

白云凹陷东部深水区混源油定量解析

王宁¹,明承栋^{1,2},杨晨艺¹,郑志乐¹,唐英博¹

(1.中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司,广东 深圳 518054;

2.中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 深圳 518054)

摘要:白云凹陷东部为珠江口盆地深水油气勘探的热点地区,该区存在多源多洼的供烃格局,原油、凝析油及天然气共存,且油气空间分布极不均一,为揭示该区油气来源并确定文昌组、恩平组两套主力烃源岩成藏贡献,对该区原油(凝析油)的正构烷烃单体碳同位素特征与气相色谱指纹特征进行精细分析。结果表明,研究区原油(凝析油)为文昌组与恩平组烃源岩共同贡献的混源油,不同构造带原油(凝析油)中文昌组与恩平组烃源岩的贡献率均存在差异,其中凝析油及H34油藏原油主体由恩平组烃源岩贡献,贡献率为66%~78%,文昌组贡献率较低,仅为21%~32%;H16及H29油藏原油由文昌组及恩平组烃源岩贡献,恩平组烃源岩贡献率为53%~58%,文昌组烃源岩的贡献率为42%~47%,两者贡献率相当。

关键词:白云凹陷;混源油;混源比例;单体烃碳同位素;定量解析

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Quantitative study on mixed source oil in deep water area of eastern Baiyun sag

WANG Ning¹, MING Chengdong^{1,2}, YANG Chenyi¹, ZHENG Zhile¹, TANG Yingbo¹

(1.Engineering Technology Branch of CNOOC Energy Development Co. Ltd,

Shenzhen, Guangdong 518054, China;

2. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518054, China)

Abstract: The deep water area of eastern Baiyun sag is a hot spot for deep-water oil and gas exploration in the Pearl River Mouth Basin, where there is a multi-source and multi-depression hydrocarbon supply pattern with the coexistence of crude oil, condensate oil and natural gas, and the uneven spatial distribution of oil and gas. To reveal the source of oil and gas and determine the contribution of Wenchang formation and Enping formation to hydrocarbon accumulation in this area, this paper analyzes the monomer carbon isotopic characteristics of n-alkanes and the chromatographic fingerprint characteristics of crude oil (condensate) in the study area. The results show that the crude oil (condensate) in the study area is the mixed source oil jointly contributed by Wenchang formation and Enping formation source rocks, and the contribution rates of both Wenchang formation and Enping formation source rock to crude oil (condensate) in different tectonic belts are different. Enping formation source rock contributes more to the condensate and H34 crude oil reservoir in this area while Wenchang formation source rock contributes less. The contribution rates are 66%~78% and 21%~32% respectively. Enping formation source rock and Wenchang formation source rock have similar contribution rates to crude oil of H16 and H29 reservoir, being 53%~58% and 42%~47% respectively.

收稿日期:2022-03-23

基金项目:中国海洋石油集团有限公司科研平台项目(CNOOC-KJPT GCJS 2020-01)

作者简介:王宁(1987—),男,陕西渭南人,工程师,硕士,主要从事油气地球化学实验分析及油气成藏研究。

E-mail:wangning23@cnooc.com.cn

明承栋(1987—),男,湖北广水人,工程师,硕士,主要从事油气地球化学实验分析及油气成藏研究,本文通信作者。

E-mail:mingchd@cnooc.com.cn

Key words: Baiyun sag; mixed source oil; mixed source ratio; monomer carbon isotope; quantitative study

混源油是由不同母质来源、沉积环境或演化阶段的烃源岩所产生的油气混合而成。目前在混源油识别与贡献比例的定量研究中,主要应用生物标志化合物绝对浓度法^[1-2],具体有以下2种方法。①直接实验法。即已知端元油的情况下,直接利用实验研究,包括:直接定量法,即直接测定端元油和混源油中特征生物标志物的绝对含量,求解混源油中不同油源的贡献比例^[3-4];人工配比实验法,即通过典型端元油配比成一系列混合原油,再对这些混合油进行解析,并与端元油的生物标志物组成和地球化学参数进行对比,从而得到混合原油中各端元油的比例,并计算混源油中每个烃源灶的相对贡献^[1,5];②多元数理统计定量计算模型法。即在混合原油配比实验的基础上,基于生物标志物绝对定量,依据化学浓度计算的基本原理,应用数学方法推导混源油中不同原油贡献比例的定量计算模型,从而求解混源油中各种油源的贡献比例^[6-7]。

