

文章编号:0253-9985(2012)04-0624-09

澳大利亚 Vulcan 次盆 Puffin 油田油气源与成藏

石磊,殷进垠,田纳新,姜向强,陆红梅

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要: Puffin 油田目前油气来源不明,主力烃源岩展布及主要生、排烃期不确定都制约了下一步勘探的进行。利用烃源岩二维生烃模拟以及生物标志物指纹对比等方法,揭示了下 Vulcan 组海相泥页岩是本区最为重要的一套烃源岩,白垩纪—中新世为主要生、排烃期;而本区的 Plover 组烃源岩普遍演化程度较高,在晚侏罗世已达到高成熟,生烃潜力差,对于成藏的贡献较为有限,属于次要烃源岩。成藏事件图反映出 Puffin 垒带上的圈闭主要形成于侏罗纪—白垩纪,中新世以前由于侏罗系以上地层断裂不发育,下 Vulcan 组主力烃源岩生成的原油主要在地堑中的侏罗系圈闭中聚集成藏。中新世末,区域性的构造挤压运动形成众多垂向断裂并且使早期形成的断裂体系活化,使得早期成藏的油气垂向调整到浅层的白垩系聚集成藏。因此,目前 Puffin 油田发现的白垩系油藏主要为次生油藏,为早期侏罗系油藏调整改造到浅部垒带上形成。

关键词: 烃源岩;生烃模拟;油气成藏;Vulcan 次盆;澳大利亚

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Hydrocarbon sources and accumulation in Puffin oilfield,
Vulcan sub-basin, Australia

Shi Lei, Yin Jinyin, Tian Naxin, Jiang Xiangqiang and Lu Hongmei

(SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Hydrocarbon sources, distribution of the major source rocks and timing of hydrocarbon generation and expulsion are poorly understood in Puffin oilfield, constraining future exploration. Two-dimension hydrocarbon generation modeling and biomarker fingerprinting reveal that the Lower Vulcan marine shale is the most important source rocks in the study area and its peak hydrocarbon generation and expulsion occurred from Cretaceous to Miocene. In contrast, the Plover source rocks got over matured during the Late Jurassic, and contributed limited hydrocarbons due to its low capability of hydrocarbon generation. The events chart shows that the traps on the Puffin horst were mainly formed in the Jurassic-Cretaceous period. Before the Miocene, the hydrocarbon generated from the Vulcan source rocks mainly accumulated in the Jurassic traps in the graben as faults were undeveloped in strata above the Jurassic. At the end of Miocene, lots of vertical faults were created or reactivated by the regional tectonic compression, causing that hydrocarbons in the early pools vertically migrated to and accumulated in the shallow Cretaceous reservoirs. So oil in the discovered Cretaceous reservoirs is mostly secondary.

Key words: source rock, hydrocarbon generation modeling, hydrocarbon accumulation, Vulcan sub-basin, Australia

Vulcan 次盆位于澳大利亚西北大陆架波拿巴盆地西部,是波拿巴盆地的次一级构造单元,总体上为北北东—南南西走向的断陷盆地^[1-3](图1)。Vulcan 次盆蕴藏着丰富的油气资源,20世纪80年代相继发现了 Challis, Jaburo 等一系列商业性油气

藏,成为勘探的热点地区。Puffin 油田位于次盆西南部的 Puffin 地垒上(图1),整体处于一个有利的油气指向区,然而仅在垒带上的白垩系低幅圈闭中找到一些小型油气藏,油气来源不明,主力烃源岩的展布及主要生排烃期不确定等都制约了下一

收稿日期:2012-01-27;修订日期:2012-07-02。

第一作者简介:石磊(1983—),女,工程师,油气勘探。

步勘探的进行,因而深入剖析本区的油源条件不仅为油气成藏过程的认识提供更直接的证据,对于下一步勘探潜力的评价也具有十分重要的意义。

1 烃源岩地球化学特征及其演化

1.1 烃源岩地球化学特征

Vulcan 次盆主要经历了四期构造运动,其中侏罗纪的同裂谷期构造演化控制着烃源岩的形成,卡洛期-牛津期的断裂拉张形成了诸多地堑,如 Swan 地堑、次盆北部的 Paqualin 地堑等,规模最大的就属 Swan 地堑,在其中沉积了厚层的海相泥页岩^[4-6](图 1,图 2)。前人研究认为,Vulcan 次盆主要发育两套烃源岩:中-下侏罗统 Plover 组碳质页岩、煤系地层以及上侏罗统下 Vulcan 组海相泥页岩^[7]。

下 Vulcan 组海相泥页岩,在次盆的深凹陷及地堑中广为分布。钻井及地震资料揭示,下 Vulcan 组海相泥页岩在 Swan 地堑的东北部以及次盆北部的 Paqualin 地堑沉积厚度最大,超过 1 000 m,Paqualin - 1 井实钻厚度可达 1 213 m;而在 Swan 地堑南部浅洼及 Motara 阶地,平均厚度仅 200 ~ 400 m(图 2)。次盆中许多井都钻遇了这套海相泥页岩。大量样品分析数据显示,下 Vulcan

组海相泥页岩为一套较为有利的烃源岩,总有机碳(TOC)值分布范围为 1.5% ~ 2.6%,均值为 1.8%;氢指数分布范围为 150 ~ 400 mg/g,均值为 205 mg/g^[7];干酪根类型为 II 型,主要生油。

