

孙自明. 下刚果-刚果扇盆地东南部基底断裂复活及其与油气的关系[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 42-48.

下刚果-刚果扇盆地东南部基底断裂复活及其与油气的关系

孙自明

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要: 下刚果-刚果扇盆地位于西非被动大陆边缘, 是典型的裂谷与被动陆缘叠合盆地。该区以往的研究多集中于盐上层系, 对基底断裂研究较少。以构造分析为基础, 探讨了基底断裂复活及其对盐上层系构造变形和油气分布的影响。结果表明, 研究区盐下裂谷层系具有“两拗夹一隆”的构造格局, 大西洋枢纽带夹持于内裂谷带和外裂谷带之间; 基底断裂复活主要发生在紧邻大西洋枢纽带西侧、呈狭长带状分布的基底断裂复活带, 断裂复活形式主要表现为继承性, 其次为构造反转; 基底断裂复活不仅对盐上层系的构造变形具控制作用, 而且为油气从盐下层系向盐上层系运移提供了良好的垂向通道条件, 是外裂谷带盐下油气向盐上层系运移的关键部位。

关键词: 基底断裂复活; 构造继承性; 构造反转; 油气分布; 下刚果-刚果扇盆地

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.023

0 引言

下刚果-刚果扇盆地位于西非被动大陆边缘, 经历了裂谷、过渡和被动大陆边缘等演化阶段^[1-7], 是典型的裂谷与被动大陆边缘叠合含盐盆地^[1]。以过渡期演化阶段沉积的厚-巨厚层蒸发盐岩为滑脱层, 纵向上可划分为盐下裂谷和盐上重力滑动 2 个构造变形层^[1-3, 5], 前者为基底卷入型构造, 构造样式以地堑和地垒为主要特点; 后者属于盖层滑脱型构造, 变形强烈, 盐构造发育。研究区位于下刚果-刚果扇盆地东南部(图 1), 以往的研究多集中于盐上重力滑动构造变形层, 对盐下裂谷构造变形层的研究相对较少, 对基底断裂及其对盐上构造变形层的控制作用研究更少, 制约了对该区油气成藏和分布规律的认识。本文以构造解析为基础, 探讨了基底断裂复活及其对盐上层系构造变形和油气分布的控制, 对深入了解该区油

气分布和富集规律具有重要启示, 对勘探决策部署具有指导意义。

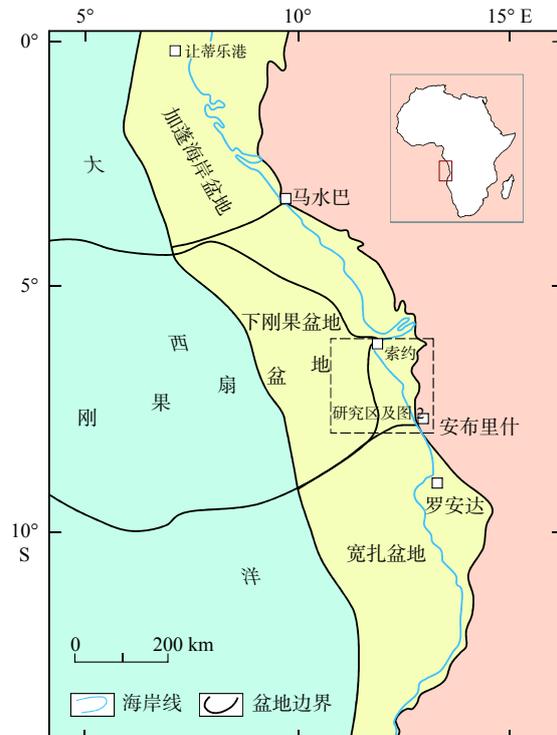


图 1 下刚果-刚果扇盆地及研究区位置示意图

Fig.1 Location of Lower Congo-Congo Fan Basin and study area

收稿日期: 2021-02-02

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“特提斯域内大陆单向裂解-聚合过程中的油气大规模聚集效应”(91755211)

作者简介: 孙自明(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质勘探方面的研究工作. E-mail: sunzm.syky@sinopec.com

