



巴布亚褶皱带中生界海相油气充注史及成藏动态演化

谢睿, 林小云, 刘建, 吴东胜

Variation history and dynamic evolution of the Mesozoic marine petroleum in the Papuan Fold Belt

XIE Rui, LIN Xiaoyun, LIU Jian, and WU Dongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023120202>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海西部台北坳陷中生界油气成藏模式研究

Hydrocarbon accumulation model of the Mesozoic in Taipei Depression, western East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 150-158

西湖凹陷玉泉构造油气成藏时空匹配关系研究

On time-space matching of hydrocarbon accumulation in the Yuquan Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 121-129

东海陆架盆地南部中生代构造-沉积演化与油气勘探方向

Tectono-sedimentary evolution of the Mesozoic in the southern East China Sea Shelf Basin and its bearing on petroleum exploration

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 30-40

东海南部中生界烃类生成、运聚与成藏数值模拟

Numerical simulation of Mesozoic hydrocarbon generation, migration and accumulation in the southern East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 138-149

渤海湾盆地中部428构造带近S-N向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用

Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 71-81

东海陆架盆地东南部白垩系油气成藏条件

Cretaceous hydrocarbon accumulation conditions in the southeastern East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 169-176



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢睿, 林小云, 刘建, 等. 巴布亚褶皱带中生界海相油气充注史及成藏动态演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(4): 155-167.

XIE Rui, LIN Xiaoyun, LIU Jian, et al. Variation history and dynamic evolution of the Mesozoic marine petroleum in the Papuan Fold Belt[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(4): 155-167.

巴布亚褶皱带中生界海相油气充注史及成藏动态演化

谢睿^{1,2}, 林小云^{1,2}, 刘建^{1,2}, 吴东胜^{1,2}

1. 长江大学南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室, 武汉 430100

2. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

摘要: 巴布亚盆地是处于澳大利亚板块北移和太平洋板块西移的活动边缘的中、新生代前陆盆地, 巴布亚褶皱带是盆地西北部的次级构造单元, 中生界油气资源丰富, 勘探潜力巨大, 但由于构造活动频繁使得油气聚集-调整过程复杂, 严重制约了该地区油气勘探工作。在油气地球化学特征及来源分析的基础上, 利用多种古温标的联合反演模拟了单井埋藏史和热史, 基于储层流体包裹体分析了充注史, 恢复油气成藏动态演化过程。结果表明: ①巴布亚褶皱带中生界油气主要分布于褶皱带西段和中段, 呈“西气东油”式分布。②油气充注期次可划分为“2期4幕”, 早期3幕油气充注时间为105~85、78~53和47~32 Ma, 表现为低熟油、高熟油和天然气的连续充注过程, 包裹体捕获的原油成熟度更高、规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$ 相对含量更为丰富, 油气来源于侏罗系烃源岩; 晚期1幕油气充注时间为4~0 Ma, 油气表现为“高熟油-天然气”混合充注并有低熟油补充的特征, 现今储层原油成熟度低于早期原油且富含奥利烷, 油气来源于侏罗系—白垩系烃源岩。③油气成藏受多期构造运动影响的烃源岩类型及演化程度、大规模圈闭发育、高效垂向-侧向输导体系和保存条件的控制, 通过以构造演化为线索建立的“双源垂向侧向短距供烃-聚集调整过程动态平衡”油气成藏动态演化模式, 提出了位于挤压推覆构造带下盘的白垩系烃源岩对中生代含油气系统同样具有烃源贡献的认识, 以期为该地区下一步的油气勘探提供参考。

关键词: 油气地球化学特征; 油气充注史; 成藏动态演化; 中生界; 巴布亚褶皱带

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023120202

Variation history and dynamic evolution of the Mesozoic marine petroleum in the Papuan Fold Belt

XIE Rui^{1,2}, LIN Xiaoyun^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, WU Dongsheng^{1,2}

1. Hubei Provincial Key Laboratory of Southern Complex Shale Oil and Gas Geology and Development, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

2. College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

Abstract: The Papuan Basin, positioned in the dynamic boundary where the Australian Plate shifts northward and the Pacific Plate moves westward, is a Mesozoic and Cenozoic foreland basin. Within this basin, the Papuan Fold Belt stands out as a secondary structural unit rich in Mesozoic oil and gas reserves, harboring immense exploration potential. However, frequent tectonic activity in the area complicated the aggregation and adjustment of oil and gas, posing significant challenges to hydrocarbon exploration. By analyzing the geochemical characteristics and sources of oil and gas, the joint inversion of multiple ancient temperature scales was used to simulate the burial history and thermal history of a single well. Additionally, by analyzing reservoir fluid inclusions, the dynamic evolution of hydrocarbon formation was restored. The results indicate that: (1) the Mesozoic oil and gas in the Papuan Fold Belt situated predominantly in the western and central sections, following a "gas in the west and oil in the east" distribution pattern. (2) The oil and gas filling epochs could be categorized into "two phases and four episodes." During the first three episodes, spanning 105~85 Ma, 78~53 Ma, and 47~32 Ma, the filling process progressed from low-maturity oil to high-maturity oil and then to natural gas. The crude oil trapped in inclusions during these periods exhibited higher maturity, containing an abundant amount of regular steranes $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$, pointing to a Jurassic source rock. The later filling episode during 4~0 Ma, showed a mixed filling of highly mature oil and natural gas, with traces of low-maturity oil. The crude oil currently stored in the reservoir displayed lower maturity than its predecessors and is enriched with oleanane, suggesting the Jurassic and Cretaceous source rocks as its origin. (3) The formation of oil and gas reservoirs was influenced by multiple tectonic movements, including the types and evolutionary degrees of source rocks, the development of large-scale traps, efficient vertical lateral transport systems, and preservation conditions. This study introduced

资助项目: 中海油北京研究中心合作项目“巴新前陆区油气成藏组合与分布研究”(CCL2017RCPS0125GSN)

作者简介: 谢睿(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事油气成藏研究工作, E-mail: 201671263@yangtzeu.edu.cn

通讯作者: 林小云(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事油气成藏地质与资源评价的科研和教学工作, E-mail: linxy65@126.com

收稿日期: 2023-12-02; 改回日期: 2024-04-24. 周立君编辑

a dynamic evolution model called "dynamic equilibrium of dual-source vertical and lateral short-distance hydrocarbon supply accumulation adjustment", based on clues from structural evolution. This study proposed an understanding that the Cretaceous source rocks located in the lower plate of the compression thrust belt also have hydrocarbon source contributions to the Mesozoic oil and gas system, and provided insight to the future oil and gas exploration in the region.

Key words: geochemical characterization of hydrocarbon; history of hydrocarbon charging; dynamic evolution of hydrocarbon formation; Mesozoic; Papuan Fold Belt

油气藏的形成是沉积盆地发育演化过程中地质作用和成藏要素时空耦合的产物。对于构造演化历史复杂的盆地而言, 油气充注通常具有多源、多期性。油气充注史是重建油气成藏过程的关键, 基于油气性质差异特征和变化规律, 以烃源岩生烃演化为主线, 结合储层流体包裹体分析和锆石/磷灰石裂变径迹热演化史, 恢复油气充注时间并划分成藏期次。油气成藏动态演化是以油气藏形成过程中的地质作用和成藏要素的动态演化为主线, 恢复油气生成-运移-聚集-调整的动态过程, 其目的是明确油气分布规律, 预测潜在油气藏的位置。

巴布亚盆地是发育在古生界结晶基底之上, 具有“东西分块”构造格局的中、新生代前陆盆地^[1-4]。盆地油气勘探始于20世纪初期, 早期勘探主要循迹盆地东部沿岸地表油苗开展浅井钻探, 长时间内少有商业油气发现; 至20世纪60年代, 浅海和陆上油气勘探日趋活跃, 但仅有少数非商业油气发现证实了盆地具有勘探前景; 至20世纪90年代后, 由于勘探理论和勘探技术的发展, 陆续在盆地西部山麓雨林带和东部浅海区取得了一系列重大油气发现,

开启了巴布亚盆地勘探热潮。截至2019年, 盆地内约有75%的油气发现集中于巴布亚褶皱带中生代含油气系统, 但由于巴布亚褶皱带自渐新世以来一直处于陆陆碰撞、弧陆碰撞的前缘^[5], 构造活动频繁使得油气聚集-调整过程复杂^[6-7], 油气来源和油气成藏演化过程不明确等问题严重制约了该地区油气勘探工作。国内外学者对巴布亚盆地的构造、沉积特征和油气地质条件已有一定的认识^[8-16], 但对于巴布亚褶皱带油气充注史和成藏过程的研究较少, 本文基于采集的4口钻井11个中生界储层包裹体样品, 参考公开发表文献中33个油气样品的地球化学资料和2个含油气构造的11个低温热年代学资料(图1), 在油气地球化学和成藏年代学的指导下, 探讨了巴布亚褶皱带中生界多期油气的来源差异、充注时间和成藏演化过程, 以期为该地区下一步的油气勘探提供参考。