中-下侏罗统 Plover 组为一套陆相三角洲到煤系地层沉积,烃源岩段为三角洲平原下部泥质沉积^[6]。由于沉积相变复杂且缺乏钻井资料,目前 Plover 组潜在烃源岩在 Vulcan 次盆中的分布难以预测,仅次盆东部 Montara 阶地上少数井钻遇这套烃源岩(如 Skua - 1 井, Montara - 1 井等),主要为煤层及碳质页岩,平均厚度为 200 m 左右,表现出极高的有机质丰度。煤系地层 TOC 均值高达 54%,碳质泥岩丰度也在 5% ~ 40% 之间;氢指数平均值为 400 mg/g,干酪根类型为 II - III 型为主^[7],由于 Plover 组在 Swan 地堑中埋藏较深,没有井钻遇,因而 Swan 地堑中的 Plover 组烃源岩对于 Puffin 地堑上油气成藏的贡献,未被证实,我们推测其为一套较为有利的烃源岩。

1.2 烃源岩演化特征

为了深入了解次盆中两套烃源岩热演化过程及其主要生排烃期,本次研究选取次盆内 5 条二维测线对区域烃源岩进行系统的二维生烃史模拟,模拟的基本思路是恢复烃源岩的埋藏史,运用 Sweeney 等建立的 EASY%*R*_o 化学动力学理论模



图1 波拿巴盆地构造区划(据 Edwards 等,2004 修改)

Fig. 1 Structural division of Bonaparte Basin(modified from Edwards et al. ,2004)

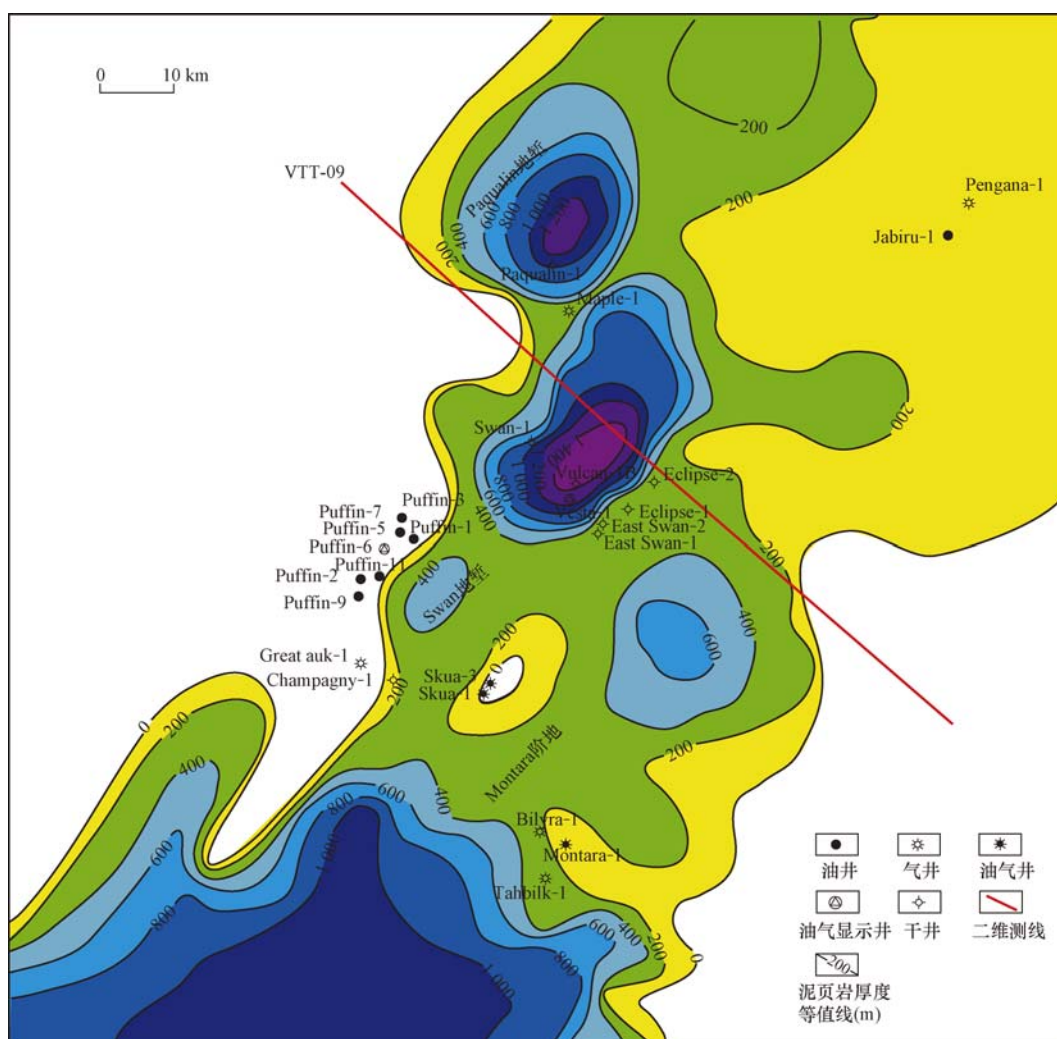


图2 下 Vulcan 组海相泥页岩分布

Fig. 2 Map showing the Lower Vulcan marine shale distribution

型模拟烃源岩的生烃史^[8-10]。模拟边界条件设定中使用的区域古水深、地表温度以及古热流数据均来自 Kennard 等 1999 年发表的 Vulcan 次盆区域热史研究成果^[11-12]。