1 基底构造分区与基底断裂复活带

1.1 大西洋枢纽带与基底构造分区

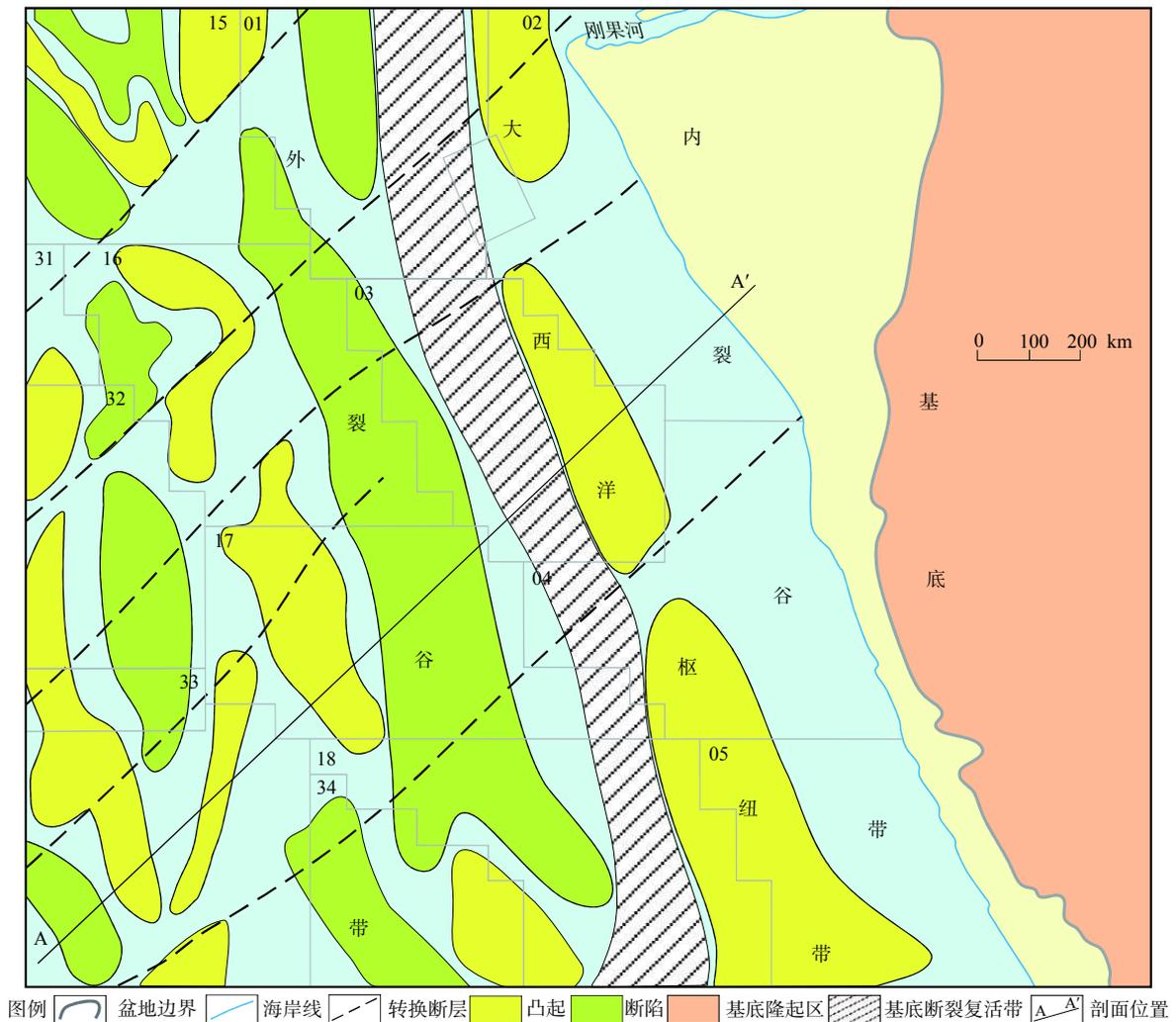
总体来看, 研究区盐下裂谷层系具有“两坳夹一隆”的构造格局, 自东向西分别为内裂谷带、大西洋枢纽带 (Atlantic hinge zone) 和外裂谷带 (图 2、3)。