1 地质概况

巴布亚盆地主体位于巴布亚新几内亚境内, 呈

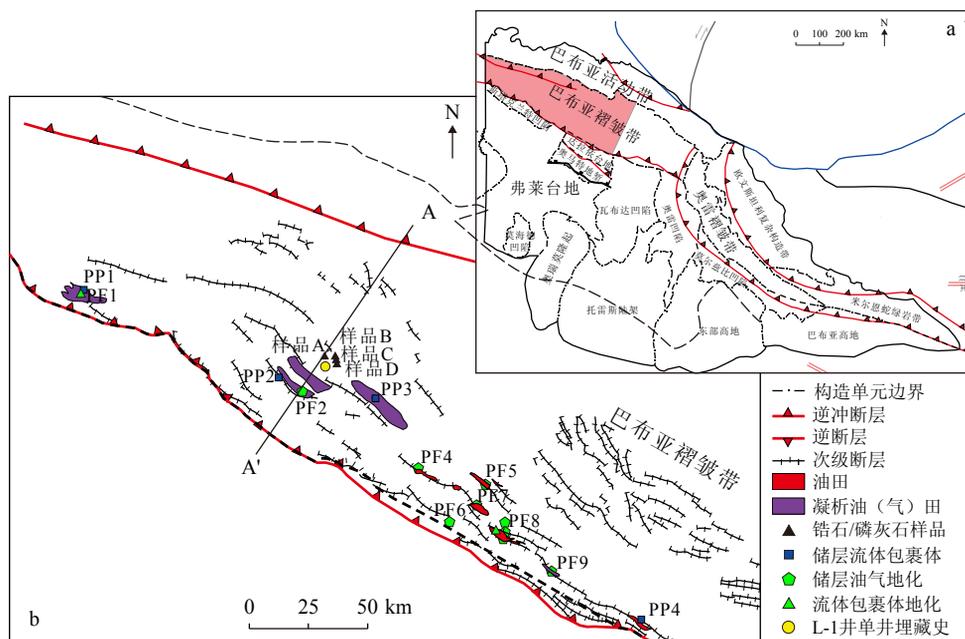


图1 巴布亚褶皱带构造单元与样品分布图

Fig.1 Structural units and sample distribution in the Papuan Fold Belt

近东西向横跨海陆展布, 大地构造处于澳大利亚板块北移和太平洋板块西移的活动边缘。盆地受东西差异构造演化控制, 分别形成了巴布亚(西)和奥雷(东)两个周缘前陆系统, 发育前陆活动带、前陆褶皱带、前渊斜坡带和隆起带, 可进一步划分出 14 个三级构造单元(图 1)。巴布亚盆地经历冈瓦纳裂谷阶段、被动陆缘阶段、珊瑚海裂谷-裂后阶段、周缘前陆阶段和碰撞改造阶段的“三张两挤”共 5 期构造演化(图 2)^[3-5]: ①冈瓦纳裂谷阶段(早侏罗世—中侏罗世): 随冈瓦纳大陆裂解, 古洋壳向澳洲板块俯冲, 诱发了塞皮克地块和新几内亚地块分离, 盆地北部发育近东西向的裂谷; ②被动陆缘阶段(晚侏罗世—早白垩世): 随着塞皮克洋持续张开, 盆地进入裂后热沉降-被动陆缘阶段; ③珊瑚海裂谷-裂后阶段(晚白垩世—古新世): 受全球海平面下降和珊瑚海打开的热隆事件导致的区域整体抬升, 巴布亚盆地遭受“东强西弱”的差异抬升剥蚀作用^[7], 随盆地北部的所罗门海(Solomom Sea)、俾斯麦海(Bismarck Sea)和加罗林海(Caroline Sea)依次打开, 盆地再次经历裂谷-裂后盆地演化阶段^[18]; ④区域周缘前陆阶段(渐新世—中新世早期): 盆地北缘塞皮克洋盆斜向关闭, 受来自北部俯冲综合作用影响, 区域周缘前陆盆地开始形成; ⑤弧陆碰撞改造阶段(中中新世至今): 盆地北部与太平洋美拉

尼亚岛弧发生持续强烈碰撞, 东、西部分别形成了奥雷前陆系统和巴布亚前陆系统。

巴布亚前陆系统由巴布亚活动带、巴布亚褶皱带和弗莱台地组成, 构造上具有“窄前渊”或前渊和斜坡区不发育的特点^[5]。巴布亚褶皱带作为板块运动和地块拼贴的前缘, 记录了晚白垩世以来受珊瑚海扩张影响、塞皮克板块拼贴和岛弧碰撞造成的 3 期构造挤压, 残余中生代地层保存相对完好, 新生代两期构造抬升导致古近系和全新统遭受剥蚀缺失(图 2)。

裂谷-被动陆缘阶段, 盆地热沉降和陆缘向海倾斜, 自弗莱台地向巴布亚褶皱带形成西南高、东北低的宽缓斜坡。巴布亚褶皱带作为盆地中生代沉积中心, 经历海进-海退-海进沉积旋回, 沉积环境从三角洲向滨浅海过渡。早侏罗世, 沉积物源来自弗莱台地构造高地, 三角洲前缘和滨浅海沉积近乎平行于巴布亚褶皱带自南西向北东推进发育; 中侏罗世, 巴布亚褶皱带经历了最大规模的一期海侵, 整体发育浅海沉积; 晚侏罗世时期, 受海平面持续动荡、上升及物源供给充足双重作用, 发育三角洲前缘席状砂与浅海相泥岩互层沉积。早白垩世, 受大规模海退控制, 主要沉积滨浅海相砂岩夹泥岩, 形成了该地区最主要的储集层; 晚白垩世, 盆地再次发生海侵, 沉积厚度达 200~600 m 的浅海相泥页岩

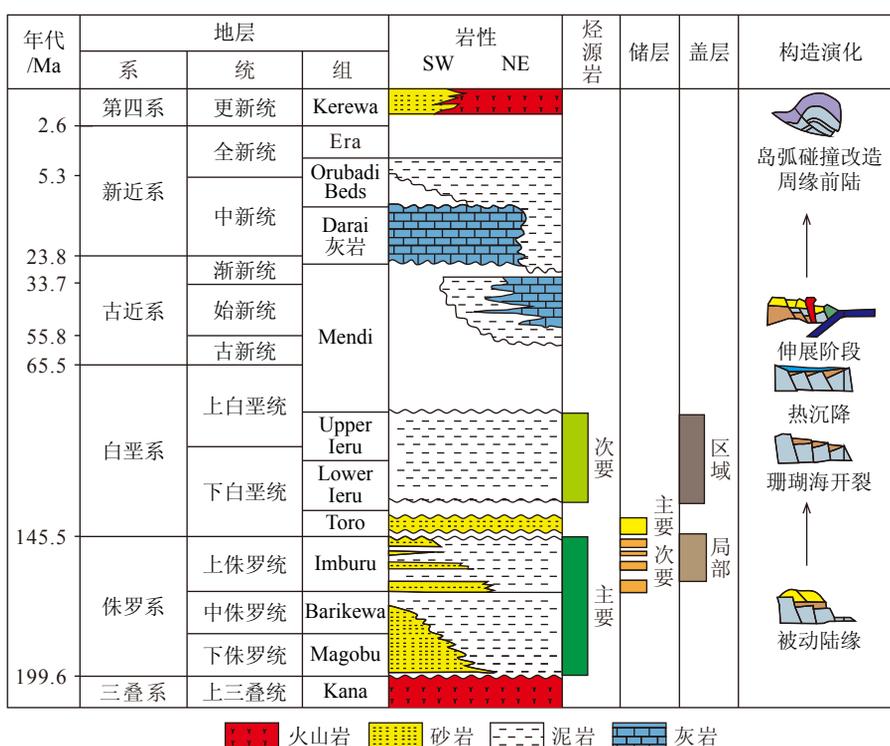


图 2 巴布亚褶皱带地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Papuan Fold Belt

广泛覆盖全区。

珊瑚海裂谷-裂后阶段,区域隆升剥蚀造成褶皱带西段几乎缺失了古近纪地层,而东段地层更为完整;周缘前陆阶段早期,受渐新世—中新世全球海平面上升的控制,巴布亚褶皱带地区由区域隆升剥蚀阶段转入水下隆起阶段,发育 Darai 组浅水碳酸盐岩沉积;弧陆碰撞改造时期,巴布亚褶皱带整体进入挤压抬升阶段。由于褶皱带西段受到3期挤压作用,东段仅发育渐新世后的2期挤压作用,挤压应力大小和期次不同,巴布亚褶皱带西、东段的构造变形强度和构造样式存在明显差异,可将其划分为西段基底卷入带和东段盖层滑脱带^[7,9]。西段基底卷入带主要发育高角度或较高角度的逆冲构造样式,几何形态呈冲隆型或轻微叠瓦型,构造核部隆升导致中新统 Darai 灰岩被广泛剥蚀;东段盖层滑脱带发育以 Darai 灰岩层之下的 Ieru 泥岩和靠近基底 Barikewa 泥岩为滑脱介质的滑脱构造,滑脱面之上背斜构造发育,滑脱面之下地层多呈陡立形态。