由于篇幅所限,我们仅展示过 Swan 地堑具有代表性的 VTT-09 线的二维生烃史,模拟结果显示 Swan 地堑中下 Vulcan 组烃源岩在晚侏罗世开始生油,白垩纪—中新世为主要的生排烃阶段,中新世以后基本处于晚期生油和生气阶段(图 3),Swan 地堑东边紧邻的 Montara 阶地上发育的下 Vulcan 组烃源岩由于埋藏相对较浅,热演化程度较低,在中新世末期大部分进入生油窗,现今依然位于生油窗之内。而 Plover 组烃源岩在本区普遍演化程度较高,在晚侏罗世就已进入大量生气阶段,现今处于干气和过成熟阶段,生烃潜力较差(图 3)。

2 Puffin 油田油气源分析

Puffin 油田分为北东和南西两个区块,主要含油层位为上白垩统 Puffin 组储层,分为 UK 和 LK 上下两套含油层序。Puffin 油田大部分油气储集在 LK 砂岩中,但油层厚度较薄,一般不超过 10 m,UK 油藏只分布于南西区块。Puffin 油田原油普遍具有低密度(均值为 0.69 g/cm^3),低粘度(均值为 $0.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$),低胶质+沥青质含量($3.9\% \sim 8.4\%$),低含硫量(0.05%)的特征(表 1),属于低硫轻质原油。原油族组分三角图中(图 4),Puffin 油田原油多数集中在靠近饱和烃的顶角,以轻质饱和烃馏分为主,饱和芳比较高(均值 6.18)(表 1)。原油甾、萘类成熟度参数甾烷 $C_{29}20S/(S+R)$ 和甾烷 $C_{29}\alpha\beta\beta/$

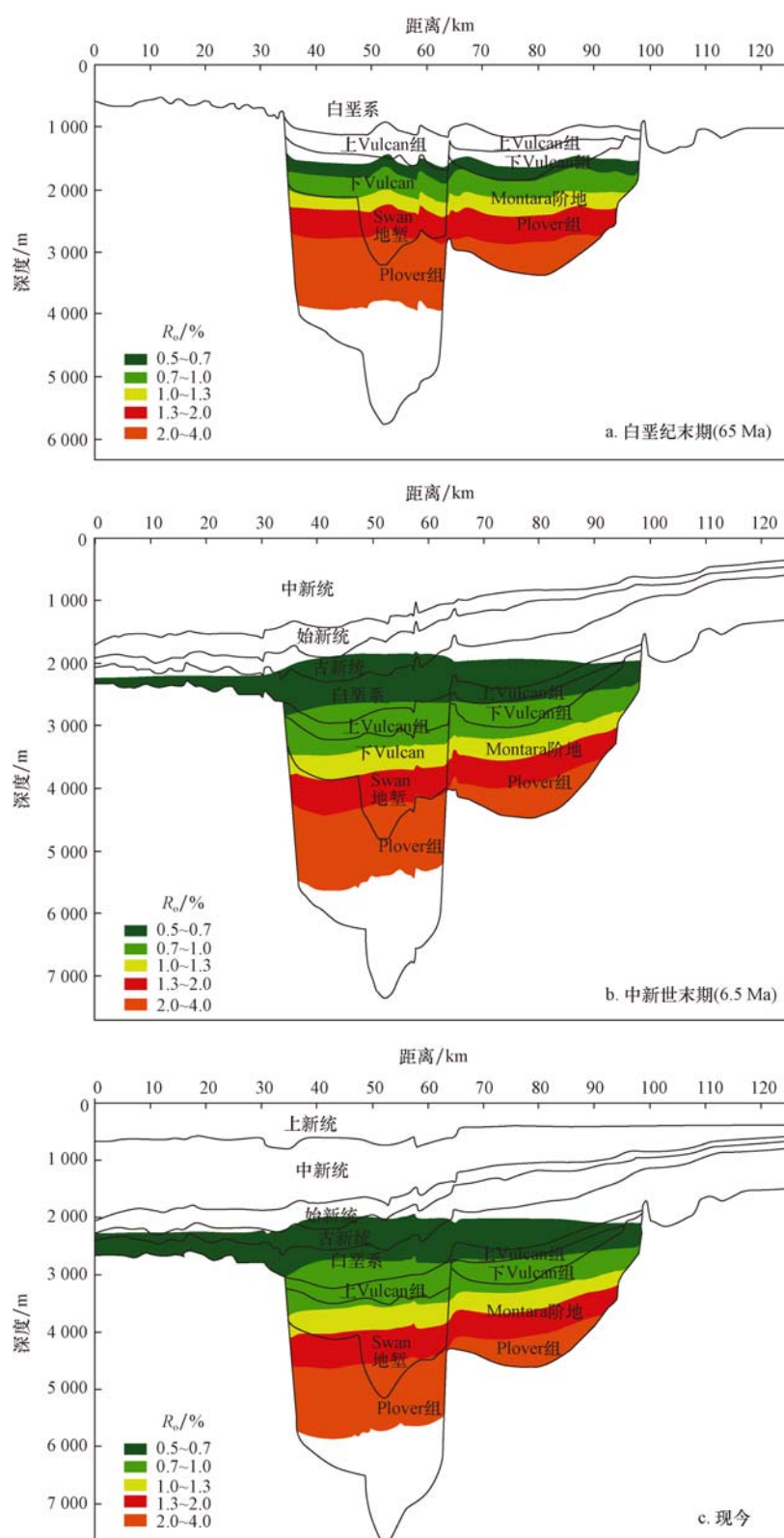


图3 Swan地堑烃源岩演化二维模拟(VTT-09线)