珠江口盆地白云凹陷部分探井原油及凝析油受到一定程度气洗^[8-9],因而生物标志物在全油中的比重较低($<1\%$),而且气藏凝析油处于高成熟阶段,生物标志物表现出一定的趋同性,导致在该区利用生物标志物进行油源追踪会有较大的误差和局限性,依据国内外目前常用的生物标志物浓度法建立的混源油判识及混源比例计算方法对该区进行混源油识别可靠性也相对较差。然而,相较于生物标志物,正构烷烃在全油中的主要组分含量高,其单体烃碳同位素主要受控于母源和古沉积环境,能从分子级别反映单个化合物的来源,受热成熟度及次生改造作用影响较小,在判别混源油及混源比例定量计算中具有更明显的优越性^[10]。

珠江口盆地白云凹陷深水区已发现多个大型油气藏,含烃流体非常活跃,呈现油、气、凝析油三态共存且空间分布不均一的油气格局,油气混源现象普遍^[11]。马宁等^[9]、米立军等^[11]、王宁等^[12]应用生物标志物对该区油源进行分析,认为该区主要发育文昌组、恩平组2套主力烃源岩,且主体均处于高-过成熟及高成熟热演化阶段,生烃潜力较高。但在该研究区探井中未揭示文昌组及恩平组典型烃源岩,故难以通过直接的油源对比确定文昌组或恩平组泥岩为主力油源岩。另外,该区原油及凝析油共存,油品及成熟度跨度大,生物标志物受影响因素较多,热成熟度、气侵、生物降解等均会对其造成影响^[13]。一方面,白云凹陷东部油藏原油成熟度相对较低,而气藏中凝析油则处于高成熟度阶段,为天然气伴生而成,两者生物标志物浓度差异较大。另一方面,该区目前钻遇的文昌组和恩平组泥岩均处于隆起带位置,代表性较差,缺乏合适的端元岩(油)进行混源油判识,难以有效界定主力油源岩。而采用计算机协助、使用多元数理统计学的方法计算混源比例,可以在未获得端元样品、不进行混源实验的情况下进行,具有有效性高、适用性强、准确度高的优点^[10]。故本研究采用混采油井产能分配算法^[14],利用全油正构烷烃单体烃碳同位素和全油气相色谱指纹分析技术,定量计算文昌组、恩平组2套烃源岩对原油的相对贡献比例,厘清文昌组、恩平组两2套烃源岩的成藏贡献,确立主力烃源岩及其勘探潜力,为白云凹陷深水区油气勘探部署提供理论支撑。

1 区域地质概况

白云凹陷位于珠江口盆地南部坳陷带,处于南海北部大陆边缘陆坡区,是珠江口盆地规模最大、埋藏最深的沉积凹陷,水深200~2800 m,总体NEE向展布,包括白云主洼、白云东洼、白云南洼和白云西洼4个次级洼陷。白云凹陷北侧为番禺低隆起,东侧为东沙隆起,西侧以一条北西走向的基底断裂、岩浆活动带与云开低凸起为界(图1)。白云凹陷因位于珠江口盆地深水区地壳向海减薄的细颈带^[9],高热流背景使得深水区具有异常高的地温梯度,现今地温梯度为(3.5~5.6) °C/100 m,呈现出“热盆”属性^[11]。该区目前已发现多个大型油气藏,包括W3-1、H34、H29等大型凝析油气藏以及H16、H23等大中型油藏,烃类来源上已证实白云深水区东部为白云主洼与白云东洼双源供烃格局^[12]。研究区共发育3套主力烃源岩,分别为文昌组半深湖-深湖相泥岩、恩平组浅湖-沼泽相泥岩以及珠海组海相泥岩。其中,文昌组与恩平组烃源岩现今主体均处于高-过成熟及高成熟热演化阶段,生烃潜力较高,为凝析油气聚集提供了良好的物质基础,是主力烃源岩;珠海组烃源岩仅在白云主洼中心成熟,在白云凹陷东部深水区成熟度低,为次要烃源岩。