2 油气地球化学特征

2.1 烃源特征

巴布亚褶皱带中生界烃源岩受三角洲前缘-滨浅海沉积体系控制,侏罗系自下而上发育下侏罗统 Magobu 组炭质泥岩、中侏罗统 Barikewa 组暗色泥岩和上侏罗统 Imburu 组暗色泥岩,侏罗系烃源岩主要分布在巴布亚褶皱带中东部的前三角洲和三角

洲前缘亚相,各套暗色泥岩厚度整体平行于巴布亚褶皱带自北向南减薄。白垩系发育 Ieru 组暗色泥岩,分布在巴布亚褶皱带及以南的浅海弱还原环境,厚度高值区发育于巴布亚褶皱带中南部,并向东西两侧逐渐减薄^[10]。

下侏罗统 Magobu 组发育海陆过渡相烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主,有机碳含量 1.0%~2.0%;中侏罗统 Barikewa 组发育混合生源型-海相陆源型烃源岩,有机质类型以Ⅱ₂-Ⅲ型为主^[19],有机碳含量 1.0%~2.0%^[20];上侏罗统 Imburu 组发育海相陆源型烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主^[19],有机碳含量呈双峰分布于 0.5%~1.0% 和 1.0%~2.0%^[6]。白垩系 Ieru 组发育海相陆源型烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主,有机碳含量 0.5%~2.0%^[10]。侏罗系—白垩系海相陆源型和混合生源型烃源岩均发育于海洋环境中,前者以陆源高等植物输入为主,各套烃源岩由三角洲平原向三角洲前缘至前三角洲-浅海相带均呈现有机质丰度和氢指数逐渐升高的趋势^[8]。

本文基于构造演化^[1-5]和低温热年代学^[21]的研究成果,利用一维盆地模拟技术恢复了 L-1 井中生界烃源岩热演化史。L-1 井位于巴布亚褶皱带西段 L 背斜北翼(图 1a),钻井揭示了上侏罗世—中新世地层,模拟过程中参考地震资料和邻井钻遇侏罗系厚度对下侏罗统厚度进行赋值。锆石/磷灰石裂变径迹热演化史^[21](图 3a)记录了早白垩世以来该地区两期沉降-抬升作用,样品 A、B、C、D 取自邻近 L-1 井的野外露头,其中样品 A 取自下侏罗统中一粗砂岩,样品 B 和 C 取自中侏罗统中一细砂岩,样

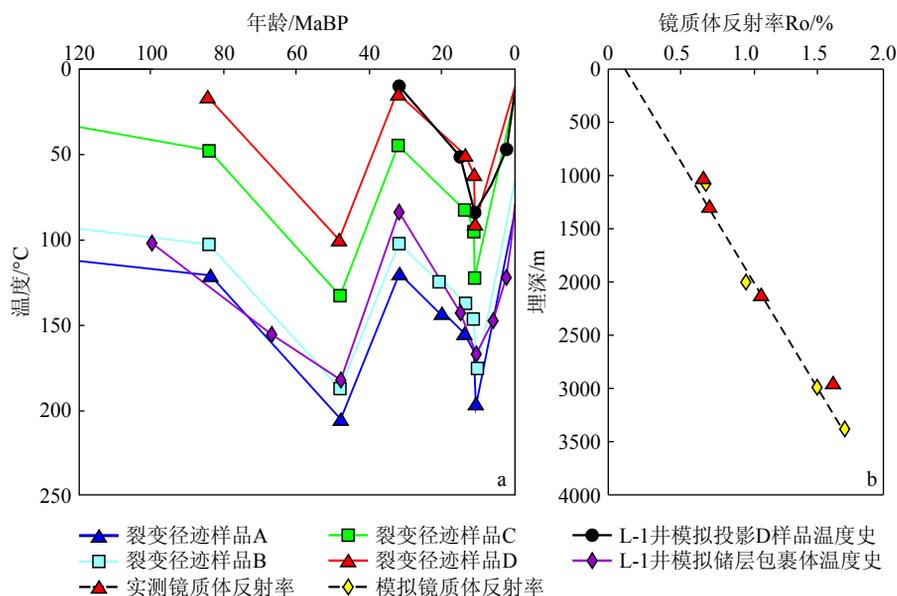


图3 L-1井热史(a)和镜质体反射率校准图(b)

Fig.3 The thermal history (a) and vitrinite reflectance calibration chart (b) for Well L-1

品 D 取自上白垩统细粒泥质砂岩。4 个样品的热史模拟结果揭示该地区早白垩世以来主要经历了始新世(48~32 Ma)和中新世至今(11~0 Ma)两期快速冷却时间。依据锆石/磷灰石样品在地层中相对位置, 将 L-1 井对应深度位置的热史模拟进行投影以校准热史, 并利用实测镜质体反射率约束烃源岩热演化模拟结果(图 3b)。模拟镜质体反射率与实测镜质体反射率吻合程度良好, 表明由裂变径迹热演化史记录的地层经历的最大古地温相对可靠。

在此基础上, 结合岩性参数、现今地表温度数据、现今地温梯度、岩石热物理参数和地层分层及年龄等数据计算巴布亚褶皱带现今大地热流值约为 35~37 mW/m²。巴布亚盆地由被动陆缘盆地转为前陆盆地, 盆地下覆岩石圈厚度逐渐增大, 自侏罗纪以来古大地热流值应呈现逐渐降低的趋势。早侏罗世—古新世, 盆地经历持续的热沉降-沉积作用, 未受抬升剥蚀影响, 裂变径迹热演化史可用以校准古大地热流值, 经计算, 侏罗纪时期大地热流值约为 55~70 mW/m², 白垩纪时期大地热流值约为 50~55 mW/m²; 由于古新世至今的大地热流值计算受到剥蚀量估算的影响, 本文根据现今大地热流值假设古新世大地热流值约为 40~45 mW/m², 渐新世至今大地热流值约为 35~40 mW/m²。在裂变径迹热史、镜质体反射率和古大地热流值的共同约束下, 恢复了 L-1 井处古新世—始新世剥蚀量为 2200 m、中中新世至今剥蚀量为 3500 m。

烃源岩热演化模拟结果表明: Magobu 组烃源岩早白垩世中期进入生油阶段($R_o > 0.5\%$), 晚白垩世

早期进入生油高峰($R_o > 1.0\%$), 晚白垩世末期进入生湿气阶段($R_o > 1.3\%$), 并于始新世中期进入生干气阶段($R_o > 2.0\%$); Barikewa 组烃源岩早白垩世末期进入生油阶段, 晚白垩世中期进入生油高峰, 晚白垩世末期进入生湿气阶段; Imburu 组烃源岩早白垩世末期进入生油阶段, 晚白垩世末期进入生油高峰, 古新世末期进入生湿气阶段; 侏罗系烃源岩早白垩世中期开始生烃, 晚白垩世末期达到生烃高峰, 巴布亚褶皱带中西段为成熟中心。下白垩统 Ieru 组烃源岩古新世进入生油阶段, 始新世早期进入生油高峰, 成熟中心位于巴布亚褶皱带中段(图 4)。

裂变径迹样品热演化史模拟表明了中生界于始新世早期达到最大埋藏温度, 烃源岩热演化成熟度达到最高; 至中新世, 虽然中生界埋藏深度较始新世早期有所增加, 但由于大地热流值降低和上覆泥岩地层遭受剥蚀而被碳酸盐岩沉积所取代的双重影响, 中生界埋藏温度并未达到烃源岩二次生烃所需温度。但值得注意的是, 由于钻井目的层多为逆冲推覆断层上盘的砂岩储层, 而中生界位于逆冲断层下盘的重复地层少有揭示。中中新世以来, 逆冲推覆构造广泛发育, 相比较断层上盘中生界而言, 断层下盘重复地层的埋深增加 2000 m 以上, 断层下盘中生界埋藏深度随推覆程度增加而增大, 地层叠置加厚促使下部烃源岩保持了连续的成熟演化, 尤其是白垩系 Ieru 组烃源岩在先期深埋过程中热演化程度相对较低, 在地层叠置深埋过程中可能存在二次生烃作用。同时由于深大断裂的沟通输导作用, 形成了有效的油源供给。对于复杂褶皱带

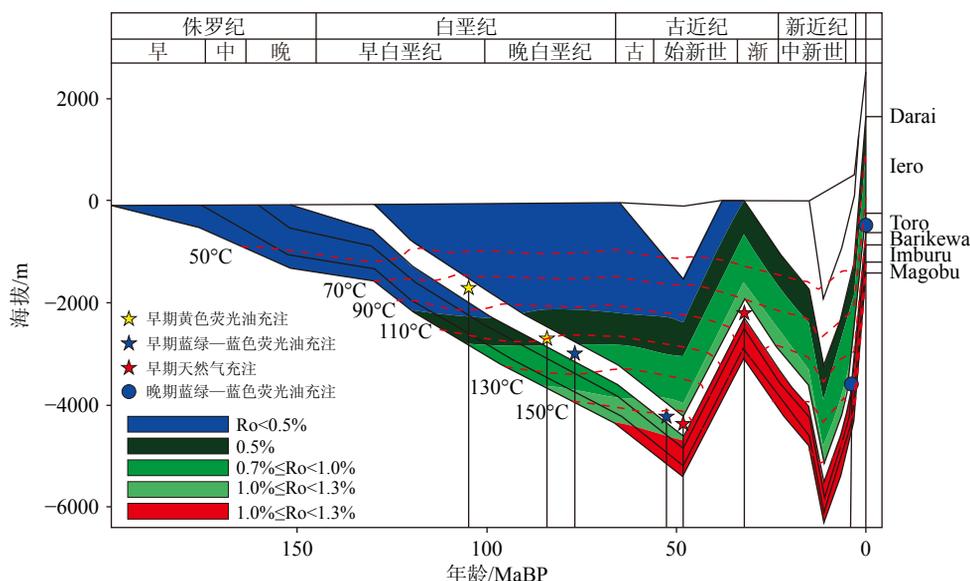


图 4 L-1 井埋藏史及油气充注期次和时间

Fig.4 Burial history and determination of oil and gas filling periods and times for Well L-1

