

# 澳大利亚海上坎宁盆地油气地质特征及勘探潜力

李培培, 杨松岭, 刘志国, 许晓明, 谭卓, 李林涛

(中海油研究总院, 北京 100028)

**摘要:**以石油地质理论为基础, 利用区域地质、地震以及钻井资料, 对澳大利亚西北陆架海上坎宁盆地的沉积构造演化以及石油地质特征进行了综合分析。研究表明, 盆地经历了陆内裂陷期、克拉通边缘拗陷期、被动裂陷期和漂移期 4 个演化阶段, 主要充填了中生界沉积地层。目前, 已证实发育 2 套生储盖组合, 已发现油气均集中在三叠系含油气系统中, 平面上仅在 Bedout 拗陷内分布。盆地整体勘探程度较低, 油气地质综合分析表明, Bedout 拗陷以及 Rowley 拗陷具有良好的勘探前景。

**关键词:**西北陆架; 海上坎宁盆地; 沉积构造演化; 石油地质; 勘探潜力

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.02007

澳大利亚具有良好的石油投资环境和巨大的油气勘探潜力, 一直以来成为众多石油公司的勘探热点区之一。其中, 澳大利亚西北陆架油气资源尤为丰富, 其油气储量占澳大利亚油气总储量的 65.43%, 天然气储量占澳大利亚天然气总储量的 72.9%, 为典型的富气区<sup>[1]</sup>。澳大利亚西北陆架自西向东主要包含北卡那封、海上坎宁、布劳斯和波拿巴 4 个盆地(图 1), 在近年的勘探开发中显示出广阔的前景。

目前, 西北陆架已发现众多大型气藏, 其主要集中在北卡那封、波拿巴和布劳斯 3 个勘探程度相对较高的盆地<sup>[2]</sup>, 而海上坎宁盆地相较勘探程度低, 截止到 2014 年, 仅有少量气显示, 并无重大商业发现<sup>[3]</sup>。2014 年 8 月, Apache 公司在海上坎宁 Bedout 拗陷内钻探了 Phoenix South-1 井, 在中下三叠统钻遇轻质原油, 这成为整个盆地油

气突破重要里程碑, 不但改写了该盆地以及邻区以往三叠系只是天然气发现的历史, 同时开辟了海上坎宁盆地三叠系找油的新领域; 在 2015—2016 年, 在盆地内分别钻探了 Roc-1 和 Roc-2 井, 在中下三叠统发现天然气和凝析油, 使得海上坎宁盆地瞬间成为各大石油公司关注的热点。

鉴于国内外对该盆地的研究程度较低<sup>[2-4]</sup>, 本文以公开发表的文献和数据库资料为基础, 利用



图 1 澳大利亚西北陆架主要盆地分布示意图

Fig. 1 Distribution of main basins on the North West Shelf of Australia

收稿日期: 2017-07-30

基金项目: 国家科技重大专项“大陆边缘盆地类比与油气成藏规律研究”(2011ZX05030-001)

作者简介: 李培培(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事海外油气勘探研究方面的工作. E-mail: lipp2@cnooc.com.cn

石油地质综合分析的方法,开展区域地震资料解释和地质综合研究工作,总结了该盆地的构造演化特征、油气分布规律和油气勘探潜力,藉以为近两年来海上坎宁盆地日益频繁的招标和勘探活动提供借鉴和帮助。

## 1 区域地质概况

### 1.1 盆地构造特征

海上坎宁盆地位于澳大利亚西北陆架中段,

其西邻北卡那封盆地的 Beagle 拗陷,东接布劳斯盆地,北邻深海平原,南部与陆上坎宁盆地接壤(图 2)。盆地面积约  $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,最大沉积厚度可达  $1.6 \times 10^4 \text{ m}$ ,大部分位于浅水区內。

