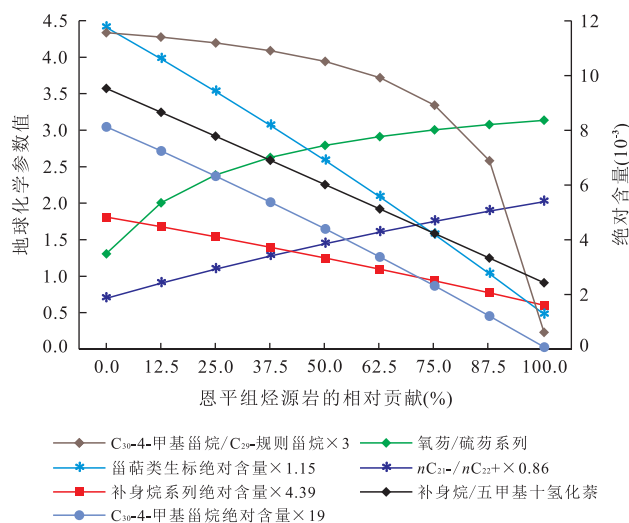


图 6 珠 I 坳陷原油混源比例图版

Fig.6 Mixing ratio plate of oils in Zhu I depression

组烃源岩的贡献,全部来自文昌组烃源岩。HZ10 油样来自恩平组烃源岩,其中没有文昌组湖相烃源岩的贡献。EP3、EP4、HZ5、HZ6、HZ7、XJ1、XJ2、XJ3 这 8 口井 9 个油样均表现出混源的特征,即文昌组和恩平组烃源岩对这些原油都有贡献。恩平凹陷中,EP4、EP3A 和 EP3B 油样中文昌组烃源岩的相对贡献分别为 80%、68% 和 40%,恩平组烃源岩的相对贡献分别为 20%、32% 和 60%。惠州凹陷南部地区,HZ6、XJ1、XJ3 和 HZ5 油样中文昌组烃源岩的相对贡献分别为 57%、67%、56% 和 48%,超过或接近恩平组烃源岩的 43%、33%、44% 和 52%;XJ2 和 HZ7 油样中,文昌组烃源岩的相对贡献分别为 36% 和 31%,稍低于恩平组烃源岩的 64% 和 69%。

上述单井油样混源比例的计算结果表明,珠 I 坳陷绝大多数单井原油中只有文昌组烃源岩的贡献,如惠陆低凸起、番禺 4 洼、流花凸起等地区的原油样品。恩平组烃源岩对单井原油存在贡献的区域是有限的,仅出现在惠州凹陷南部和恩平凹陷,并且这些原油绝大部分为混源油,其中文昌组烃源岩的相对贡献超过恩平组烃源岩。垂向上,恩平组烃源岩对单井油样的贡献比例随原油埋深的增加而增加,如 EP3 井由 2 265 m 处的 32% 增加到 2 816 m 处的 60%。

## 4 讨论

上述混源油的讨论,针对的是单井中的原油样品,如果探讨恩平组烃源岩对珠 I 坳陷油气藏的整体贡献,还必须考虑不同油藏的地质储量。施和生

(2013)通过研究发现,珠 I 坳陷的油气分布具有较强的不均匀性及选择性,LH11 生物礁滩构造带和 PY4 断裂背斜构造带 2 个构造带的储量超过珠 I 坳陷总量的 50%。混源比例计算结果指示,上述 2 个构造带中的原油全部来自文昌组烃源岩。这表明恩平组烃源岩对珠 I 坳陷油气成藏的整体贡献是非常有限的,仅在部分单井油样中,其贡献比例可能相对较高。