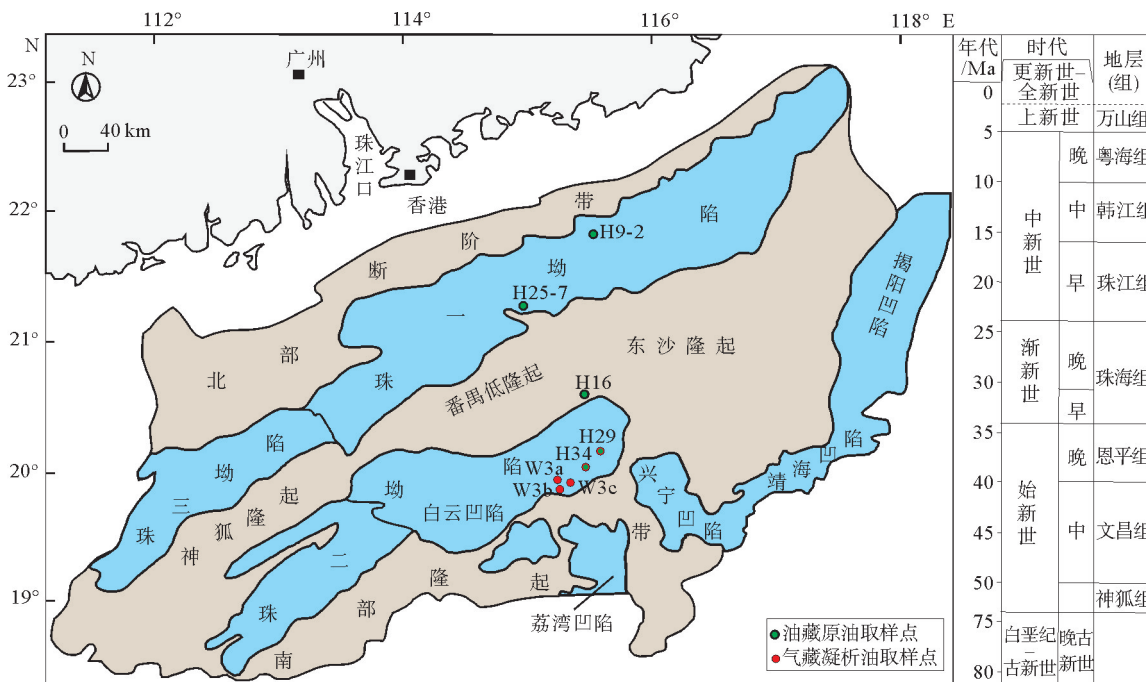


图1 珠江口盆地区域划分图及采集样品分布图^[12]

Fig. 1 Regional division of Pearl River Mouth Basin and distribution of collected samples

2 样品与实验

本次采集了白云凹陷已有探井探明的各油气藏原油凝析油样品共 10 个,包括 H16、H29、H34 油藏原油, H29、H34 及 W3a、W3b、W3c 气藏凝析油,以及 2 个典型的恩平组 H9-2 和文昌组原油 H25-7,进行全油正构烷烃单体烃碳同位素和全油气相色谱指纹分析,定量计算文昌组、恩平组 2 套烃源岩对原油的相对贡献比例。

全油色谱由安捷伦 7890 气相色谱仪完成;色谱条件:HP-PONA 弹性石英毛细管柱(50 m×0.2 mm×0.5 μm);起始温度 35 °C,恒温 10 min,以 3 °C/min 升至 300 °C,恒温 15 min;分流比 30 : 1;氮气为载气,1 mL/min 恒速,火焰离子检测器(flame ionization detector, FID)。

单体分子稳定碳同位素分析先对原油进行族组分分离,再对饱和烃馏分络合后上机分析,分析方法如下:先用正己烷沉淀原油中的沥青质,再用硅胶/氧化铝柱色谱把脱沥青质原油分离成饱和烃、芳香烃和非烃馏分,冲洗剂分别为正己烷、甲苯和二氯甲烷。用尿素络合法把饱和烃馏分细分为正构烷烃和支链/环烷烃馏分,对正构烷烃馏分上机进行单体烃稳定碳同位素分析,仪器为 Thermo Delta V Advantage 质谱仪;色谱运行条件:色谱柱, DB-5 (30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样口温度 250 °C;升温程序,初始 80 °C,保持 1 min,以 7 °C/min 速度升至 290 °C,保持 15 min;流量 1.2 mL/min 恒流模式,氦气为载气。δ¹³C 值测试精度:标准偏差 < 0.5‰, VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 标准。

3 原油及凝析油地球化学特征与来源

马宁等^[9]、米立军等^[11]对研究区油源认识主要依据该区特征生物标志物奥利烷(OL)、双杜松烷(T)及 C₃₀4-甲基甾烷含量差异进行划分,认为白云主洼东部原油及气藏凝析油为文昌组及恩平组浅湖-半深湖相泥岩在成熟-高成熟生油气阶段生成的产物。另外,朱俊章等^[14]根据轻烃组成及甲基环己烷指数的组成探讨该区原油及凝析油成因,认为原油的主要来源为滨湖-浅湖相腐殖型烃源岩。生物标志物受热成熟度影响较大,在油气成因判识方面具有一定局限性。相较而言,单体烃碳同位素主要受控于母源和古沉积环境,受热