内裂谷带主要发育于大西洋枢纽带东侧的深水及陆上地区, 走向为 NNW-SSE 向, 正断层大量发育, 构造样式以规模较小的地堑-地垒或半地堑为主。裂谷早期的沉积层序较完整; 裂谷晚期沉积地层因在巴列姆期晚期受到侵蚀而部分缺失, 地层厚度较小。目前盐下地层的埋藏深度一般 < 3 000 m。

大西洋枢纽带的概念最初由 BRINK 提出^[8],

指西非被动大陆边缘盐岩层底面明显的挠曲, 现在主要是指发育于西非加蓬至安哥拉海岸、形成于同裂谷期、平面上沿 NNW-SSE 方向呈链状分布的基底地垒系统^[5,7,9-10], 也有人称其为中央隆起带^[11], 它与现今西非被动大陆边缘近于平行, 构成内裂谷带和外裂谷带的构造分界。由于受一系列 NE-SW 向转换断层的切割, 大西洋枢纽带被切割为多个规模不等的构造段落。

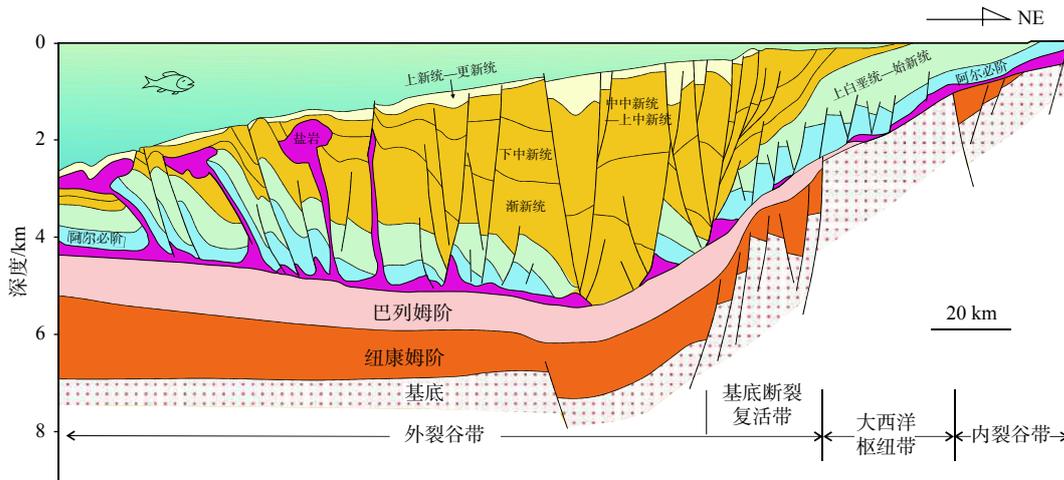
外裂谷带主体位于大西洋枢纽带西侧的深水至超深水地区, 沿 NNW-SSE 方向发育同裂谷期大型地堑或半地堑, 平面上与地垒等基底凸起相间分布, 走向与现今构造线展布方向基本一致。受 NE-SW 向转换断层的切割, 外裂谷带也呈现出明显的南、北分段现象, 各构造段落之内又呈现出凹、凸相间的构造格局。沉积地层层序较为完整, 最大厚度约



区域位置见图 1

图 2 下刚果-刚果扇盆地东南部盐下裂谷构造变形层构造格局与基底断裂复活带

Fig.2 Map showing the structural divisions of presalt tectonic deformation layer and the location of basement fault reactivation zone in southeast Lower Congo Basin



剖面位置见图 2AA; 据 C&C 数据库(2008)修改

图 3 下刚果-刚果扇盆地东南部构造剖面

Fig.3 Geological section in southeast Lower Congo Basin

2500 m。

1.2 基底断裂复活带

外裂谷带是同裂谷期的主要沉积和沉降中心，断陷性质明显，紧邻大西洋枢纽带的部分发育一个复杂的基底构造变形带，这里同裂谷期断裂密集发育，构造样式以堑-垒组合和断阶组合为主；在后期构造演化中，由于不同时期构造应力场的变化或叠加，相对于盐下层系其他构造部位，这里又是一个构造薄弱带，是基底断裂复活现象最为集中发育的部位，常见断裂的继承性活动和构造反转等现象，且平面分布稳定，走向与大西洋枢纽带一致，故称之为基底断裂复活带(图 3)。