而言,存在大规模成熟烃源岩并且圈闭形成时间与油气充注时间相匹配,为油气藏的形成提供了有利条件。

2.2 油气类型及分布特征

巴布亚褶皱带中生界油气主要分布于褶皱带西段和中段,纵向上油气分布在下白垩统 Toro 组和上侏罗统 Imburu 组砂岩储层。油气类型包括凝析油(气)和原油,API 范围为 $35^{\circ}\sim 62^{\circ}$,平面上呈现“西气东油、西轻东重”的分布特征,其中多数油藏为带气顶的饱和油藏(例如 PF4、PF7 和 PF8),气油比约为 $178\text{ m}^3/\text{m}^3$,天然气干燥系数为 $0.7\sim 0.92$,兼含原油伴生气、凝析气和干气^[22]。

巴布亚褶皱带西段凝析油藏与中段油藏轻烃组分具有明显差异,PF2、PF3、PF4 和 PF6 凝析油和原油样品均取自下白垩统 Toro 组,其中 PF2 和 PF3 凝析油中 C_{10} 以下的轻烃组分更为丰富,主峰碳数为 C_{11} (图 5a、b);PF4 油则几乎缺失了 C_{10} 以下轻烃组分,主峰碳后移至 C_{17} (图 5c);PF6 油正构烷烃中 C_{15} 以上组分更加丰富(图 5d),轻烃中甲基环己烷(MCH)含量明显高于甲苯(T)和间二甲苯+对二甲苯(m+p-xylene),成为 $C_4\text{-}C_7$ 轻烃组分的主峰。甲基环己烷主要来源于高等植物的木质素、纤

维素和糖类^[23],甲基环己烷指数可区分不同母质形成的油气^[24],小于 $50\%\pm 2\%$ 为腐泥型母质生成的油型气,大于 $50\%\pm 2\%$ 为腐殖质生烃母质贡献。PF2 和 PF3 凝析油的甲基环己烷指数分别为 52% 和 47%,表明其生源母质中腐泥型组分占优势;PF6 原油甲基环己烷指数为 58.94%,表明其生源母质中腐殖型组分占优势。

原油的庚烷值和异庚烷值分布与其烃源岩的干酪根类型有关^[25-26],巴布亚褶皱带中生界原油样品多数落在脂肪族和芳香族之间或脂肪族(图 6a),整体表现出生源母质以混合生源为主。PF3 凝析油靠近芳香族分布,指示其生源母质中腐殖型组分占优势,PF6 原油沿脂肪族分布,指示其生源母质中腐泥型组分占优势。PF3 凝析油和 PF6 原油均出现了庚烷值和异庚烷值分布与甲基环己烷指数指示生源母质类型存在矛盾的现象,这常与油藏次生蚀变作用和混源充注有关^[27-28]。巴布亚褶皱带中生界凝析油藏和油藏中天然气以烃类气体、氮气和二氧化碳为主,不含硫化氢,未发现明显的硫酸盐热还原作用,而且原油中正构烷烃分布完整且未见明显“UCM”鼓包,表明生物降解和水洗作用不明显。

C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷的相对含量是判别油气来源的有效指标。利用油包裹体和储层油的

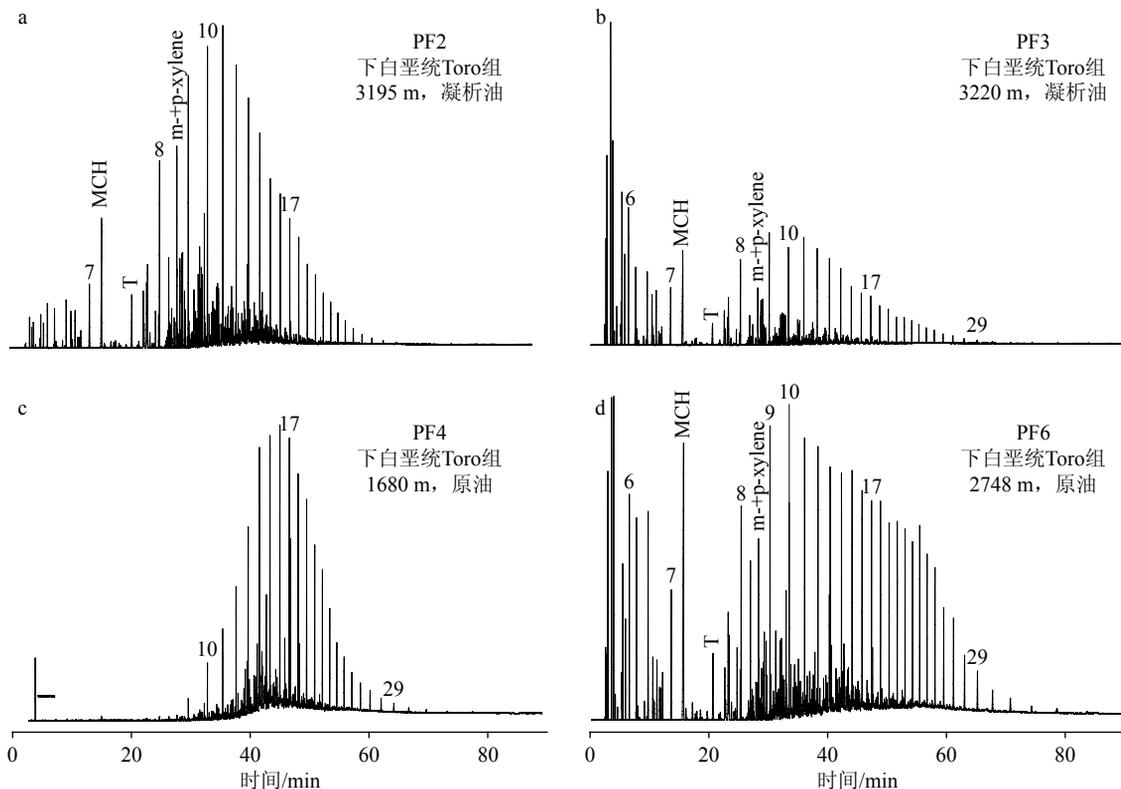


图 5 巴布亚褶皱带中生界油气典型轻烃组分特征

Fig.5 Characteristics of Mesozoic oil and gas light hydrocarbon components in the Papua Fold Belt

$\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$ 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷相对含量指示古油藏和现今油藏的原油有机质生源,西段凝析油藏和中段油藏中的油包裹体规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$ 相对含量均较为丰富(图 6b)^[29-30], PP1 和 PF8 油包裹体中原油规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$ 相对含量分布范围为 53%~63%, 规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{29}$ 相对含量分布范围在 21%~27%, 指示古油藏原油有机质生源以浮游生物为主, 应源于还原环境的烃源岩; PP1、PF2、PF3、PF5、PF6、PF7 和 PF8 等现今油藏中的规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{27}$ 相对含量分布范围为 15.06%~34.02%, 规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha(20R)-C_{29}$ 相对含量分布于 34.78%~68.62%, 表明较古油藏而言, 现今油藏中原油以混合生源为主且生源偏向高等植物占主导的特点, 陆源有机质的贡献更多, 应源于偏氧化的弱还原环境烃源岩, 这也进一步印证了中生界油气是源于不同时期烃源岩的油气混注。同时, 中生界油气藏中均检测到含量不等的奥利烷, 西段 PF3 原油奥利烷指数(奥利烷/ C_{30} 藿烷)为 0.56~0.74, 其余油藏奥利烷指数为 0.03~0.10^[22]。奥利烷通常被视作来源于晚白垩世之后才繁盛的被子植物^[31-33], 也被国内外学者作为区分该地区侏罗系油源和白垩系油源的证据^[34-36], 这也印证了白垩系烃源岩是该地区有效烃源岩之一, 并在褶皱带西段具有更多的烃源贡献。

天然气组分碳同位素组成可用于判识天然气成因及演化程度^[37-38], 研究区天然气甲烷、乙烷、丙烷碳同位素组成含量分别为 $-44.2\text{‰} \sim -36.7\text{‰}$ 、 $-31.0\text{‰} \sim -27.1\text{‰}$ 、 $-28.5\text{‰} \sim -21.9\text{‰}$, 巴布亚褶皱带中生界天然气碳同位素特征表明 PP1、PF2、PF6、PF7 和 PF8 天然气以油型气为主, PF3 和 PP4 天然