Fig. 3 2D modeling of the source rock evolution in the Swan graben (VTT-09 line)

($\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha$) 均值分别为 0.51 和 0.49, 表明原油整体热演化程度较高。其中, Puffin-9 井原油样品明

显偏高 (分别为 0.62 和 0.55), 而 Puffin-11 井偏低 (分别为 0.43 和 0.44)。轻烃类成熟度参数分异性

表 1 Puffin 油田原油族组分参数表

Table 1 Oil group components of Puffin oilfield

井名	取样层位	族组分含量/%			
		饱和烃	芳烃	非烃	饱和烃/ 芳烃
Puffin-1	LK	81.6	12.0	6.4	6.80
Puffin-3	LK	73.2	20.4	6.4	3.59
Puffin-5	LK	80.5	14.1	5.4	5.71
Puffin-7	LK	79.9	14.6	5.5	5.47
Puffin-9	LK	86.8	9.3	3.9	9.33
Puffin-2	UK	78.4	14.1	7.5	5.56
Puffin-9	UK	75.2	16.4	8.4	4.90
Puffin-9	UK	78.8	14.7	6.5	5.36

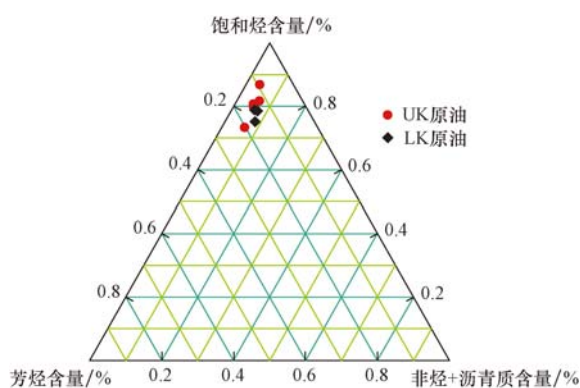


图 4 Puffin 油田原油族组分三角图

Fig. 4 Triangular diagram showing oil group components of Puffin oilfield

则表现得更为明显(图 5)。

前人大量研究表明 Vulcan 次盆内侏罗系发育的两套烃源岩生物标志物分布特征明显不同,下 Vulcan 组海相泥页岩富集藻类生源的 C_{27} 甾烷,并且 C_{23} 三环萜烷占优势,而 Plover 组中代表高等植物输入的 C_{19} 三环萜烷占优势, C_{27} 甾烷含量相对较

低。这种差异性的存在反应出烃源岩生源环境和母质构成的区别,这种差异性也构成了油源对比的基础^[13-16]。

依据原油的甾萜类生物标志化合物特征, Puffin 油田原油可将其划分为两种类型:第一类原油规则甾烷 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 呈“L”型分布,富集藻类生源的 C_{27} 甾烷,并且 C_{23} 三环萜烷占优势(C_{19}/C_{23} 三环萜烷均值为 0.68),这种具有海相成因的原油与 Vesta-1 井下 Vulcan 组抽提物(样品深度 3 240 m, TOC 值为 1.52)指纹特征具有良好的相关性(图 6,图 7), Puffin 油田大部分原油,如 Puffin-1, Puffin-5, Puffin-7 等井原油都表现出这种特征;第二类原油仅见于 Puffin-9 井,成熟度高,甾萜类生物标志化合物指纹特征与第一类原油截然不同,甾类化合物丰度整体偏低,规则甾烷 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 呈“V”型分布,相对第一类原油 C_{27} 甾烷含量明显偏低, C_{19}/C_{23} 三环萜烷比值相对较高,均值为 1.46,表现出陆源的特征。

单体烃碳同位素可反映烃类母源岩沉积环境与生源输入特征,受成熟度、运移分馏的影响,但其影响程度相对较小,一般小于 3‰,因而原油单体烃碳同位素可作为油气来源分析的一个重要指标^[17-18]。在使用生物标志物对比的基础上,我们通过搜集次盆内原油单体烃碳同位素分析测试资料并与 Puffin 油田原油样品进行对比可以看出,典型的下 Vulcan 组成因原油相对 Plover 组成因原油偏轻,反映出陆相原油的单体烃碳同位素值相对海相原油偏重的规律。Puffin-9 井 LK 层原油样品单体烃碳同位素相对 Puffin 油田其他原油样品明显偏重(图 8),表现出陆源特征。Puffin-9 井原油具有较高成熟度表现出部分陆源特征,推测