成熟度及次生改造作用影响较小^[13],因此本研究主要根据饱和烃中正构烷烃单体碳同位素特征探讨研究区原油母源特征。

图2展示了白云凹陷东部深水区原油及凝析油正构烷烃单体碳同位素组成分布特征,可见正构烷烃碳同位素组成主要分布范围为 $-31\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 。随碳数增加,碳同位素值呈变轻的“下降型”分布趋势,说明该区原油及凝析油可能以浅湖相生源构成为主,但从碳数分布看,不同构造原油及凝析油,在较低碳数部分(<14)正构烷烃的碳同位素值差值基本在 2‰ 以内;在高碳数部分(≥ 15)正构烷烃的碳同位素值差值较大;特别是在 $n\text{-C}_{23} \sim n\text{-C}_{26}$ 范围内,正构烷烃的碳同位素值与碳数存在平缓“上升型”分布趋势,体现出不同生源构成贡献比例的差异。即从正构烷烃单体碳同位素组成特征看,白云深水区东部原油及凝析油可能以浅湖相偏腐殖型源岩供烃为主,但不同构造带原油及凝析油相同碳数正构烷烃的差异指示生源构成存在一定的差异性。

4 混源油的识别与混源比例定量计算

4.1 混源油的识别

4.1.1 端元油的选取

端元油的选取对于混源油的判别至关重要。由于深水区钻遇文昌组、恩平组烃源岩的探井较少,已揭示的文昌组与恩平组烃源岩多位于洼陷的陡坡带,厚度较薄且相带相对较差,不能代表文昌组与恩平组烃源岩的主体面貌。因此,从洼陷结构上剖析并与珠一坳陷进行对比,选取能代表文昌型端元油和恩平型端元油的油样进行分析。

珠二坳陷文昌期主要受控于拆离断层的控制,为宽缓地堑,受陆源影响强烈^[9],更倾向于发育类似惠州凹陷的具陆源输入特征的文昌组浅湖-半深湖相烃源岩^[12]。因此,选取H25-7井文昌组原油作为文昌型端元油,代表白云凹陷文昌组烃源岩所生原油。恩平期,珠江口盆地作为一个大型汇水盆地,珠一坳陷与珠二坳陷烃源岩的发育背景较为相近,均表现为以高等陆源输入为主的生源特征^[9,12]。因此,选取惠州凹陷HZ08洼恩平组源岩所生的H9-2井油样作为恩平型端元油,代表白云凹陷恩平组烃源岩所生的原油。

4.1.2 混源油的识别

以正构烷烃为研究对象,对H16、H29、H34油藏原油以及H29、H34及W3a、W3b、W3c气藏凝析油的单体烃碳同位素进行分析,并与文昌型和恩平型端元油进行对比(图3),可见研究区原油和凝析油单体烃同位素特征均介于文昌型与恩平型端元油之间,显示原油与凝析油并非单一油源,为文昌组与恩平组烃源岩共同贡献的混源油。

4.2 混源比例的定量计算

目前关于混源油比例的定量计算,国内外主要采用生物标志化合物绝对浓度法,本研究主要采用原油单

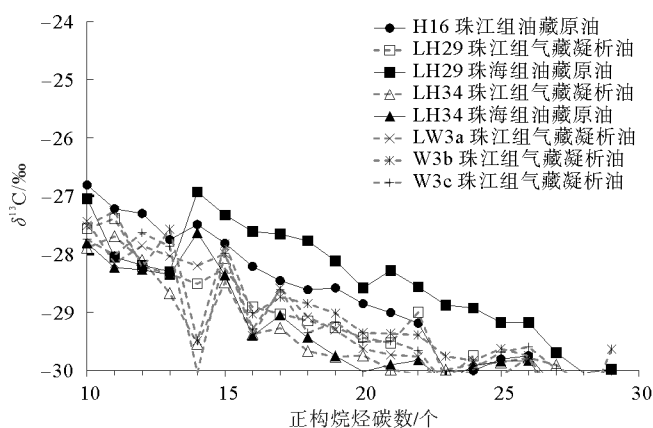


图2 研究区原油及凝析油正构烷烃单体碳同位素组成曲线图

Fig. 2 Monomer carbon isotopic composition of n-alkanes in crude oil and condensate in the study area

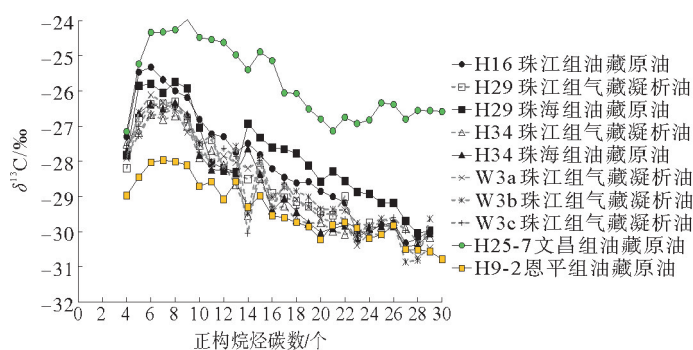


图3 研究区原油及凝析油混源判别

Fig. 3 Identification of mixed source of crude oil and condensate in the study area

