

委内瑞拉马拉开波盆地的油气系统

委内瑞拉的石油储量居世界第五位,其西北的马拉开波盆地为西半球乃至世界油气最富的超大型盆地。自1914年以来已累积产油 30×10^9 桶,估计最终石油储量为 44×10^9 桶。虽为一个成熟盆地,但其剩余储量仍相当于100多个大型油田。

1 地质背景

马拉开波盆地形成于北—北东向线性正断层控制的构造低地或箕状地堑内,于晚侏罗世开始沉积,在早白垩世—古新世发育了一个碎屑-碳酸盐混合台地。在土仑晚期—坎潘期,La Luna组沉积于缺氧的陆棚—斜坡环境,成为南美洲西北主要的烃源岩。

加勒比海板块和南美洲板块北缘在晚古新世和早—中始新世的斜向会聚,导致在马拉开波盆地东北部形成碎屑充填前陆楔状体。该前陆盆地为—厚约5km的始新世河流三角洲沉积楔状体,成为马拉开波盆地最富的油气储集层。古近纪的碰撞使沉积中心从西北向东南迁移150km。均衡回弹导致在盆地中东部形成一条大的始新世不整合面,成为始新世储集层之上的主要盖层。

马拉开波盆地的中央单元包括:(1)沉积于陆棚—斜坡环境的世界级源岩;(2)沉积于始新世—中新世河流三角洲环境的优良碎屑储集岩;(3)两期构造沉降造成大量油气生成的两期脉动,即古近纪加勒比海板块和南美洲板块斜向碰撞和新近纪佩里哈山脉—梅里达安第斯山脉的隆升;(4)油气沿走滑断层、正断层和逆断层以及晚始新世—渐新世的区域不整合面侧向、垂向运移。

盆地烃源岩的成熟度、运移和圈闭受到盆地构造演化的控制。在古近纪,盆地东北缘前渊的发育和断层的活化控制了烃源岩和储集岩的早期构造环境。烃类从盆地北缘—东北缘的源岩斜向运移到盆地中南部上覆始新世碎屑储集岩内。油气系统形成的第二个阶段是佩里哈山脉—梅里达安第斯山脉隆升期间盆地大部处于地表暴露期。盆地周缘山脉的隆升使盆地内部遭受褶皱和挤压,形成巨大的马拉开波向斜,油气开始形成于该向斜盆地中南部,并向北运移。烃类沿活化的走滑断层向上运移到现今盆地及其边缘油苗的位置。

2 烃源岩

马拉开波盆地的烃源岩为上白垩统赛诺曼阶—坎潘阶 La Luna 组海相碳酸盐岩(钙质页岩和泥质灰岩),占该盆地油气储量来源的98%,另2%来源于盆地西南部古新世 Orocué 组的非海相煤和页岩。

La Luna 组沉积厚度从盆地南部60m到盆地北部150m不等,沉积于陆棚—陆坡海相环境的贫氧底水条件,受幕式底流、碎屑流、浊流、断裂作用及间歇性上升海流的影响。

现今马拉开波盆地中南部的梅里达穹隆对于盆地的油气系统意义重大,因为其可能控制了白垩纪烃源岩的分布和厚度。

晚白垩世三冬期,盆地断层的再活化或哥伦比亚西部区域板块会聚作用,使得盆地古地形和古气候发生突变,结束了被动边缘环境。南美洲北部陆棚水体上涌及更加富氧可能与下列因素有关:南美洲板块向白垩纪热带辐合区迁移、哥伦比亚中科迪勒拉山脉上升淡水径流增加、海洋循环形成干—湿旋回。

La Luna 组烃源岩为良好至优良,其含偏油的 II 型干酪根,富氢,并含大量来源于藻类和细菌的有机质。原始总有机碳(TOC)的平均含量为5.6%,局部高达16.7%。

La Luna 组烃源岩含油性的变化受热成熟度和储层内蚀变作用的控制。按照成熟度,未蚀变的油的含油性划分为以下几种:临界成熟的油 API 为 $11^{\circ} \sim 16^{\circ}$;成熟油 API 为 $20^{\circ} \sim 39^{\circ}$;高成熟油 API 为 $37^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。随着成熟度的增加,API 重力和饱和烃的含量增加,而钒、硫和极性化合物减少。未蚀变的油广泛分布于马拉开波盆地,在始新世及其后和中新世—全新世时期进入储集层。

油在储层内的蚀变主要是生物降解作用和油—油混合的结果。蚀变的油主要见于盆地中部和东北部的储层。浅层始新世储层中的油的生物降解作用发生于渐新世,浅层中新世储层中的发生于中新世—全新世。生物降解油的特点是 API 低($< 25^{\circ}$)、高硫、钒和极性化合物含量高,饱和物含量低。