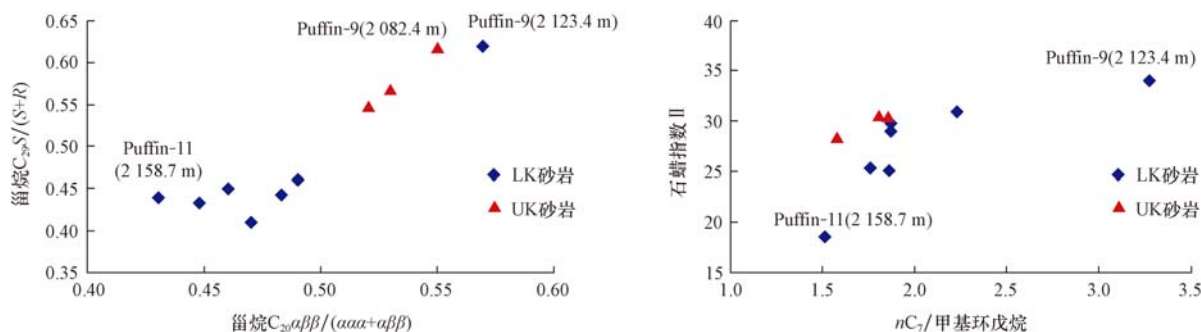
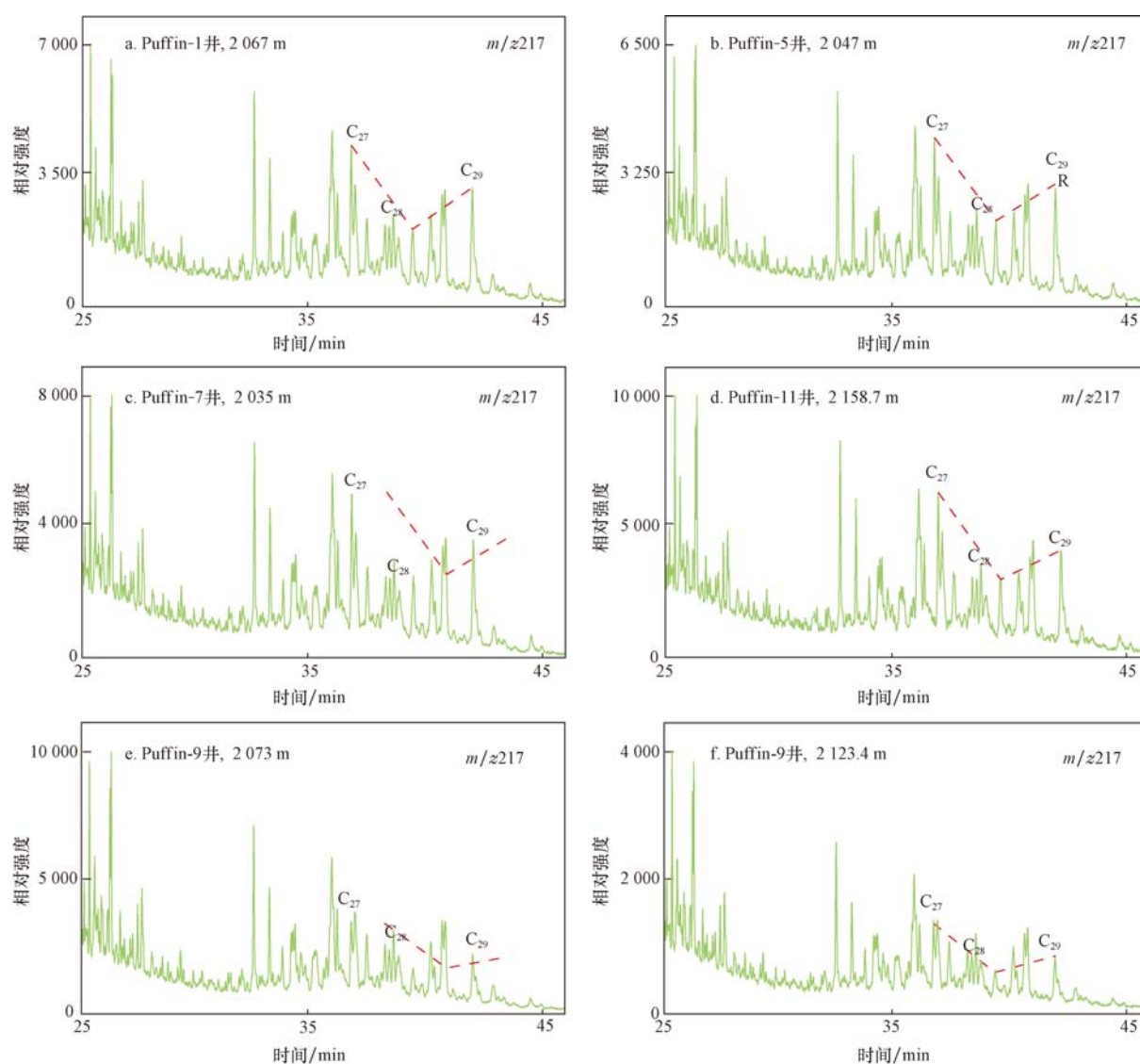


图 5 甾类及轻烃类成熟度参数对比

Fig. 5 Comparison of the sterane and the light hydrocarbons maturity indicator

图6 Puffin 油田白垩系原油甾烷质量色谱(m/z 217)Fig. 6 Sterane mass chromatogram(m/z 217) of the Cretaceous oil samples in Puffin oilfield

其可能混入部分 Plover 组陆相烃源岩生成的高成熟凝析气。

生物标志化合物以及单体烃碳同位素对比结果都表明 Puffin 油田大部分原油来源于下 Vulcan 组海相烃源岩。Puffin 油田少数井原油样品表现出陆源特征,推测可能混入部分 Plover 组陆相烃源岩晚期生成的高成熟油气。近期在油田南部 Greakauk-1 井发现凝析气藏,推测也正是 Plover 组烃源岩晚期生气形成的。

3 成藏过程分析

Puffin 油田主体位于 Puffin 地垒上,向东紧邻

Swan 地堑。油源对比及其烃源岩热演化模拟结果表明 Puffin 油田大部分原油来源于侏罗系下 Vulcan 组海相烃源岩,Plover 组烃源岩在晚侏罗世已经达到高演化程度,对于本区成藏贡献较为有限。Swan 地堑中下 Vulcan 组烃源岩在晚侏罗世开始生油,白垩纪—中新世为主要的生排烃期,中新世以前由于侏罗系以上的地层断裂不发育,下 Vulcan 组主力烃源岩生成的原油主要在地堑中发育侏罗系圈闭中聚集成藏。