体烃碳同位素组成与全油气相色谱分析技术,利用混采油井产能分配算法^[14],以单体烃为计量单元,定量计算文昌组、恩平组 2 套烃源岩的相对贡献比例。具体过程如下。

4.2.1 混源油的识别

1) 剖析混源油与各端元油单体烃碳同位素组成,应用混采油井产能分配计算方法,定量计算文昌型与恩平型端元油对混源油中 $C_4 \sim C_{30}$ 化合物的单体贡献率。

设向量 X 、 Y 和 Z 分别代表文昌型、恩平型端元油和混源油单体碳同位素指纹配对参数集:

$$\begin{cases} X = (X_4, X_5, \dots, X_{30}), \\ Y = (Y_4, Y_5, \dots, Y_{30}), \\ Z = (Z_4, Z_5, \dots, Z_{30}). \end{cases} \quad (1)$$

其中,文昌型端元油对混源油中 $C_4 \sim C_{30}$ 化合物的单体烃贡献率为 $(G_{C_4}, G_{C_5}, \dots, G_{C_{30}})$,恩平型端元油对混源油中 $C_4 \sim C_{30}$ 化合物的单体烃贡献率为 $(E_4, E_5, \dots, E_{30})$ 。

需满足如下条件:

$$\begin{cases} G_{C_4} X_4 + E_4 Y_4 = Z_4, \\ \dots \\ G_{C_{30}} X_{30} + E_{30} Y_{30} = Z_{30}. \end{cases} \quad (2)$$

其中 X 、 Y 、 Z 均已知,求解上述方程可得 $(G_{C_4}, G_{C_5}, \dots, G_{C_{30}})$ 和 $(E_4, E_5, \dots, E_{30})$ 。

2) 应用全油气相色谱指纹分析技术,对 $C_4 \sim C_{30}$ 化合物峰面积进行计算,定量计算各单体化合物在全油中的质量百分比,即 $C_4 \sim C_{30}$ 化合物在全油中的相对质量百分含量为 $(W_{C_4}, W_{C_5}, \dots, W_{C_{30}})$ 。

3) 利用单体烃贡献率与全油中单体烃的质量百分比,计算文昌型与恩平型端元油单体烃的贡献量,最后进行归一化处理,定量计算文昌组与恩平组烃源岩对混源油的相对贡献比例,即 WC 型端元油单体烃贡献量为 $(G_{C_4} \times W_{C_4}, G_{C_5} \times W_{C_5}, \dots, G_{C_{30}} \times W_{C_{30}})$,EP 型端元油单体烃贡献量为 $(E_4 \times W_{C_4}, E_5 \times W_{C_5}, \dots, E_{30} \times W_{C_{30}})$ 。

4.2.2 典型油藏原油混源比例定量计算

以 H16 井油藏原油为例,进行混源比例定量计算。根据 H16 原油 $C_4 \sim C_{30}$ 单体烃碳同位素组成可以看出,文昌型与恩平型原油对不同组分的贡献比率不同。根据原油与文昌型、恩平型原油单体烃碳同位素差值,可定量求出各单体烃来自文昌型原油的单体贡献率 WC_n 与来自恩平型原油的单体贡献率 EC_n (图 4、表 1)。如 C_4 化合物中文昌型原油的单体贡献率为 73.1%,恩平型原油的单体贡献率为 26.9%; C_5 化合物中文昌型原油的单体贡献率为 92.7%,恩平型原油的单体贡献率为 7.3%。可定量计算 $C_4 \sim C_{30}$ 各类化合物中源自文昌型或恩平型原油的单体烃贡献率(表 1)。