2 基底断裂复活特征

2.1 复活方式

2.1.1 继承性

盐下同裂谷期较大规模基底断裂的长期幕式活动是断裂继承性活动的具体表现，沿基底断裂复活带广泛发育，主要特征表现在：①规模较大的同裂谷期张性断裂在拗陷期继续发生张性断裂活动，但活动强度大为减弱，对拗陷期沉积具有一定的控制作用；②基底断裂在被动大陆边缘演化阶段(阿尔必期到中新世)再次复活，发生拉张正断层活动，结果是在盐岩层底面形成陡坡或断阶构造，控制或影响盐上层系的构造变形。

2.1.2 构造反转

构造反转与后期应力场变化有关，是一种常见的构造现象，主要有正反转和负反转 2 种类型。正反转构造是指同一地质体在不同地质历史时期，由于区域构造应力场的变化，造成先存伸展构造叠加挤压构造的一种复合构造，先存正断层挤压反转是伸展盆地常见的构造现象。该区盐下裂谷构造变形层以发育正断层为主，受巴列姆晚期裂谷盆地封闭、区域构造应力场由拉张转变为挤压的影响，基底断裂复活带内的一些正断层以及外裂谷带内的某些正断层发生反转(图 4)，形成正反转构造，但反转强度一般较弱，在地震剖面上多表现为上逆、下正的反转构造特征。

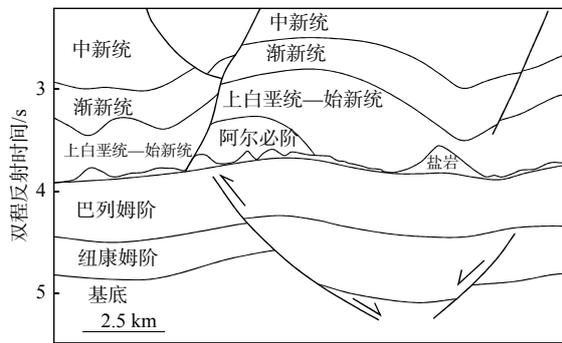


图 4 下刚果-刚果扇盆地东南部地震地质解释剖面

Fig.4 Geological section showing the inverted structure in southeast Lower Congo-Congo Fan Basin

2.2 复活时期

研究区基底断裂复活时期与西非被动大陆边缘构造演化的地球动力学背景一致，显示出明显的

多期性和幕式活动特点。根据断裂涉及地层层位及其对沉积的控制, 归纳起来, 主要有 3 期。

(1) 早白垩世纽康姆期是盐下裂谷发育的主要时期, 区内断陷活动强烈, 伸展断裂大量发育并控制裂谷盆地断陷结构; 至巴列姆期, 裂谷盆地进入坳陷发展阶段, 断陷期形成的大多数断裂趋于停止活动, 而基底断裂复活带内规模较大的断裂则在坳陷期持续发生伸展活动, 表现出断裂继承性复活特点, 但活动强度大为减弱。

(2) 早白垩世巴列姆期沉积晚期至阿普第期晚期, 裂谷盆地封闭, 区域构造应力场由拉张转变为挤压, 断裂复活形式主要表现为构造反转, 表现为同裂谷期伸展断裂因挤压力作用而反转, 形成正反转构造(图 4)。

(3) 晚白垩世阿尔必期至现今, 与被动大陆边缘演化阶段区域构造应力场有关, 持续的拉张构造变形, 造成基底断裂复活带断裂的再次复活, 复活形式仍然以继承性拉张正断活动为主要特点, 有些基底断裂可断穿巴列姆期地层并向上延伸至盐岩层(图 5a), 导致基底断裂复活带之上盐岩层底面陡坡或断阶构造的发育, 而少数断裂向上可切穿盐岩层(图 5c)。

3 对盐上层系构造变形的控制

自过渡阶段阿普第阶蒸发盐岩沉积之后, 在西非被动大陆边缘持续沉降和非洲大陆快速隆升所形成的区域基底顶面向西倾斜的背景下, 盐上重力滑动构造变形层即开始了盐相关构造变形的形成和演化。其中, 基底断裂复活或继承性活动对盐上层系构造变形的控制以下述方式较为常见。