中新世末全区域的构造挤压运动形成了一系列北东东向雁列式正断层,并且使早期的断裂体系活化^[19-21],形成许多沟通地堑中油源与垒带上白垩系储层的垂向断裂。早期成藏的油气垂向调

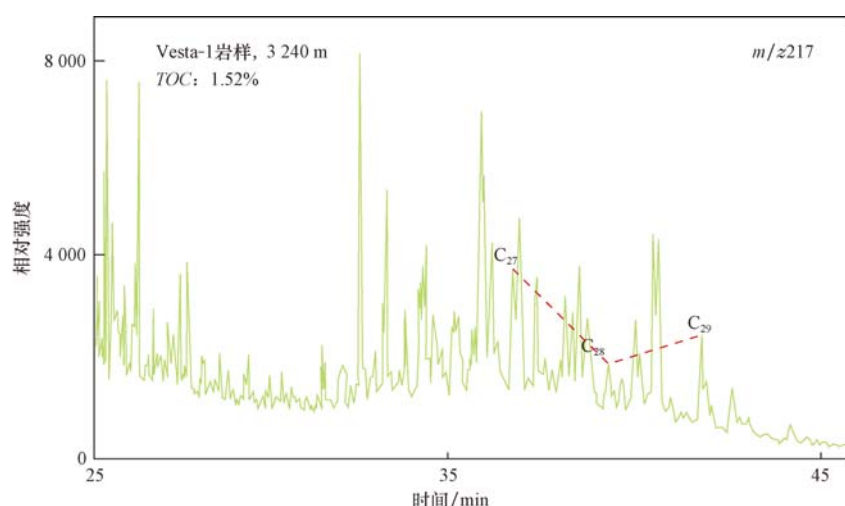
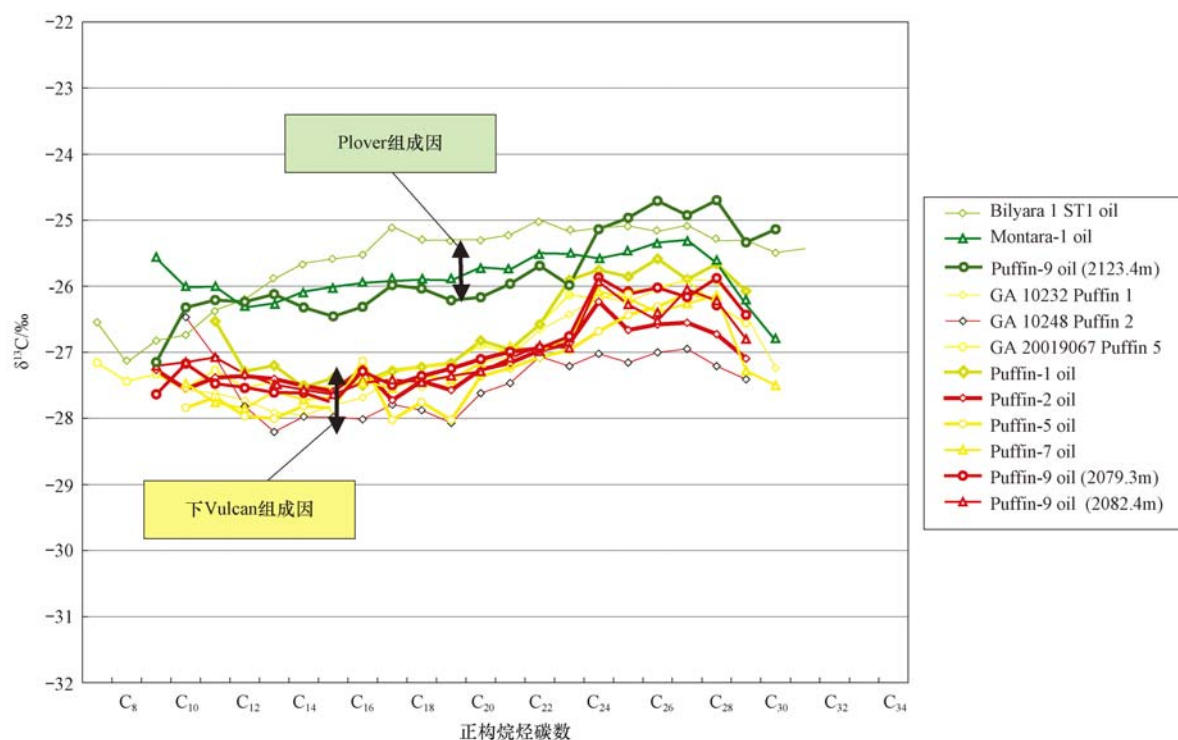
图7 Vesta-1井下Vulcan组烃源岩抽提物甾烷质量色谱(m/z 217)Fig. 7 Mass chromatogram (m/z 217) of extracts from the Lower Vulcan source rocks in the Vesta-1 well

图8 正构烷烃碳单体烃同位素分布(据 Preston,2006 修改)

Fig. 8 Carbon isotope distribution of monomer hydrocarbons in n -alkane (modified from Preston,2006)