气为煤成气和油型气的混合气, PF4 为煤型气(图 7a)。PP1、PF2、PF3 凝析油藏和 PF5、PF6、PF7、PF8 油藏原油的 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷相对含量均指示其生油母质以混合生源为主且生源偏向高等植物占主导的特征, 说明同一油气藏中原油和天然气的来源并不一致。以 PF3 凝析油藏为例, 天然气同位素组成指示油藏中气态烃组分的生源母质以腐泥型有机质组分占优势, $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 规则甾烷相对含量指示液态烃组分的生源母质以腐殖型有机质组分占优势。同时, 由于 C_4-C_7 轻烃既可被溶解在原油中以油相运移, 也能溶于天然气中以气相运移, 因此原油的混入, 可能会导致甲基环己烷指数以及庚烷值和异庚烷值分布指示的生源母质出现了分别以腐泥型组分占优势和腐殖型组分占优势的特征。多种油气地化指标反映的生源母质出现差异的原因是多期成藏混合作用。

包裹体捕获原油的甾烷成熟度指标 $20S/20S+20R-C_{29}$ 比值、多环芳烃中甲基菲指数(MPI)和甲基菲比值(F1)^[29-30] 均高于储层油, 表明在油气成藏过程中先期充注原油的成熟度高于晚期充注的原油。结合中生界烃源岩类型和生烃演化, 认为先期充注原油主要来源于最大海侵时期发育的中侏罗统 Barikewa 组烃源岩, 晚期充注原油主要来源于上侏罗统 Imburu 组烃源岩-白垩系 Ieru 组烃源岩。

天然气中重烃气碳同位素组成不仅受控于生气母质类型, 同时与生气母质成熟度密切相关。Hood 等^[39] 提出了利用天然气乙烷、丙烷碳同位素组成建立有机质变质程度, 指示在油气生成的整个范围内连续变化并与埋藏深度呈线性关系的烃源岩成熟等级。利用碳同位素组成分析研究区天然

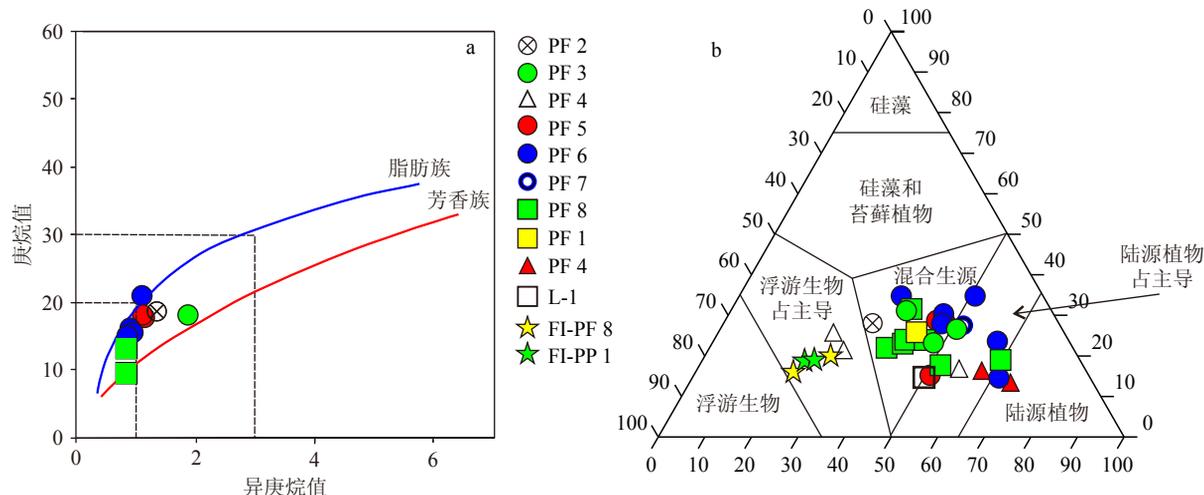


图 6 巴布亚褶皱带中生界油气庚烷值-异庚烷值分布 (a) 和 $C_{27-28-29}$ 规则甾烷相对含量三角图 (b)

Fig.6 Distribution of heptane-isoheptane and the triangle diagram of relative content of $C_{27-28-29}$ regular sterane

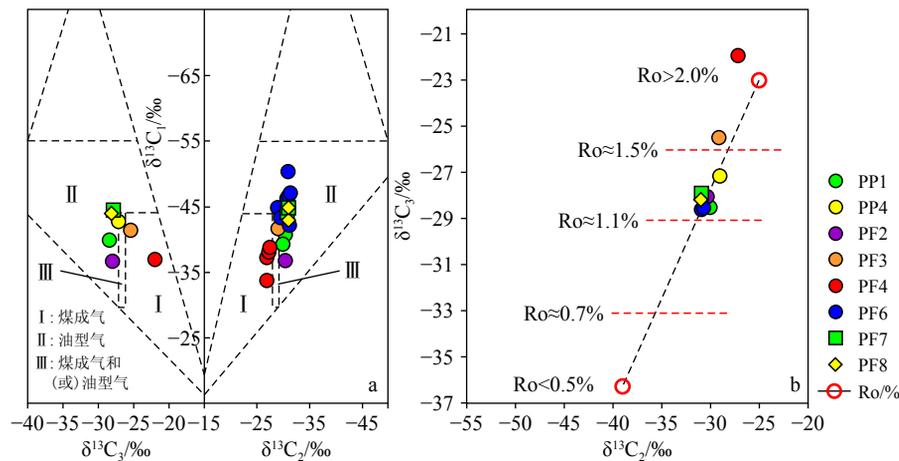


图7 巴布亚褶皱带中生界天然气成因 (a) 和成熟度 (b)

Fig.7 The origin and maturity of Mesozoic natural gas in the Papua Fold Belt

气的等效镜质体反射率, PF4天然气成熟度大于2.0%, PF3天然气成熟度大于1.5%, PP4天然气成熟度约为1.3%, 其余油气藏中天然气成熟度集中分布于1.1%~1.2%(图7b)。研究区成熟的油型气(1.1%~1.2%)和高成熟(1.3%~1.5%)的油型气-煤成气混合气的气源主要为Magobu组和Barikewa组烃源岩, PF4高成熟、煤成气的气源指向裂谷时期发育的Magobu组碳质泥岩。

3 油气充注过程

3.1 流体包裹体特征

巴布亚褶皱带下白垩统Toro组和Imuburu组为主要含油气层位, 烃类包裹体主要发育在石英颗粒内成岩裂纹和穿切石英颗粒成岩裂纹, 根据油气包裹体特征与发育产状(表1), 可将Toro组储层烃类包裹体主要分为两期, 早期包裹体主要沿石英颗粒内成岩裂纹呈带状分布, 发育黄色荧光油包裹体(图8a)、蓝绿色荧光油包裹体、蓝色荧光油包裹体(图8b)和纯气相包裹体(图8c); 晚期包裹体主要沿切穿石英颗粒裂纹、石英加大边的成岩晚期微裂隙呈带状分布, 沿切穿石英颗粒发育蓝绿色荧光油包裹体(图8d)、纯气相包裹体(图8e), 石英加大边的成岩晚期微裂隙检测到橙黄色荧光反射, 推测为油浸染(图8f)。

早期黄色荧光油包裹体伴生(含烃)盐水包裹体的均一温度分布范围为80~120℃, 蓝绿色和蓝色荧光油包裹体伴生(含烃)盐水包裹体的均一温度分布范围为120~160℃, 早期气包裹体伴生(含烃)盐水包裹体的均一温度分布范围为80~160℃;

晚期油包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体的均一温度分布范围为60~100℃, 由于晚期纯气相包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体较小, 无法准确测得均一温度(图8g)。

石英颗粒内成岩裂纹中与油相邻盐水包裹体的均一温度分布特征表现为温度区间大、埋深跨度大和持续时间长, 储层温度达到80℃时, 原油和天然气同时被包裹体所捕获, 与油/气相邻盐水包裹体的均一温度分布特征表明这一过程持续至储层温度达到140~160℃的温度区间, 反映了深埋过程中包裹体捕获到“油在前、气在后”的连续充注的油气。仅有1个与油相邻含烃盐水包裹体记录了当储层温度达到160~180℃的温度区间后的油充注, 说明储层所经历的最大古地温可能为160℃左右。沿切穿石英颗粒裂纹与油相邻(含烃)盐水包裹体均一温度的分布范围较为集中且温度较低, 反映了地层抬升过程中包裹体捕获到的原油。

3.2 油气充注史

与烃类包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体的均一温度代表其被捕获时古流体的最低温度。将与各幕次烃类包裹体共生的(含烃)盐水均一温度投影到标注古地温线的埋藏史图中, 即可获取该幕次油包裹体的充注年龄。巴布亚褶皱带中生界储层油气充注时间可分为105~85、78~53、47~32和4~0 Ma(图4)。105~85 Ma时, 侏罗系各套烃源岩自下而上依次进入生油早期, 被捕获油包裹体呈黄色荧光, 代表低成熟原油充注; 78~53 Ma时, 随埋藏深度增大, 中、下侏罗统烃源岩经历生油高峰到生湿气阶段, 上侏罗统烃源岩进入生油高峰, 被捕获的油包裹体呈蓝绿色—蓝色荧光, 高成熟原油充