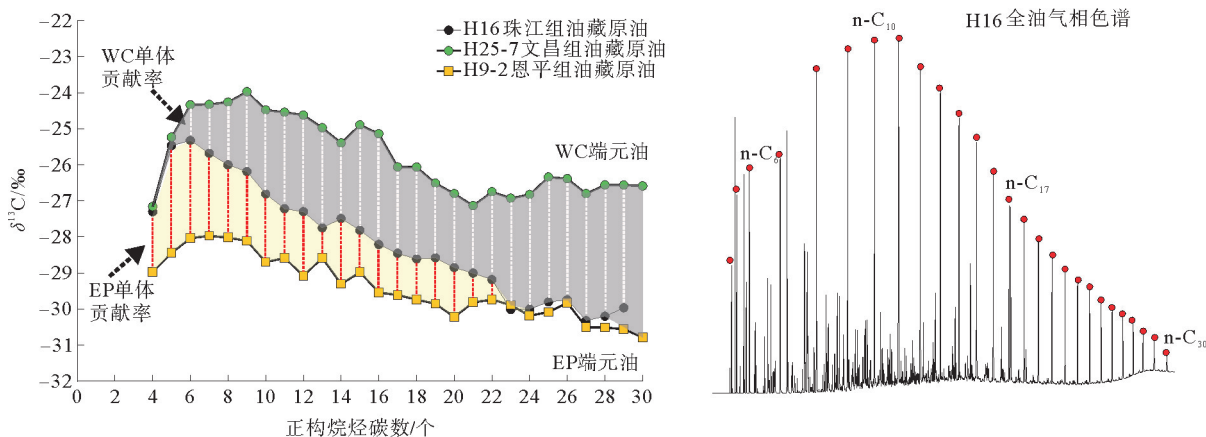


图 4 H16 原油单体烃同位素与全油气相色谱指纹特征

Fig. 4 Monomer hydrocarbon isotope and whole oil gas chromatographic fingerprint characteristics of H16 crude oil

根据全油色谱中 $C_4 \sim C_{30}$ 各碳数化合物的峰面积定量计算各单体烃的重量百分比,如 C_4 化合物占全油的 0.7%, C_5 化合物占 2.1%。再定量计算出 $C_4 \sim C_{30}$ 各类化合物在全油中的质量百分比 W_{C_n} 。

最后将文昌型或恩平型原油的单体烃贡献率与该组分在全油中的质量百分比相乘,定量计算各烃类组源自文昌型原油或恩平型原油的单体贡献量($WC_n \times W_{C_n}$ 及 $EC_n \times W_{C_n}$),再进行归一化处理,可得到文昌组烃源岩对 H16 原油的相对贡献率为 42%,恩平组烃源岩相对贡献率为 58%(表 1)。

表 1 文昌组与恩平组烃源岩对 H16 井原油相对贡献率

Tab. 1 Relative contribution ratio of Wenchang formation and Enping formation source rock to H16 well crude oil

类别	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}	C_{27}	C_{28}	C_{29}	C_{30}
WC_n	73	93	73	63	54	47	45	34	40	23	46	29	30	32	31	38	40	30	18	1	6	8	3	5	8	15	20
EC_n	27	7	27	37	46	54	55	66	60	77	54	71	70	68	69	62	51	70	82	99	94	92	97	95	92	85	80
W_{C_n}	0.7	2.1	4.9	7.9	10.1	7.5	14.4	7.5	6.3	6.5	4.9	5.0	3.2	3.1	2.2	2.3	1.7	1.5	1.3	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6

4.2.3 原油(凝析油)混源比例定量计算结果

对各构造带原油、凝析油进行混源比例定量计算,结果见表 2,恩平组和文昌组烃源岩对油藏原油和气藏凝析油均有贡献,但恩平组烃源岩的贡献比例整体较大;气藏凝析油及 H34 井油藏原油主体由恩平组烃源岩贡献,贡献率为 66%~78%,文昌组烃源岩的贡献率为 22%~34%;H16 及 H29 油藏原油由文昌组及恩平组烃源岩贡献,恩平组烃源岩贡献率约 53%~58%,文昌组烃源岩的贡献率约 42%~47%,贡献率相当。

4.2.4 原油(凝析油)成因机制

白云凹陷主要有 2 套主力烃源岩,分别为文昌组湖相烃源岩和恩平组沼泽相烃源岩^[12]。文昌组以深湖-中深湖相沉积为主,有机质丰度高,有机质类型主要为 II_1 型,为 主力 烃 源 岩;恩 平 组 以 湖 沼 相 和 河 流 相 沉 积 为 主,局 部 发 育 煤 层 泥 岩,有 机 质 类 型 主 要 为 II_2 和 III 型,为 次 要 烃 源 岩。2 套 主 力 烃 源 岩 的 生 烃 潜 力 较 高,这 也 为 混 源 油 的 形 成 奠 定 了 物 质 基 础^[15-16]。

表 2 白云凹陷东部深水区混源油比例计算结果

Tab. 2 Calculation results of mixed source oil ratio in the deep water area of eastern Baiyun sag

井号	层位	样品类型	混源油比例/%	
			文昌组	恩平组
H16	珠江组	原油	42	58
H29	珠海组	原油	47	53
H34	珠海组	原油	21	78
H29	珠江组	凝析油	34	66
H34	珠江组	凝析油	26	74
W3a	珠江组	凝析油	31	69
W3b	珠江组	凝析油	32	68
W3c	珠江组	凝析油	32	68