## 5 结论

珠 I 坳陷原油可分为 3 类,第 1 类原油的倍半甾烷、甾萜类、三环萜烷、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷和双杜松烷的浓度分别为  $2.850 \times 10^{-3}$ 、 $10.250 \times 10^{-3}$ 、 $0.690 \times 10^{-3}$ 、 $0.290 \times 10^{-3}$  和  $0.030 \times 10^{-3}$ ,第 2 类原油分别仅为  $1.620 \times 10^{-3}$ 、 $1.080 \times 10^{-3}$ 、 $0.180 \times 10^{-3}$ 、 $0.003 \times 10^{-3}$  和  $0.013 \times 10^{-3}$ ,第 3 类原油介于前两类原油之间。 $C_{19} \sim C_{22}$ -三环萜烷/ $C_{23} \sim C_{26}$ -三环萜烷、Pr/Ph、三环萜烷/五环萜烷、 $C_{30}$ -4-甲基甾烷/ $C_{29}$ -规则甾烷等指标指示,第 1 类原油产自文昌组中深湖相烃源岩,第 2 类原油产自恩平组湖沼相烃源岩,第 3 类原油为混源油,兼有两套烃源岩的贡献。

甾萜类生标绝对含量等 7 个指标建立的混源比例图版适用于计算单井油样中恩平组烃源岩的相对贡献。结果指示,珠 I 坳陷绝大多数单井原油中只有文昌组烃源岩的贡献,如惠陆低凸起、番禺 4 洼、流花凸起等地区的原油样品。恩平组烃源岩对单井原油存在贡献的区域是有限的,仅出现在惠州凹陷南部和恩平凹陷,并且这些原油绝大部分为混源油,其中文昌组烃源岩的相对贡献超过恩平组烃源岩。

## References

- Arouri, K. R., Mckirdy, D. M., 2005. The Behaviour of Aromatic Hydrocarbons in Artificial Mixtures of Permian and Jurassic End-Member Oils: Application to In-Reservoir Mixing in the Eromanga Basin, Australia. *Organic Geochemistry*, 36(1): 105–115. doi:10.1016/j.orggeochem. 2004.06.015
- Chen, J. P., Deng, C. P., Liang, D. G., et al., 2004. Quantification of Mixed Oil Derived from Multiple Source Rocks: A Typical Case Study of the Cainan Oilfield in the East Junggar Basin, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 279–288 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0001-5717.2004.02.018
- Chen, J. P., Deng, C. P., Song, F. Q., et al., 2007. Mathematical Calculating Model Using Biomarkers to Quantitatively Determine Relative Source Proportion of Mixed Oils.