3.1 控制盐上层系地堑或半地堑构造的发育位置

在大西洋被动大陆边缘阶段持续沉降的背景下, 研究区基底顶面整体向西倾斜, 盐上层系沿阿普第阶盐岩滑脱层向西滑动, 形成重力驱动型薄皮盖层构造变形; 在此期间, 基底断裂幕式活动, 造成在基底断裂复活带顶面即盐岩滑脱层底面形成陡坡或断阶构造, 使基底岩层加速向西倾斜。对于盐上层系而言, 相当于在滑脱层底部引入了一个构造斜坡, 在盐上层系区域性向西滑动背景下, 基底陡坡或断阶在一定程度上又促使盐上层系重力滑动加速, 形成盐筏、地堑/半地堑和盐焊接等构造(图 5a、

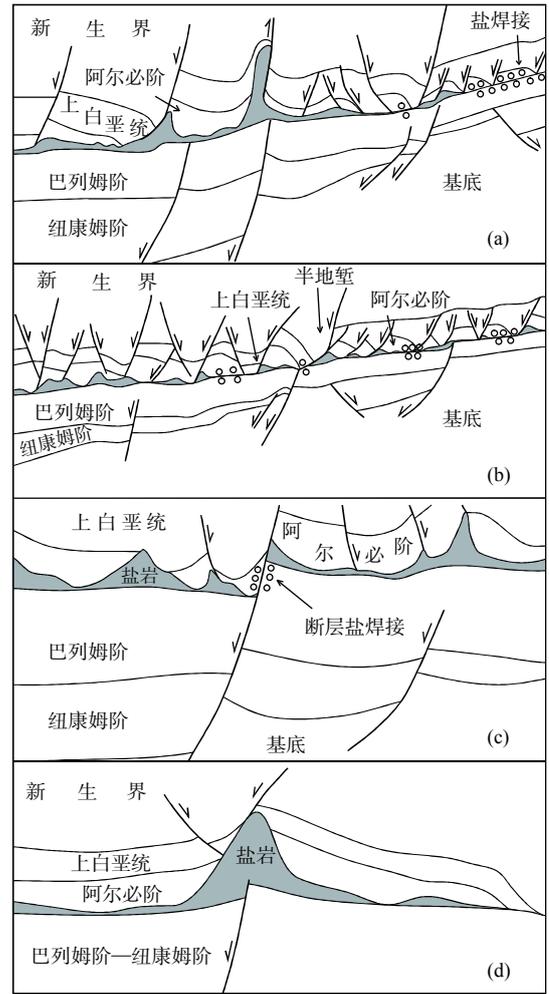


图 5 下刚果-刚果扇盆地东南部基底断裂复活及相关构造变形

Fig.5 Basement fault reactivation and related structural deformation in southeast Lower Congo-Congo Fan basin

b)。最为明显的特征是, 盐上地堑多发育于基底断裂复活带上方或稍偏西的位置, 其西侧以发育大型盐筏构造或旋转断块为主, 其东以发育微型盐筏构造或微型旋转断块为主^[12-14], 显示出基底断裂复活带对盐上层系地堑/半地堑、微型盐筏区和盐筏区的发育位置具有一定的控制作用。

3.2 形成“厚皮式”盖层构造

研究区盐下裂谷构造变形层和盐上重力滑动构造变形层基本为独立或半独立的构造系统, 重力滑动构造变形层以过渡期盐岩滑脱层为底板, 属于典型的“薄皮”构造。由于基底断裂幕式复活并向上生长, 可以使盐上重力滑动构造变形层的断裂通过盐岩滑脱层与基底断裂产生联系, 形成“厚皮式”盖层构造。如图 5b 中部所示, 盐上重力滑动构造

变形层的伸展断裂向下进入盐岩层并且断面变缓,通过盐岩层直接与复活并向上生长的基底断裂连接,剖面上构成“厚皮”构造样式。在此情况下,如果盐岩层厚度较小,则极易形成盐窗或盐焊接构造。平面上,这种构造样式主要发育于基底断裂复活带之上微型盐筏区和盐筏区之间的地堑或半地堑等地区。