白云凹陷文昌组生烃时间早,生成的原油不仅可以运移到珠海组,还可以垂向运移到珠江组和韩江组聚集藏。恩平组生烃时间晚,且生烃量较小^[12],所以生成的原油先就近在恩平组和珠海组充注,如果储层中已经有了文昌组的油气充注,则会驱替一部分文昌组的原油向低层位的珠江组和韩江组运移,同时恩平组烃源岩生成的油气也会向珠江组和韩江组运移,这样就会在珠海组、珠江组和韩江组出现文昌组和恩平组共同贡献的混源油。因此,浅层的珠江组和韩江组的原油,文昌组烃源岩贡献较大,而深层的珠海组的原油,恩平

组烃源岩贡献较大,与本研究通过数理统计所得的结果相符合。

5 结论

1) 珠二坳陷文昌期发育具有陆源输入特征的浅湖-半深湖相烃源岩,与惠州凹陷 H25-7 井文昌组烃源岩相似。珠二坳陷恩平期发育以陆源高等植物输入为主的烃源岩,与惠州凹陷 H9-2 井恩平组烃源岩相似。

2) 白云凹陷东部深水区原油与凝析油正构烷烃单体碳同位素特征显示,其原油和凝析油单体烃同位素特征均介于文昌型与恩平型端元油之间,揭示原油与凝析油非单一油源,为文昌组与恩平组烃源岩共同贡献的混源油。

3) 采用正构烷烃单体碳同位素与全油气相色谱指纹特征相结合,定量计算白云凹陷东部深水区原油与凝析油的混源比例,其中凝析油及 H34 油藏原油主体由恩平组烃源岩贡献,贡献率为 66%~78%;文昌组贡献率较低,仅为 21%~32%;H16 及 H29 油藏原油由文昌组及恩平组烃源岩贡献,恩平组源岩贡献率为 53%~58%,文昌组烃源岩的贡献率为 42%~47%。通过混源油定量计算,明确了白云凹陷恩平组烃源岩成藏贡献以及白云东洼的生烃和供烃能力,为白云凹陷深水区油气勘探部署提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] ASADI MEHMANDOSTI E, AMIRHOSEYNI M, MOALLEMI S A, et al. Geochemical investigation of the Cretaceous crude oil reservoirs and source rock samples in one of the Abadan Plain Oilfields, SW Iran[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2022, 96(2): 546-558.
- [2] GE Q, XUE G Z, YE L M, et al. The spatial distribution of major and trace elements of surface sediments in the northeastern Beibu Gulf of the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(3): 93-102.
- [3] LI Y, FANG Y X, ZHOU Q Z, et al. Geochemical insights into contribution of petroleum hydrocarbons to the formation of hydrates in the Taixinan Basin, the South China Sea[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(6): 394-403.
- [4] ŠAJNOVIĆ A, GRBA N, NEUBAUER F, et al. Geochemistry of sediments from the Lopare Basin (Bosnia and Herzegovina): Implications for paleoclimate, paleosalinity, paleoredox and provenance[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2020, 94(5): 1591-1618.
- [5] AI J Y, GEORGE S C, ZHONG N N. Organic geochemical characteristics of highly mature Late Neoproterozoic black shales from South China: Reappraisal of syngeneity and indigeneity of hydrocarbon biomarkers[J/OL]. *Precambrian Research*, 2020, 336. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.105508.
- [6] 蒋文龙, 阿布力米提·依明, 李卉, 等. 准噶尔盆地玛东斜坡区百口泉组—下乌尔禾组混源油地球化学特征及定量判别[J]. *地球化学*, 2021, 50(2): 185-198.
JIANG Wenlong, ABLIMIT Imin, LI Hui, et al. Geochemical characteristics and identification of mixed crude oil of the Baikouquan Formation Lower Wuerhe Formation on the East slope of the Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Geochimica*, 2021, 50(2): 185-198.
- [7] 傅宁, 李友川, 汪建蓉. 惠州凹陷西区油源研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(5): 322-328.
FU Ning, LI Youchuan, WANG Jianrong. Oil-source correlation in the western Huizhou Sag[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2001, 15(5): 322-328.
- [8] 杜家元, 施和生, 丁琳, 等. 惠州凹陷油气成藏期次划分及其勘探意义[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(4): 221-226.
DU Jiayuan, SHI Hesheng, DING Lin, et al. Division of hydrocarbon accumulation stages in Huizhou depression and their exploration significance[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2009, 21(4): 221-226.
- [9] 马宁, 龙祖烈, 李清泉, 等. 珠江口盆地白云凹陷东部凝析气藏成因机制[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(2): 89-96.
MA Ning, LONG Zulie, LI Qingquan, et al. Origin mechanism of condensate gas pools in the east of Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019, 43(2): 89-96.
- [10] 何涛华, 卢双舫, 李文浩, 等. 基于族组分端元碳同位素定量解析深层复杂混源油的方法: CN110672821A[P]. 2020-01-10.
- [11] 米立军, 何敏, 翟普强, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷高热流背景油气类型与成藏时期综合分析[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(1): 1-12.
MI Lijun, HE Min, ZHAI Puqiang, et al. Integrated study on hydrocarbon types and accumulation periods of Baiyun sag, deep water area of Pearl River Mouth basin under the high heat flow background[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31