- Geochimica*, 36(2): 205—214 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0379—1726.2007.02.011
- Chen, W. T., Du, J. Y., Long, G. S., et al., 2012. Analysis on Controlling Factors of Marine Sequence Stratigraphy Evolution in Pearl River Mouth Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(1): 73—83 (in Chinese with English abstract). doi:1000—0550(2012)01—0073—11
- Dzou, L. I., Holba, A. G., Ramón, J. C., et al., 1999. Application of New Diterpane Biomarkers to Source, Biodegradation and Mixing Effects on Central Llanos Basin Oils, Colombia. *Organic Geochemistry*, 30(7): 515—534. doi:10.1016/S0146—6380(99)00039—X
- Hou, D. J., 2000. Determination of Migration Direction of Mixed Petroleum by Using Geochemical Method. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 24(4): 87—90 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:1000—5870.2000.04.021
- Hughes, W. B., Dzou, L. I., 1995. Reservoir Overprinting of Crude Oils. *Organic Geochemistry*, 23(10): 905—914. doi:10.1016/0146—6380(95)00073—9
- Li, S. M., Pang, X. Q., Jin, Z. J., et al., 2002. Geochemical Characteristics of the Mixed Oil in Jinhu Sag of Subei Basin. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 26(1): 11—15 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:1000—5870.2002.01.005
- Li, S. M., Pang, X. Q., Wan, Z. H., 2011. Mixed Oil Distribution and Source Rock Discrimination of the Nanpu Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1064—1072 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2011.112
- Li, Y. C., Tao, W. X., Sun, Y. M., et al., 2009. Classification and Distribution of Oil in Huizhou Depression of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 830—834 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0253—2697.2009.06.006
- Liang, H. B., Zhang, M., Wang, D. L., et al., 2005. Quantitative Identification Model of Mixed Oils from Suqiao-Wenan Area in Jidong Depression: Mixed Experiment of Typical Oils and Identification Model of Mixed Oils. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 689—693 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1000—0550.2004.04.021
- Lü, H., Zhang, L. Y., Liu, Q., et al., 2009. Quantification of Mixed Oils Derived from Multiple Source Rocks and Multistage Accumulation in Shengtuo Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 68—74 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0253—2697.2009.01.012
- Ma, N., Hou, D. J., Shi, H. S., et al., 2012. Analysis of the Main Controlling Factors of Source Rocks of Huizhou Sag in the Pearl River Mouth Basin, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 36(3): 19—24, 33 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.2095—4107.2012.03.004
- Pan, C. C., Tan, Y. M., Feng, J. H., et al., 2007. Mixing and Biodegradation of Hydrocarbons in the Daerqi Oilfield, Baiyinchagan Depression, Northern China. *Organic Geochemistry*, 38(9): 1479—1500. doi:10.1016/j.orggeochem.2007.06.004
- Peters, K. E., Clutson, M. J., Robertson, G., 1999. Mixed Marine and Lacustrine Input to an Oil-Cemented Sandstone Breccia from Brora, Scotland. *Organic Geochemistry*, 30(4): 237—248. doi:10.1016/S0146—6380(98)00216—2
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., Driscoll, A., et al., 1989. Origin of Beatrice Oil by Co-sourcing from Devonian and Middle Jurassic Source Rocks, Inner Moray Firth, United Kingdom. *AAPG Bulletin*, 73(4): 454—471.
- Shao, L., Lei, Y. C., Pang, X., et al., 2005. Tectonic Evolution and Its Controlling for Sedimentary Environment in Pearl River Mouth Basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33(9): 1177—1181 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0253—374X.2005.09.007
- Shi, H. S., 2013. On Heterogeneous Distribution and Differential Enrichment by Zones of Hydrocarbon Resources: A Case in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 25(5): 1—8, 25 (in Chinese with English abstract).
- Song, F. Q., Zhang, D. J., Wang, P. R., et al., 2004. A Contribution Evaluation Method for Biodegraded Mixed Oils. *Petroleum Exploration and Development*, 31(2): 67—70 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:1000—0747.2004.02.018
- Tao, G. L., Qin, J. Z., Tenger, et al., 2010. Advancements in Quantifying Mixed Oils. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(4): 377—381 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1001—6112.2010.04.014
- Wang, F. G., Mei, L. F., Shi, H. S., et al., 2008. Structural Styles of Paleogene in Zhu I Depression of Pearl River Mouth Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(4): 448—454 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1001—1552.2008.04.007
- Wang, S. S., 1982. Basic Geological Structural Features of the Basin at the Mouth of Pearl River. *Acta Petrolei Sinica*, 3 (Suppl.1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. J., Song, N., Jiang, N. H., et al., 1999. The Mixture Laboratory Experiment of Immature Oils and Mature Oils, Making and Using the Mixture Source Theory Plat and Its Application. *Petroleum Exploration and Development*, 26(4): 34—37 (in Chinese with English abstract).