表 1 巴布亚褶皱带中生界储层流体包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions in the Mesozoic reservoirs in the Papua Fold Belt

样品编号	井号	取样层位	深度/m	宿主矿物	显微观测结果	与油包裹体相邻(含烃)盐水包裹体平均一温度/°C	与气相包裹体相邻(含烃)盐水包裹体平均一温度/°C
PFB-1	PP1	Toro	1858	石英	穿石英颗粒成岩裂纹以及石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发弱荧光纯气相、富气相包裹体		25.9、52.7、83.1、96.4、119.0、135.1
PFB-2	PP1	Toro	1859	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到一期发黄色、一期发蓝色和一期发黄绿色荧光油包裹体以及大量发弱荧光纯气相包裹体	74.3、100.1、124.4	
PFB-3	PP1	Toro	1861.3	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到一期发黄色和一期发蓝色荧光油包裹体; 穿石英颗粒成岩裂纹中检测到大量发弱荧光纯气相包裹体	93.3	122.8、141.2
PFB-4	PP1	Toro	1862	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到一期发蓝色以及大量发弱荧光纯气相包裹体		77.0、87.8
PFB-5	PP2	Toro	3574	石英	穿石英颗粒成岩裂纹中以及石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发蓝绿色荧光油包裹体, 同时石英颗粒间孔隙中检测到大量发蓝色荧光油浸染	123.3、123.4、125.1	
PFB-6	PP3	Toro	3203	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到一期发蓝色、蓝绿色、一期发黄色和一期发黄绿色荧光油包裹体和大量纯气相包裹体	57.1、75.5、84.2、105.1、116.3、138.0、155.6	
PFB-7	PP3	Toro	3212.9	石英	石英颗粒间孔隙以及石英颗粒加大边中检测到发橙黄色荧光反射, 可能为油浸染; 同时石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量纯气相包裹体		92.3、120.0、127.5、139.3
PFB-8	PP3	Toro	3220.9	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到发蓝绿色荧光油包裹体, 同时粒间孔隙中检测到发黄绿色荧光油浸染	72.4、78.4	
PFB-9	PP3	Toro	3221	石英	石英颗粒间孔隙中检测到橙黄色荧光油浸染; 同时石英颗粒内成岩裂纹中检测到纯气相包裹体		
PFB-10	PP3	Toro	3221.5	石英	石英颗粒间孔隙中检测到发橙黄色荧光油浸染; 同时在穿石英颗粒成岩裂纹中和石英颗粒内成岩裂纹中检测到发蓝绿色荧光油包裹体	64.4、66.8、91.3、108.6、117.4、	
PFB-11	PP4	Imburu	2316.5	石英	石英颗粒内成岩裂纹中检测到大量发弱荧光纯气相包裹体		58.0、96.1、122.7

注; 47~32 Ma 时, 侏罗系烃源岩整体进入生气阶段, 但由于珊瑚海扩张导致构造抬升, 侏罗系地层温度逐渐降低, 烃源岩热演化过程停滞, 被捕获的烃类包裹体以纯气相包裹体为主, 代表构造运动导致油气发生大规模调整和深层天然气沿烃源断层垂向运移的过程; 4~0 Ma 时, 岛弧碰撞导致中生界叠置加厚, 下部侏罗系烃源岩进入大量生气阶段、白垩系烃源岩进入大量生油阶段, 可见纯气相包裹体、蓝绿色荧光油包裹体以及石英加大边和石英粒间孔隙橙黄色荧光油浸染等多种现象, 表明这一时期油气充注十分活跃。油气充注过程可分为早期的侏罗系油气连续充注(105~32 Ma)和晚期侏罗系—白垩系双源供烃的油气混注(4~0 Ma)。

4 油气成藏动态演化

4.1 油气成藏控制因素

巴布亚褶皱带中生界经历了海进—海退—海进沉积旋回, 发育侏罗系烃源岩、下白垩统储集层和

白垩系盖层的典型“三明治”式成藏组合, 其中 4 套烃源岩的发育为油气成藏奠定了基础; 上侏罗统前缘席状砂和下白垩统滨岸砂具有良好的横向连续性, 两套砂体平均孔隙度普遍高于 10%, 不仅形成了良好的储集层, 同时大部分情况下可以为油气侧向运移提供输导通道。在盆地形成演化过程中, 巴布亚褶皱带受珊瑚海扩张、塞皮克地块拼贴和美拉尼西亚岛弧碰撞三期构造运动的影响, 深浅断裂十分发育, 为油气大规模垂向运移提供了良好的输导条件。中生界广泛分布的泥页岩是夹在上下刚性 Darai 灰岩和基底中的塑性地层, 在挤压应力作用下易发育滑脱构造, 白垩系 Ieru 组泥岩地层厚度大, 在断-泥匹配良好的情况下对 Toro 组砂岩形成侧向封堵, 阻止油气的散逸。另一方面, 由于挤压推覆构造的广泛发育, 褶皱带中西段中新世以来地层大面积缺失, 中新统 Darai 灰岩之上缺少稳定封盖层无法形成有效的储盖组合, 因此该地区以中生代含油气系统为主。同时, 褶皱带北缘由于挤压应力强、抬升幅度大, 部分地区白垩系及以上地层剥蚀严重, 破坏了储盖组合, 导致油气散逸, 地表可见

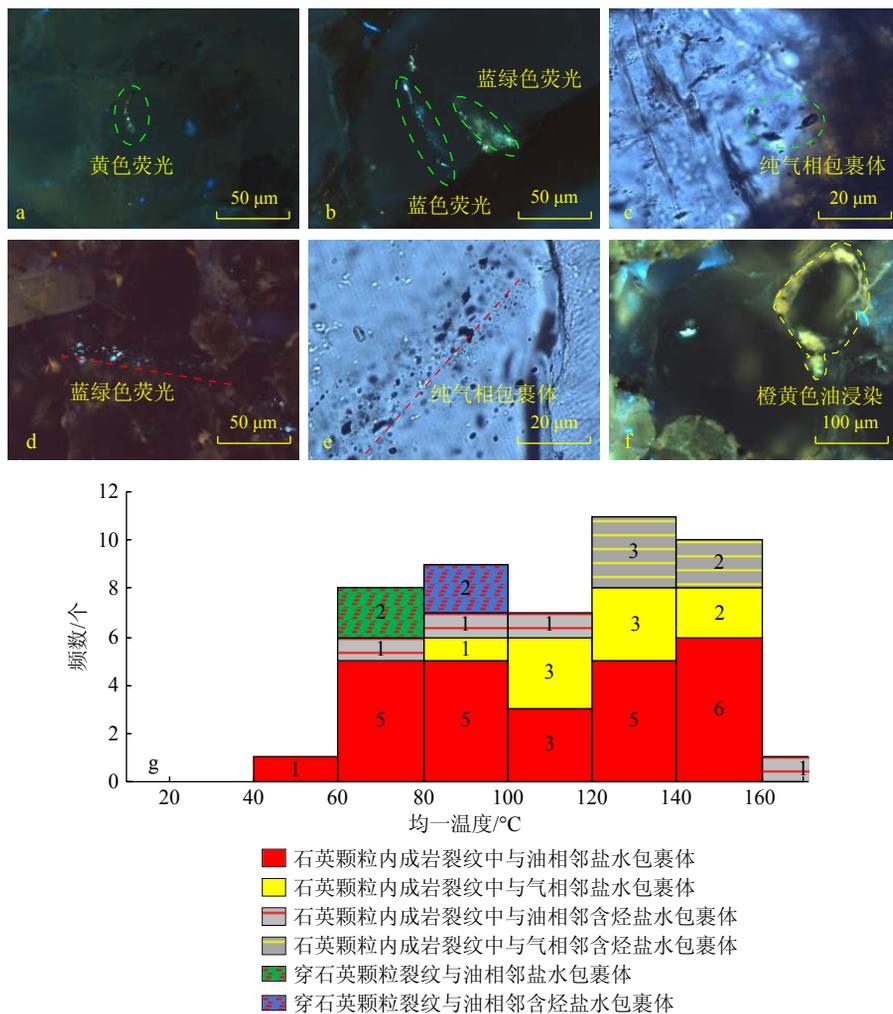


图8 储层包裹体显微照片 (a-f) 与烃类包裹体伴生 (含烃) 盐水包裹体均一温度分布图 (g)

Fig.8 Microscopic photos of reservoir inclusions (a-f) and homogeneous temperature distribution of hydrocarbon inclusions associated with saline inclusions (containing hydrocarbons) (g)

大量油苗。

在此背景下, 侏罗系烃源岩广覆式发育, 为中生界油气成藏提供了有效的烃源。白垩系泥岩稳定分布且沉积厚度大, 既可作为区域盖层, 亦为晚期油气补充的来源。中生界两套烃源岩成熟中心都分布于巴布亚褶皱带中、西段, 是控制油气藏形成的关键因素。在巴布亚褶皱带经历多期区域性沉降与抬升的过程中, 古近纪和新近纪地层分别在不同时期对中生界成藏组合的保存起到了保护作用。晚期周缘前陆-岛弧碰撞阶段, “侏罗系-白垩系烃源岩”双源供烃组合与强烈挤压推覆形成的数量多且规模大的构造圈闭形成“圈闭发育-油气运移”的良好时空匹配。巴布亚褶皱带中生界油气成藏控制因素包括烃源岩发育条件、大规模圈闭发育、高效垂向-侧向输导体系和保存条件, 而这些因素直接或间接地受多期构造运动的控制。