3.3 形成断层盐焊接

基底断裂复活并向上直接错断盐岩层和盐上沉积盖层,形成断层焊接(图 5c),这类断裂活动主要发生在晚白垩世阿尔必期至现今时期。剖面上,这类基底断裂直接将盐下烃源岩与盐上储层沟通,复活的基底断裂可以成为油气垂向运移的重要通道,有利于盐下烃源岩生成的油气在盐上层系聚集成藏。

3.4 诱发盐刺穿构造的发育

地震资料揭示,研究区盐刺穿构造的剖面形态往往不对称,而且根植于复活的基底断裂的顶端或位于正断层下盘旋转断块之上(图 5d),此类盐刺穿构造的形成,可能是由于基底断裂复活激发上覆盐岩层加厚并向上流动所致。

4 与油气运移的关系

下刚果-刚果扇盆地发育盐下和盐上 2 套主要烃源岩层系,盐下烃源岩为同裂谷期 Bucomazi 组陆相深湖相泥页岩,主要分布于早白垩世地堑或半地堑沉积中心,其成熟门限深度在 2 000~3 000 m。目前在外裂谷带主体已进入高成熟生气演化阶段;在内裂谷带的中北部地区,这套烃源岩埋藏较深,已成熟生烃,但在内裂谷带的南部地区,这套地层埋藏较浅,烃源岩热演化程度达到低熟或尚未成熟。盐上烃源岩为一套海相半深水-深水页岩沉积,主要形成于晚白垩世—始新世,生油门限深度为 3 500~4 000 m。目前在外裂谷带地区已进入生油高峰阶段,研究区北部的部分地区则处于高成熟生气阶段;而在内裂谷带,由于其埋藏较浅,这套烃源岩尚不成熟。

由于外裂谷带盐岩层厚度普遍较大且连续分布,加之缺少有效沟通盐下烃源的运移通道,盐下油气难以向盐上层系运移,致使目前在盐上层系

(主要为新生界)发现的油气藏,油气主要来自盐上海相烃源岩。而在大西洋枢纽带及内裂谷带地区发现的油气藏,油气主要来自盐下 Bucomazi 组湖相烃源岩。

如 4 区块,该区块横跨内裂谷带、外裂谷带和大西洋枢纽带(图 6),盐下 Bucomazi 组烃源岩在内裂谷带局部成熟并达到了向盐上层系充注低—中等成熟油的能力,但钻井测试却在盐上层系的 Pinda 群和 Iabe 组获得了气和凝析气,油源对比表明主要来自盐下 Bucomazi 组湖相烃源岩,但其成熟度与内裂谷带盐下 Bucomazi 组烃源岩的成熟度差别较大,而与外裂谷带盐下 Bucomazi 组烃源岩的成熟—过成熟油气一致,说明外裂谷带的盐下油气可能向内裂谷带地区的盐上储层进行了充注。导致这种外裂谷带的盐下油气能够在内裂谷带的盐上层系聚集的主要原因是,存在盐下油气向上“穿越”盐岩盖层的垂向运移通道,而基底断裂复活带大量发育的断裂和/或盐窗等构造为这种形式的油气垂向运移提供了良好的通道条件,是外裂谷带盐下油气向内裂谷带盐上层系运移的关键部位,并对研究区的油气运移和分布具有一定的控制作用。

5 结论

(1)下刚果-刚果扇盆地位于西非被动大陆边缘,是典型的裂谷与被动大陆边缘叠合含盐盆地。大西洋枢纽带主要是指发育于西非加蓬至安哥拉海岸、形成于同裂谷期、平面上沿 NNW—SSE 方向呈链状分布的基底地垒系统,它与现今西非被动大陆边缘近于平行,夹持于内裂谷带和外裂谷带之间。紧邻大西洋枢纽带西侧即外裂谷带东部,发育一条呈狭长带状分布的基底断裂复活带。

(2)基底断裂复活带内断裂复活特征明显,复活方式主要表现为继承性活动特征,其次为构造反转作用;复活时期主要为巴列姆期、巴列姆晚期—阿普第晚期和阿尔必期至今。基底断裂复活对盐上层系的构造变形具有重要的控制作用,表现在控制盐上层系地堑或半地堑构造的发育位置、形成“厚皮”盖层构造、形成断层盐焊接和诱发盐刺穿构造的发育等。