整到浅层的白垩系聚集成藏(图9),因此油气大规模运聚发生在中新世末期到上新世。此时Swan地堑中下Vulcan组烃源岩已达到晚期生油-生气阶段,因此油气大规模运聚期要晚于主力烃源岩的生排烃高峰期(图10)。Puffin油田的白垩系油藏主要为晚期成藏和次生成藏,规模有限,并且油气的富集与晚期断层的活动以及断层封闭性有着

密切的联系。

4 结论

1) Vulcan次盆主要发育下Vulcan组海相泥页岩以及Plover组陆相页岩、煤层两套烃源岩。Swan地堑中的下Vulcan组烃源岩在晚侏罗世开

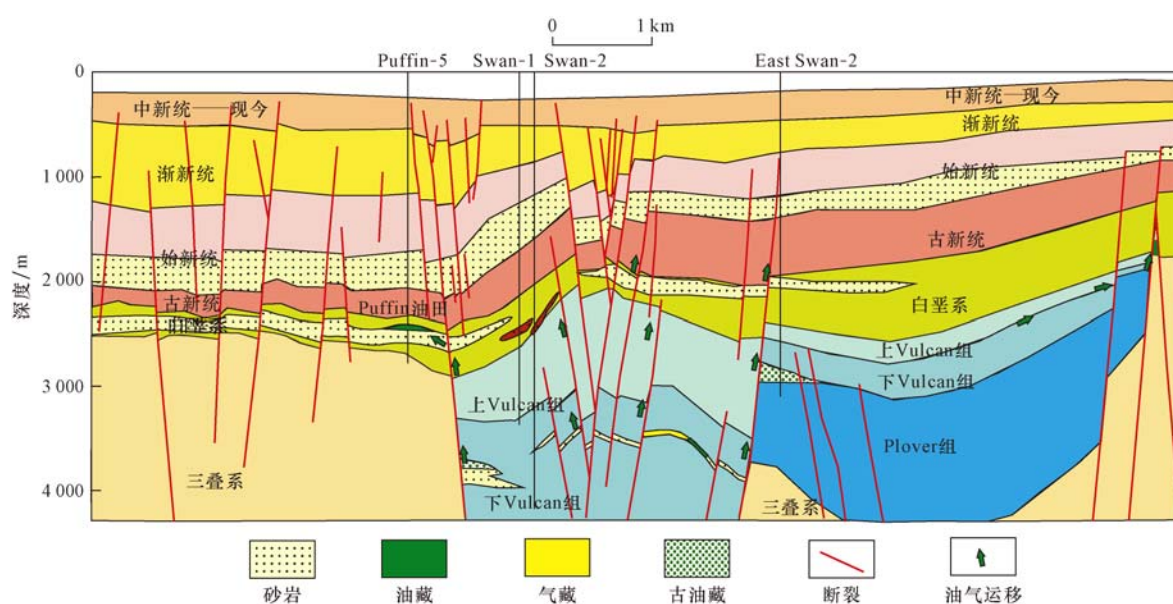


图9 油气成藏模式

Fig. 9 Hydrocarbon migration and accumulation patterns

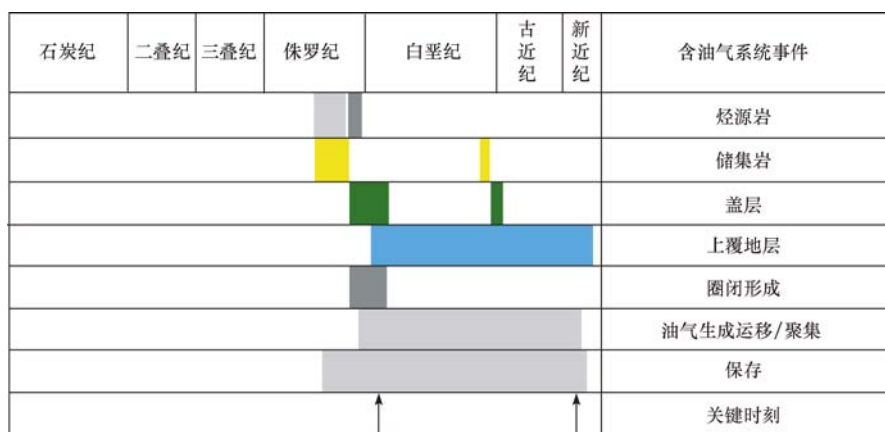


图10 Puffin 油田油气成藏事件

Fig. 10 Events chart showing hydrocarbon accumulation processes in Puffin oilfield

始生油,白垩纪—中新世为主要的生排烃阶段,中新世以后处于晚期生油和生气阶段。Plover 组烃源岩普遍在本区演化程度很高,在晚侏罗世就已进入大量生气阶段,现今处于干气和过成熟阶段。

2) 油源对比结果显示,Puffin 油田大部分原油来源于下 Vulcan 组海相烃源岩,极少数原油,表现出的陆源特征,可能混入了 Plover 组陆相烃源岩晚期生成的高成熟油气。

3) Puffin 垒带上的白垩系圈闭形成于白垩纪末,直到中新世末才形成了沟通油源与垒带上储层的垂向断裂,油气运聚期要晚于主力烃源岩的生排烃期。因此,Puffin 油田的白垩系油藏主要为

次生油藏,为 Swan 地堑中早期成藏的侏罗系油藏后期调整到浅部垒带上聚集成藏。

参 考 文 献

- [1] O'Brien G W, Morse M, Wilson D, et al. Margin-scale, basement-involved compartmentalisation of Australia's North West Shelf; a primary control on basin-scale rift, depositional and reactivation histories[J]. The APPEA Journal, 1999, 39 (1): 40 - 63.
- [2] Geoscience Australia. Oil and gas resources of Australia 2008 [M]. Canberra: Geoscience Australia, 2008.
- [3] Brincat M P, O'Brien G W, Lisk M, et al. Hydrocarbon charge history of the northern Londonderry High: implications for trap