- (1):1-12.
- [12]王宁,张铜耀,明承栋,等.珠江口盆地东部珠一坳陷古近系不同类型烃源岩和原油热裂解生气特征[J].海洋地质前沿,2022,38(8):67-76.
WANG Ning,ZHANG Tongyao,MING Chengdong,et al.Different types of Paleogene source rocks and characteristics of pyrolysis gas generation of crude oil in Zhuyi Depression,Pearl River Mouth Basin[J].Marine Geology Frontiers,2022,38(8):67-76.
- [13]田德瑞,牛成民,王德英,等.渤海海域辽西凹陷中央反转带原油成因类型及成藏特征[J].高校地质学报,2021,27(4):444-458.
TIAN Derui,NIU Chengmin,WANG Deying,et al.Genetic types and accumulation of crude oil in the central inversion zone in the Liaoxi Depression,Bohai Sea[J].Geological Journal of China Universities,2021,27(4):444-458.
- [14]朱俊章,候读杰,黄宝家,等.文昌 13-1 油田部分混采油井产能分配计算[J].天然气地球科学,2004,15(2):187-190.
ZHU Junzhang,HOU Dujie,HUANG Baojia,et al.The calculation of the output proportion of multi-oil zone co-recovery wells in Wenchang 13-1 oilfield[J].Natural Gas Geoscience,2004,15(2):187-190.
- [15]朱俊章,施和生,庞雄,等.白云深水区东部油气成因来源与成藏特征[J].中国油气勘探,2021,4(4):20-29.
ZHU Junzhang,SHI Hesheng,PANG Xiong,et al.Origins and accumulation characteristics of hydrocarbons in eastern Baiyun deepwater area[J].Petroleum Geology,2021,4(4):20-29.
- [16]芮志锋,林畅松,杜家元,等.关键层序界面识别及其在岩性油气藏勘探中的意义:以惠州凹陷珠江组为例[J].岩性油气藏,2019,31(1):96-105.
RUI Zhifeng,LIN Changsong,DU Jiayuan,et al.Key sequence surfaces identification and its significance in the exploration of lithologic reservoirs:A case of Zhujiang Formation in Huizhou Depression[J].Lithologic Reservoirs,2019,31(1):96-105.
(责任编辑:高丽华)

(上接第 23 页)

- [17]MAO X M,ZHU D B,NDIKUBWIMANA I,et al.The mechanism of high-salinity thermal groundwater in Xinzhou geothermal field,South China:Insight from water chemistry and stable isotopes[J/OL].Journal of Hydrology,2021,593.DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125889.
- [18]高宗军,刘久潭,李颖智,等.拉萨河谷地区孔隙地下水水化学特征及水文地球化学模拟[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):1-10.
GAO Zongjun,LIU Jiutan,LI Yingzhi,et al.Hydrochemical characteristics and hydrogeochemical simulation of pore groundwater in Lhasa valley area[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2020,39(1):1-10.
- [19]卢兆群,彭明章,董妍,等.山东平阴地热水水文地球化学特征及成因分析[J].中国地质调查,2022,9(1):104-114.
LU Zhaoqun,PENG Mingzhang,DONG Yan,et al.Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of geothermal water in Pingyin of Shandong Province[J].Geological Survey of China,2022,9(1):104-114.
- [20]QIU X L,WANG Y,WANG Z Z,et al.Determining the origin,circulation path and residence time of geothermal groundwater using multiple isotopic techniques in the Heyuan Fault Zone of Southern China[J].Journal of Hydrology,2018,567:339-350.
- [21]高宗军,孙智杰,杨永红,等.山东省地热水水化学研究及赋存特征[J].科学技术与工程,2019,19(20):85-90.
GAO Zongjun,SUN Zhijie,YANG Yonghong,et al.Occurrence characteristics and hydrochemical characteristics of geothermal water in Shandong Province[J].Science Technology and Engineering,2019,19(20):85-90.
(责任编辑:高丽华)