(3)基底断裂复活带为外裂谷带的盐下油气向盐上层系运移提供了良好的垂向通道条件,是外裂谷带盐下油气向大西洋枢纽带和内裂谷带盐上层

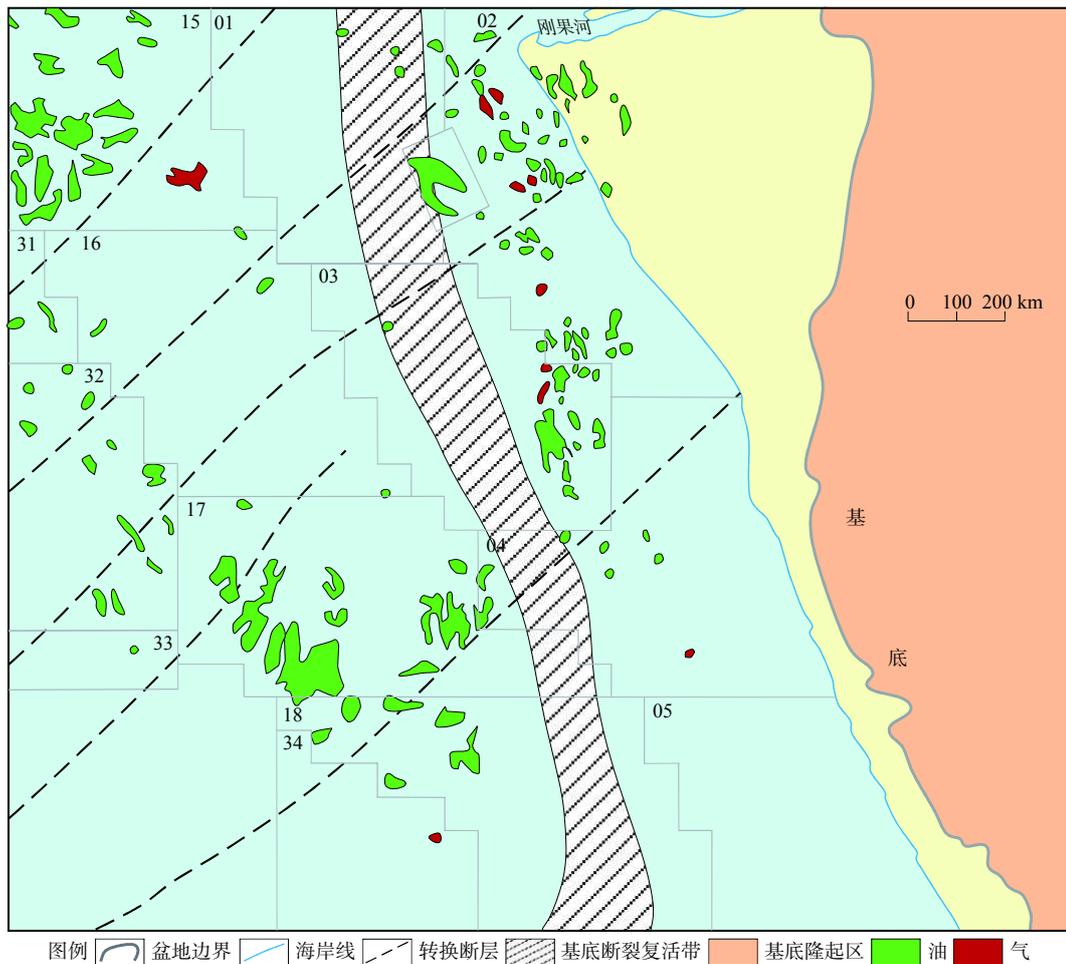


图 6 下刚果-刚果扇盆地东南部基底断裂复活带与油气分布

Fig.6 Basement fault reactivation belt and hydrocarbon distribution in the southeastern Lower Congo-Congo Fan Basin

系运移的关键部位, 对研究区油气运移和分布具有一定的控制作用。

参考文献:

- [1] 孙自明, 何治亮. 裂谷与被动陆缘叠合盆地的盐构造与油气成藏: 以西非下刚果-刚果扇盆地和宽扎盆地为例[J]. *石油实验地质*, 2016, 28(3): 287-292.
- [2] 孙自明. 下刚果-刚果扇盆地沉积-构造演化与油气勘探领域[J]. *现代地质*, 2016, 30(6): 1303-1310.
- [3] 冯杨伟, 屈红军, 张功成, 等. 西非被动大陆边缘构造-沉积演化及其对生储盖的控制作用[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 45-51.
- [4] 熊利平, 王骏, 殷进根, 等. 西非构造演化及其对油气成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 641-643, 646.
- [5] VALLE P J, GJELBERG J G, HELAND-HANSEN W. Tectonostratigraphic development in the eastern Lower Congo Basin, offshore Angola, West Africa[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(8): 909-927.
- [6] MARTON L G, TARI G C, LEHMANN C T. Evolution of the Angolan Passive Margin Basin, West Africa, with emphasis on post-salt structural styles[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 2013.
- [7] KARNER G D, DRISCOLL N W. Tectonic and stratigraphic development of the west African and eastern Brazilian margins: insights from quantitative basin modeling[M]//CAMERON N R, BATE R H, CLURE V S. The oil and gas habitats of the south Atlantic. London: Geological Society Special Publication 153, 1999: 11-40.
- [8] BRINK A H. Petroleum geology of Gabon Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(2): 216-235.
- [9] HUDEC M R, JACKSON M P A. Regional restoration across the Kwanza Basin, Angola: salt tectonics triggered by repeated uplift of a metastable passive margin[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(7): 971-990.
- [10] KARNER G D, DRISCOLL N W, MCGINNIS J P, et al. Tectonic significance of syn-rift sediment packages across the Gabon-Cabinda continental margin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7/8): 973-1000.
- [11] 李斐, 张彪. 西非盐下裂谷构造特征及其地质意义[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 49-55.
- [12] DUVAL B, CRAMEZ C, JACKSON M P A. Raft tectonics in

- the Kwanza Basin, Angola[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9(4): 389-404.
- [13] FORT X, BRUN J P, CHAUVEL F. Salt tectonics on the Angolan margin, synsedimentary deformation processes[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(11): 1523-1544.
- [14] SPATHOPOULOS F. An insight on salt tectonics in the Angola Basin, South Atlantic[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1996, 100(1): 153-174.

REACTIVATION OF BASEMENT FAULTS AND ITS IMPACT ON HYDRO-CARBON ACCUMULATION IN LOWER CONGO-CONGO FAN BASIN

SUN Ziming

(Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: The Lower Congo-Congo Fan Basin, located on the passive continental margin of west Africa, has experienced three evolutionary stages, including a rifting stage (Early Cretaceous Valanginian to Barremian), a transitional stage (Aptian to Early Albian) and a passive continental marginal stage (Early Cretaceous Albian to present), as a typically superimposed salt basin consisting of a lower rifted sequence and an upper continental marginal sequence. Previous studies, however, focused mainly on the post-salt sequence, and basement faults are ignored, that has badly influenced our understanding on the hydrocarbon migration and distribution in the study area. This time, structural analysis is carried out and the reactivation of basement faults and its effects on structural deformation and hydrocarbon accumulation in the post-salt sequences are discussed. It reveals that the structural framework of the pre-salt rift sequence in the study area is composed of two depressions, the inner and the outer rift zones, and an uplift called the Atlantic hinge zone sandwiched between the inner and outer rift zones. Reactivation of basement fault is mainly inherited and followed by structural inversion. The activation is strong on the west side of the Atlantic hinge zone, where formed a narrowly distributed reactivity belt by basement faults. The basement fault reactivity exerted a strong influence on the structural deformation of the post-salt strata, including the controls over the location of post-salt graben and half-graben, the occurrence of the "thick-skinned" detachment structures directly linked to the basement fault, the formation of the fault salt welding, which promoted the development of salt diapirs. The reactivity belt of the basement faults may provide vertical pathways for hydrocarbon migration from the pre-salt to the post-salt sequences in the outer rift zone.

Key words: basement fault reactivation; structural inheritance; structural inversion; hydrocarbon distribution; Lower Congo-Congo Fan Basin