4.2 油气成藏演化模式

根据巴布亚褶皱带中生界油气成藏控制因素, 本文以构造演化为线索, 建立了“双源垂向侧向短距供烃-聚集调整过程动态平衡”油气成藏演化模式。

盆地裂谷期—被动大陆边缘阶段早期油气成藏: 这一时期, 巴布亚褶皱带形成了侏罗系烃源岩、上侏罗统与下白垩统砂岩储层和白垩系泥岩盖层的成藏组合。侏罗系烃源岩在持续热沉降作用下于早白垩世末期开始生烃, 中下侏罗统烃源岩生成的油气沿裂谷时期发育的正断层垂向运移, 油气运移中遇到断面与砂体形成良好匹配关系的储集层则发生侧向运移, 上侏罗统烃源岩垂向排烃至砂岩储层, 油气在低缓构造的高部位聚集成藏 (图 9a)。

珊瑚海扩张时期—周缘前陆盆地阶段早期油气调整: 侏罗系烃源岩于始新世整体进入生气阶段,

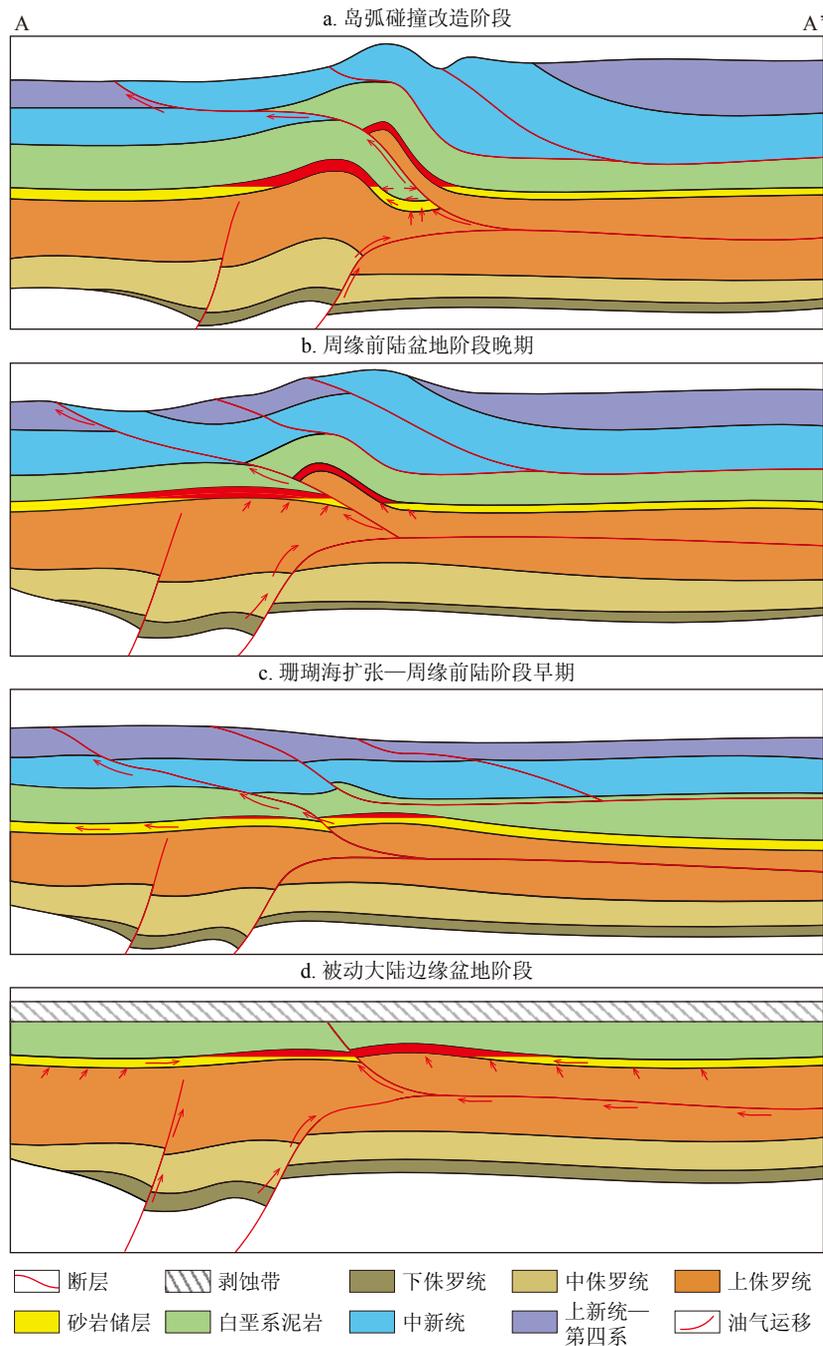


图 9 巴布亚褶皱带中生界油气成藏演化示意图

Fig.9 Schematic diagram of the Mesozoic oil and gas accumulation evolution in the Papua Fold Belt

珊瑚海扩张使断层活化, 天然气沿断层垂向运移或由垂向排烃进入砂岩储层, 但由于同期的区域性隆升剥蚀则导致构造高点迁移, 古油藏经历了充注-调整作用。至周缘前陆盆地早期, 受渐新世-中新世全球海平面上升的控制, 巴布亚褶皱带地区转入水下隆起阶段, 发育浅水碳酸盐岩沉积。此时, 侏罗纪地层温度不及古新世时期, 烃源岩热演化过程停滞, 古油藏没有获得烃源补充(图 9b)。

周缘前陆晚期—岛弧碰撞改造时期晚期油气成藏: 北部塞皮克地块拼贴引发由北向南的挤压推覆

作用强化了始新世时期留存下来的区域隆升构造形态, 发育在前渊和斜坡区的烃源岩层系被卷入褶皱冲断带之下, 地层叠置加厚使逆冲构造下部侏罗系烃源岩进入二次生烃阶段(图 9c)。

岛弧碰撞改造阶段油气充注补给: 随着西北部美拉尼西亚岛弧带与新几内亚地块发生持续强烈碰撞, 巴布亚褶皱带进入岛弧碰撞改造阶段, 晚期挤压作用强化早期挤压作用, 先存构造圈闭幅度增大并形成一系列新生的构造圈闭。同时, 滑脱构造发育使白垩系被卷入逆冲构造之下, Ieru 组烃源岩

再次进入热演化生烃。至此,中生代含油气系统具有“侏罗系—白垩系烃源岩”双源的供烃组合。先存油气发生调整,新生成油气形成补充,形成了“聚集调整过程动态平衡”的油气成藏过程(图9d)。

5 结论

(1)巴布亚褶皱带中生界原油包括腐泥型、腐殖型和腐泥-腐殖型,中段以成熟度较高腐泥型原油为主,主要来源于中侏罗统 Barikewa 组烃源岩,为早期充注的油气;中、西段低成熟度腐殖型和腐泥-腐殖型原油,来源于上侏罗统 Imburu 组烃源岩和白垩系 Ieru 组烃源岩。天然气包括煤成气、油型气和煤成气-油型气混合气,分别来源于下侏罗统 Magobu 组烃源岩、中—上侏罗统烃源岩及两者混合。

(2)巴布亚褶皱带中生界油气充注可划分为“2期4幕”,早期包裹体主要沿石英颗粒内的微裂隙呈带状分布,呈现“低熟油-高熟油-天然气”连续充注过程,对应充注时间分别为 105~85、78~53 和 47~32 Ma;晚期包裹体主要沿切穿石英颗粒和加大边的成岩晚期微裂隙呈带状分布,呈现“高熟油-天然气”混合充注并有低熟油补充的特征,充注时间为 4~0 Ma。早期充注的油气来源于侏罗系烃源岩,晚期充注的油气来源于侏罗系—白垩系烃源岩。

(3)巴布亚褶皱带中生界油气成藏受多期构造运动影响的烃源岩类型及演化程度、大规模圈闭发育、高效垂向-侧向输导体系和保存条件的控制。通过以构造演化为线索建立的“双源垂向侧向短距供烃-聚集调整过程动态平衡”油气成藏动态演化模式,提出了位于挤压推覆构造带下盘的白垩系烃源岩对中生代含油气系统同样具有烃源贡献的认识。

参考文献 (References)