La Luna 组烃源岩内的天然气主要为溶解气。

La Luna 组埋藏高峰期和成熟期出现于区域构

造事件控制的两个主要脉动期:(a)古近纪沉降期(60~40Ma),盆地中部和东北部白垩纪岩石深埋至4~5km,达到热成熟窗。古近纪的构造沉降导致在盆地东北缘形成沉积中心。晚始新世—渐新世在盆地北部—东北部地区生成的大部分油现正在开采之中。(b)中新世—全新世沉降期(20~0Ma),盆地西南部白垩纪—古新世的烃源岩埋深为2~6km,埋藏事件始于始新世后的生烃期。盆地中部、南部和西南部生成的油可能不到50%。生油高峰期为中新世(20~15Ma)。南部和西南部总有机碳值大于2%,表明继续生油的潜力很大。

3 储集岩

马拉开波盆地的储集岩可分为3种类型:(1)亚始新世储集岩,位于盆地中南部深埋藏的白垩系灰岩和古新统砂岩,以及盆地西北部埋深不大的白垩系灰岩和基底岩石内;(2)始新世储集岩,含油性在该盆地为第一位,位于盆地中部和东北部,圈闭为与背斜相伴产出的构造圈闭,也包括河流—三角洲砂岩相圈闭;(3)中新世储集岩,含油性在该盆地为第二位,主要为河流砂岩相和地层楔状体,位于马拉开波湖东北缘。

4 运移和圈闭

马拉开波盆地油气的运移和圈闭主要见于下列几个构造控制的阶段:

(1)碳酸盐台地期(晚白垩世—古新世):La Luna组烃源岩沉积于被动边缘陆棚—斜坡浅海环境,厚度为40~150m。碳酸盐厚度的变化受控于下伏前白垩纪构造如梅里达穹隆的基底地形。

(2)前陆期(早始新世):加勒比海板块与南美洲板块的斜向碰撞导致形成不对称的沉积于前陆盆地的始新世河流—三角洲岩石楔状体。盆地北部—东北部的白垩纪烃源岩埋深为5km,达到油窗。受活化的侏罗纪北—北东向走滑断层的控制,在盆地中部形成拉分盆地。走滑断层为油气从白垩系源岩运移到始新统储集砂岩内提供了垂向通道。

(3)均衡回弹期(晚始新世—渐新世):在渐新世期间,盆地大部暴露于地表,并因前陆盆地闭合之后的均衡回弹而遭受剥蚀。这一回弹和剥蚀期在盆地

中部持续约20Ma,使油气泄漏至地表。由于大气水侵入到埋深较浅的始新世储层内,使油气发生生物降解作用。

(4)马拉开波向斜期(中新世—全新世):这一时期的特点是佩里哈山脉—梅里达安第斯山脉的隆升、马拉开波向斜的形成和盆地中部始新世构造在中新世早期发生倒转。与始新世相反新近纪盆地中心位于盆地南部,大陆相沉积向东—北东向尖灭,形成大型地层圈闭。

5 油气演化

3个主要构造变形期使盆地的油气系统发生多期演化:

阶段1——加勒比海板块与南美洲西北缘在古近纪时期斜向碰撞,马拉开波被动陆缘在古新世—早始新世形成了一种理想的机制以利于盆地东北部La Luna组烃源岩的快速埋藏和熟化。古近纪前陆盆地和右行冲断层——Burro Negro断层控制了盆地烃类的生成和运移。烃源岩在盆地东北部靠近Burro Negro断层的地方进入油窗。油气以走滑断层和正断层为通道向上、向南运移到台地内,并圈闭在不同构造高地的储层内。盆地北部La Luna组源岩由于埋深较大(>5km),目前正处于过成熟期。

阶段2——晚始新世—渐新世均衡回弹期:均衡回弹与会聚应力的释放有关。这一时期圈闭于近地表环境的油气可能已遭受生物降解作用。

阶段3——佩里哈山脉—梅里达安第斯山脉的隆升:区域隆升造成盆地沉积中心倒转,形成盆地南部La Luna组烃源岩的第二个成熟区。主要碎屑沉积中心在中新世到全新世从盆地东北部倒转到盆地南部—西南部。整个盆地La Luna组烃源岩进入油窗。东西向的会聚导致形成了马拉开波向斜,使走滑断层活化,成为逆断层,并突破始新世的不整合面。烃类利用始新世的不整合面内的突破口沿盆地侧翼从始新世—中新世储层向上运移。盆地中南部的La Luna组烃源岩仍处于成熟期—成熟早期,因而生油潜力较大。

(王承书编译自《AAPG Bulletin》,2006, Vol. 90, No. 4: 专辑“委内瑞拉马拉开波盆地的3-D剖析”)