- Wu, J., 2013. Enrichment Regularity of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. M., Li, S. T., Yang, J. M., et al., 2004. Petroleum Migration and Mixing in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21(2): 215–224. doi:10.1016/j.marpetgeo.2003.11.010
- Zhang, M., Huang, G. H., Zhao, H. J., et al., 2007. Quantitative Identification Pattern and Its Significance of Marine Mixed Oils in Tarim Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 29(4): 34–39 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1000–9752.2007.04.006
- Zhang, S. C., Gong, Z. S., Liang, D. G., et al., 2004. Geochemistry of Petroleum Systems in the Eastern Pearl River Mouth Basin—I: Oil Family Classification, Oil-Source Correlation and Mixed Oil Analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(Suppl.): 15–26 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1000–0550.2004.zl.003
- Zhang, S. C., Liang, D. G., Gong, Z. S., et al., 2003. Geochemistry of Petroleum Systems in the Eastern Pearl River Mouth Basin: Evidence for Mixed Oils. *Organic Geochemistry*, 34(7): 971–991. doi:10.1016/S0146–6380(03)00034–2
- Zhu, J. Z., Shi, H. S., Deng, H., W., et al., 2007a. Geochemistry of Source Rocks in Paleogene Sequence of Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(5): 709–714 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1672–1926.2007.05.016
- Zhu, J. Z., Shi, H. S., Shu, Y., et al., 2007b. Organic Maceral Characteristics and Hydrocarbon-Generating Potentials of Source Rocks in the Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 301–306 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1001–6112.2007.03.015
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Gao, L., 2008. Geological Characteristics and Exploration Objectives of Hydrocarbons in the Northern Continental Margin Basin of South China Sea. *Acta Petroleologica Sinica*, 29(1): 1–9 (in Chinese with English abstract). doi:10.3321/j.issn:0253–2697.2008.01.001
- 李素梅, 庞雄奇, 金之钧, 等, 2002. 苏北金湖凹陷混合原油的地质地球化学特征. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 26(1): 11–15.
- 李素梅, 庞雄奇, 万中华, 2011. 南堡凹陷混源油分布与主力炆源岩识别. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(6): 1064–1072.
- 李友川, 陶维祥, 孙玉梅, 等, 2009. 珠江口盆地惠州凹陷及其邻区原油分类和分布特征. *石油学报*, 30(6): 830–834.
- 梁宏斌, 张敏, 王东良, 等, 2004. 冀中拗陷苏桥—文安地区混源油定量识别模式研究——典型原油混合实验及混源油识别模式. *沉积学报*, 22(4): 689–693.
- 吕慧, 张林晔, 刘庆, 等, 2009. 胜坨油田多源多期成藏混源油的定量判别. *石油学报*, 30(1): 68–74.
- 马宁, 侯读杰, 施和生, 等, 2012. 珠江口盆地惠州凹陷炆源岩发育的主控因素分析. *大庆石油学院学报*, 36(3): 19–24, 33.
- 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等, 2005. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(9): 1177–1181.
- 施和生, 2013. 论油气资源不均匀分布与分带差异富集——以珠江口盆地珠一坳陷为例. *中国海上油气*, 25(5): 1–8, 25.
- 宋孚庆, 张大江, 王培荣, 等, 2004. 生物降解混源油混合比例估算方法. *石油勘探与开发*, 31(2): 67–70.
- 陶国亮, 秦建中, 腾格尔, 等, 2010. 混源油定量判别方法研究新进展. *石油实验地质*, 32(4): 377–381.
- 王福国, 梅廉夫, 施和生, 等, 2008. 珠江口盆地珠 I 坳陷古近系构造样式分析. *大地构造与成矿学*, 32(4): 448–454.
- 王善书, 1982. 珠江口盆地地质构造的基本特征. *石油学报*, 3(增刊 1): 1–13.
- 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等, 1999. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用. *石油勘探与开发*, 26(4): 34–37.
- 吴娟, 2013. 珠江口盆地珠一坳陷油气富集规律(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张敏, 黄光辉, 赵红静, 等, 2007. 塔里木盆地海相混源油定量识别模式及其意义. *石油天然气学报*, 29(4): 34–39.
- 张水昌, 龚再升, 梁狄刚, 等, 2004. 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. *沉积学报*, 22(6): 15–26.
- 朱俊章, 施和生, 邓宏文, 等, 2007a. 珠江口盆地惠州凹陷古近系炆源岩层序地层学和地球化学研究. *天然气地球化学*, 18(5): 709–714.
- 朱俊章, 施和生, 舒誉, 等, 2007b. 珠江口盆地炆源岩有机显微组分特征与生炆潜力分析. *石油实验地质*, 29(3): 301–306.
- 朱伟林, 张功成, 高乐, 2008. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向. *石油学报*, 29(1): 1–9.

## 附中文参考文献

- 陈建平, 邓春萍, 梁狄刚, 等, 2004. 叠合盆地多炆源层混源油定量判别——以准噶尔盆地东部彩南油田为例. *地质学报*, 78(2): 279–288.
- 陈建平, 邓春萍, 宋孚庆, 等, 2007. 用生物标志物定量计算混合原油油源的数学模型. *地球化学*, 36(2): 205–214.
- 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等, 2012. 珠江口盆地海相层序地层发育的控制因素分析. *沉积学报*, 30(1): 73–83.
- 侯读杰, 2000. 混源油气运移方向的地球化学识别. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 24(4): 87–90.