- [1] Hill K C. Structural styles and hydrocarbons in the Papuan Fold Belt, a review[C]. Proceedings of the First Png Petroleum Convention, 1990.
- [2] Hill K C, Lucas K, Bradey K. Structural styles in the Papuan Fold Belt, Papua New Guinea: constraints from analogue modelling[J]. 2010, 348(1): 33-56.
- [3] Hill K C. Structure of the Papuan Fold Belt, Papua New Guinea (1)[J]. Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 1991, 75(5): 857-872.
- [4] 骆宗强, 阳怀忠, 刘铁树, 等. 巴布亚盆地构造差异演化及其对油气成藏的控制 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(S1): 143-150. [LUO Zongqiang, YANG Huaizhong, LIU Tieshu, et al. Distinct tectonic evolutions and its effect on hydrocarbon accumulation of the Papuan basin[J]. Earth Science, 2012, 37: 143-150.]
- [5] 卢景美, 闵才政, 于圣杰, 等. 巴布亚盆地构造研究新认识及勘探意义 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(3): 20-27. [LU Jingmei, MIN Caizheng, YU Shengjie, et al. New understanding and exploration significance of Papuan Basin structural research[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(3): 20-27.]
- [6] 陈景阳, 张洋, 王涛, 等. 巴布亚褶皱带油气藏类型与成藏模式 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 55-59, 153. [CHEN Jingyang, ZHANG Yang, WANG Tao, et al. Reservoir types and accumulation modes in Papuan folded belt[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 55-59, 153.]
- [7] 张洋. 巴布亚盆地巴布亚复杂褶皱带构造综合解释技术及应用 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 29-34. [ZHANG Yang. Structural Comprehensive Interpretation Technology and Application in Papuan Complex Fold Belt of Papuan Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(1): 29-34.]
- [8] 张义娜, 蔡文杰, 杨松岭, 等. 巴布亚盆地侏罗系陆架边缘三角洲沉积特征及其油气勘探方向 [J]. 地质学前沿, 2021, 28(1): 167-176. [ZHANG Yina, CAI Wenjie, YANG Songling, et al. Sedimentary characteristics of the Jurassic shelf-edge delta and oil and gas exploration in the Papuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 167-176.]
- [9] 王涛, 陈景阳, 张洋, 等. 巴布亚盆地褶皱带构造特征 [J]. 地质学报, 2016, 40(1): 31-36. [WANG Tao, CHEN Jingyang, ZHANG Yang, et al. Structural characteristics of the fold belts in the Papuan Basin[J]. Journal of Geology, 2016, 40(1): 31-36.]
- [10] 刘湘, 郭建华, 刘辰生, 等. 巴布亚盆地东部中侏罗统—下白垩统烃源岩评价及勘探建议 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(3): 607-618. [LIU Xiang, GUO Jianhua, LIU Chensheng, et al. Evaluation and exploration suggestion of source rocks from Middle Jurassic to Lower Cretaceous in eastern Papuan Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 607-618.]
- [11] 尹新义, 胡孝林, 方勇, 等. 印尼-巴新中-古生代盆地群油气地质特征及差异性 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(6): 224-231. [YIN Xinyi, HU Xiaolin, FANG Yong, et al. Hydrocarbon Features of Mesozoic-Paleozoic Basins in Indonesia and Papua New Guinea[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(6): 224-231.]
- [12] 刘湘, 郭建华, 张琳婷, 等. 巴布亚盆地晚古生代—新生代构造演化与油气成藏条件 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(1): 131-140. [LIU Xiang, GUO Jianhua, ZHANG Linying, et al. Late Paleozoic—Cenozoic tectonic evolutions and hydrocarbon accumulation conditions of Papuan basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 131-140.]
- [13] 刘湘, 郭建华. 巴布亚盆地构造演化研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2014, 11(26): 12-15. [LIU Xiang, GUO Jianhua. A study on the tectonic evolution of the Papua Basin[J]. Journal of Yangtze University (Science and Technology), 2014, 11(26): 12-15.]
- [14] 黎彩凤, 旷理雄, 郭建华, 等. 巴布亚盆地中上侏罗统烃源岩油气地球化学特征研究 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2016, 13(7): 13-16, 3. [LI Caifeng, KUANG Lixiong, GUO Jianhua, et al. Geochemical characteristics and evaluation of middle-upper Jurassic hydrocarbon

- source rock in Papuan Basin[J]. *Journal of Yangtze University (Science and Technology)*, 2016, 13(7): 13-16,3.]
- [15] Noku S K, Nasinom S, Guru E, et al. Structural Traps and Hydrocarbon Resources of the Papuan Basin: An Overview[C]//1st AAPG/EAGE PNG Geoscience Conference & Exhibition, PNGs Oil and Gas Industry Maturing Through Exploration, Development and Production. 2020.
- [16] Noku S K. An Overview of Geochemical Exploration of Hydrocarbons in Papuan Basin, Papua New Guinea[C]//1st AAPG/EAGE PNG Geoscience Conference & Exhibition, PNGs Oil and Gas Industry Maturing Through Exploration, Development and Production. 2020.
- [17] Jablonski D, Pono S, Larsen O A. Prospectivity of the deepwater Gulf of Papua and surrounds in Papua New Guinea (PNG) -a new look at a frontier region[J]. *Appea Journal*, 2006, 46(Pt1): 1-22.
- [18] Norvick M S, Smith M A, Power M R. The plate tectonic evolution of eastern Australasia guided by the stratigraphy of the Gippsland Basin[C]// In: Hill K C & Bernecker T (eds), Eastern Australasian Basins Symposium: A refocused energy perspective for the future. Petroleum Exploration Society of Australia Special Publication, 2001: 15-24.
- [19] 信石印. 巴布亚盆地主力烃源岩特征及有效性分析 [J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6): 843-848. [XIN Shiyin. Characteristics of main source rocks and their effectiveness in Papuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(6): 843-848.]
- [20] 林小云, 余喆, 吴锐, 等. 巴布亚盆地烃源岩分布及生烃潜力评价 [J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(3): 22-28. [LIN Xiaoyun, YU Zhe, WU Rui, et al. Hydrocarbon source rock distribution and hydrocarbon potential evaluation in Papua basin[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(3): 22-28.]
- [21] Mahoney L, McLaren S, Hill K, et al. Late Cretaceous to Oligocene burial and collision in western Papua New Guinea: Indications from low-temperature thermochronology and thermal modelling[J]. *Tectonophysics*, 2018, 752: 81-112.
- [22] Edwards D, Zumberge J E. The Oils of Western Australia II[M]. Geoscience Australia, Canberra, 2005.
- [23] 胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用 [J]. *石油实验地质*, 1990, 12(4): 375-394, 450. [HU Xilin, GE Baoxiong, ZHANG Yigang, et al. The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1990, 12(4): 375-394.]
- [24] 陈建平, 王绪龙, 陈践发, 等. 甲烷碳同位素判识天然气及其源岩成熟度新公式 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(4): 560-581. [CHEN Jianping, WANG Xulong, CHEN Jianfa, et al. New equation to decipher the relationship between carbon isotopic composition of methane and maturity of gas source rocks[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(3): 470-493.]
- [25] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 657-672.
- [26] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(2): 303-316.
- [27] 王培荣, 徐冠军, 张大江, 等. 常用轻烃参数正、异庚烷值应用中的问题 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 1(1): 121-128. [WANG Peirong, XU Guanjun, ZHANG Dajiang, et al. Problems with application of heptane and isoheptane values as light hydrocarbon parameters[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 1(1): 121-128.]
- [28] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007.
- [29] George S C, Kreiger K F, Eadington P J, et al. Geochemical comparison of oil-bearing fluid inclusions trapped in quartz grain and live oil from the Toro sandstone, Papua New Guinea[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 26: 155-173.
- [30] Volk H, George S C, Middleton H, et al. Geochemical comparison of fluid inclusion and present-day oil accumulations in the Papuan Foreland - evidence for previously unrecognised petroleum source rocks[J]. *Organic Geochemistry*, 2005(1): 36.
- [31] Nytoft H P, Jørgen A B, Christiansen F G, et al. Oleanane or lupane? Reappraisal of the presence of oleanane in Cretaceous-Tertiary oils and sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(11): 1225-1240.
- [32] Ekweozor C M, Udo O T. The oleananes: Origin, maturation and limits of occurrence in Southern Nigeria sedimentary basins[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13: 131-140.
- [33] Moldowan J M, Dahl J, Huizinga B J, et al. The molecular fossil record of oleanane and its relation to angiosperms[J]. *Science*, 1994, 265(5173): 768-771.
- [34] Wood S, Volk H, Sherwood N, et al. Lacustrine Petroleum Systems in the Papua New Guinea Foreland[C]//Eastern Australasian Basins Symposium III-Energy Security for the 21st Century, PESA, Sydney (2008).
- [35] Ahmed M, Volk H, Allan T, et al. Origin of oils in the Eastern Papuan Basin, Papua New Guinea[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 53: 137-152.
- [36] Xu M, Hou D J, Lin X Y, et al. Organic geochemical signatures of source rocks and oil-source correlation in the Papuan Basin, Papua New Guinea[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 109972.
- [37] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. *天然气地球科学*, 1993(Z1): 1-40. [DAI Jinxing. Carbon and hydrogen isotope characteristics and its application to natural gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1993, 3(2-3): 1-41.]
- [38] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别 [J]. *中国科学 (B辑)*, 1992(2): 185-193. [DAI Jinxing. Identification and distinction of various alkane gases[J]. *Science in China(Series B)*, 1992(2): 185-193.]
- [39] Hood A, Gutjahr C C M, Heacock R L. Organic metamorphism and the generation Of Petroleum[J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(6): 986-996.