- integrity and future prospectivity [J]. The APPEA Journal, 2001, 41(1): 483–496.
- [4] Hillis R R. Australia-Banda arc collision and in situ stress in the Vulcan Sub-basin (Timor Sea) as revealed by borehole breakout data [J]. Exploration Geophysics, 1991, 22(1): 189–194.
- [5] Preston J C, Edwards D S. The petroleum geochemistry of oils and source rocks from the northern Bonaparte Basin, offshore northern Australia [J]. The APPEA Journal, 2000, 40(1): 231–256.
- [6] Greg J Ambrose. Jurassic sedimentation in the Bonaparte and northern Browse basins: new models for reservoir-source rock development, hydrocarbon charge and entrapment [M] // Ellis G K, Baillie P W, Munson T J. Timor Sea petroleum geoscience: proceedings of the Timor Sea symposium. Darwin: Northern Territory Geological Survey, 2004: 3–22.
- [7] Edwards D S, Preston J C, Kennard. Geochemical characteristics of Vulcan Sub-basin hydrocarbons, western Bonaparte Basin [M] // Ellis G K, Baillie P W, Munson T J. Timor Sea petroleum geoscience: proceedings of the Timor Sea symposium. Darwin: Northern Territory Geological Survey, 2004: 1559–1578.
- [8] 肖卫勇, 王良书, 李华, 等. 渤海盆地地温场研究 [J]. 中国海上油气地质, 2001, 15(2): 105–110.
- Xiao Weiyong, Wang Liangshu, Li Hua, et al. Geotemperature field in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas Geology, 2001, 15(2): 105–110.
- [9] 赵俊峰, 刘池洋, 刘永涛, 等. 南华北地区上古生界热演化史恢复 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 64–74.
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Liu Yongtao, et al. Reconstruction of thermal evolutionary history of the Upper Paleozoic in the southern North China [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 64–74.
- [10] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 10–18.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 10–18.
- [11] Kennard J M, Deighton I, Edwards D S, et al. Thermal history modeling and transient heat pulses: new insights into hydrocarbon expulsion and ‘hot flushes’ in the Vulcan Sub-basin, Timor Sea [J]. The APPEA Journal, 1999, 39(1): 177–206.
- [12] Fujii T, O’Brien G W, Tingate P, et al. Using 2D and 3D basin modeling to investigate controls on hydrocarbon migration and accumulation in the Vulcan Sub-Basin, Timor Sea, Northwestern Australia [J]. The APPEA Journal, 2004, 44(1): 93–122.
- [13] Moldowan J M. 生物标志物指南 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 79–187.
- Moldowan J M. Biomarker Guide [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 79–187.
- [14] Edwards D S, Summons, Kennard, et al. Geochemical characteristics of Paleozoic petroleum systems in northwestern Australia [J]. The APPEA Journal, 1997, 37(1): 351–379.
- [15] Edwards D S, Kennard, J M Preston et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon families and petroleum systems [C] // Geoscience Australia Research Newsletter. Perth: Geoscience Australia, 2000: 14–18.
- [16] 杨伟伟, 柳广弟, 王延山, 等. 辽河滩海地区原油地球化学特征及成因类型 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 642–650.
- Yang Weiwei, Liu Guangdi, Wang Yanshan, et al. Geochemical behaviors and genetic types of crude oil in tidal zone and shallow water area of Liaohe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 642–650.
- [17] 董立, 李鹏, 陈伟, 等. 蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷西部次凹构造特征分析 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25(3): 33–36.
- Dong Li, Li Peng, Zhang Wei, et al. Tectonic characteristics of West subsag of Tanan sag in the Tansag Basin, Mongolia. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 33–36.
- [18] 李素梅, 郭栋. 东营凹陷原油单体烃碳同位素特征及其在油源识别中的应用 [J]. 现代地质, 2010, 24(2): 253–258.
- Li Sumei, Guo Dong. Characteristics and application of compound specific isotope in oil-source identification for oils in Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Geoscience, 2010, 24(2): 253–258.
- [19] Herwig Peresson, Phil Woods E, Paul Fink. Fault architecture along the southeastern margin of the Cartier Trough, Vulcan Sub-basin, North West Shelf, Australia: implications for hydrocarbon exploration [M] // Ellis G K, Baillie P W, Munson T J. Timor Sea petroleum geoscience: proceedings of the Timor Sea Symposium. Darwin: Northern Territory Geological Survey, 2004: 156–167.
- [20] 付兆辉, 秦伟军, 李敏. 渤海湾盆地垦东凸起构造演化及对沉积的控制作用 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25(4): 7–10.
- Fu Zhaohui, Qing Weijun, Li Min. Tectonic evolution and its controlling effect on sedimentation of the Kendong uplift in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(4): 7–10.
- [21] 范昌育, 王震亮, 李萍. 新构造运动对东濮凹陷北部古近系烃源岩生烃的影响及其对浅层油气成藏的意义 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 386–392.
- Fan Changyu, Wang Zhenliang, Li Ping. Influence of Neotectonics on hydrocarbon generation in the Paleogene source rocks of the northern Dongpu Depression and its implications for the forming of oil/gas pools in shallow strata [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 386–392.

(编辑 张亚雄)