海上坎宁盆地是一个自晚古生代至新生代的大型沉积盆地<sup>[3]</sup>,盆地走向与现代海岸线大致平行,呈 NE—SW 向展布。盆地包含 Rowley 拗陷、Bedout 拗陷、Oobagooma 拗陷和 Broome 隆起 4 个一级构造单元(图 2),目前仅在 Bedout 凹陷的内三叠系有油气发现,它成为近期澳洲盆地石油勘探的热点之一。

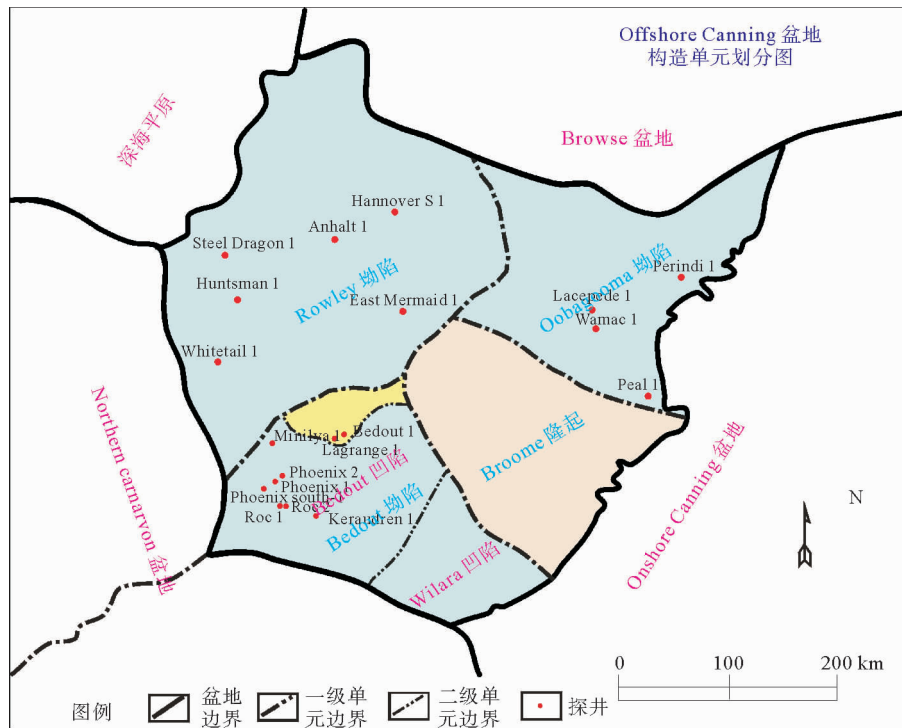


图 2 海上坎宁盆地构造单元划分

Fig. 2 Tectonic units of Offshore Canning Basin

### 1.2 盆地沉积构造演化特征

盆地形成和演化受控于先存基底古构造和西澳地块、拉萨地块、羌塘地块、滇缅马苏地块等微板块与澳洲大陆的分离,是一个二叠纪以前的陆内裂陷盆地、三叠纪时期的克拉通边缘盆地与后期被动大陆边缘盆地的多期叠合盆地<sup>[5-8]</sup>。依据盆地构造特点可将其划分为 4 期构造演化阶段:陆内裂陷阶段、克拉通边缘拗陷阶段、被动裂陷阶段和漂移阶段(图 3)。

#### 1.2.1 陆内裂陷阶段(古生代晚期—二叠纪)

在早二叠世,羌塘地块与希布玛苏地块开始向北漂移,新特提斯洋开始扩张,应力方向主要为 NW—SE 方向拉张应力,澳大利亚板块进入盆地活跃期,发育了一期裂陷,形成西澳超级盆地<sup>[6]</sup>,因此海上坎宁盆地此时形成一系列 NW—SE 向的断裂。

早二叠世以来,盆地主要发育陆相河流沉积,同时具有“西南高东北低”的构造背景,盆地沉积中心主体上位于东北部的 Oobagooma 拗陷内,拗

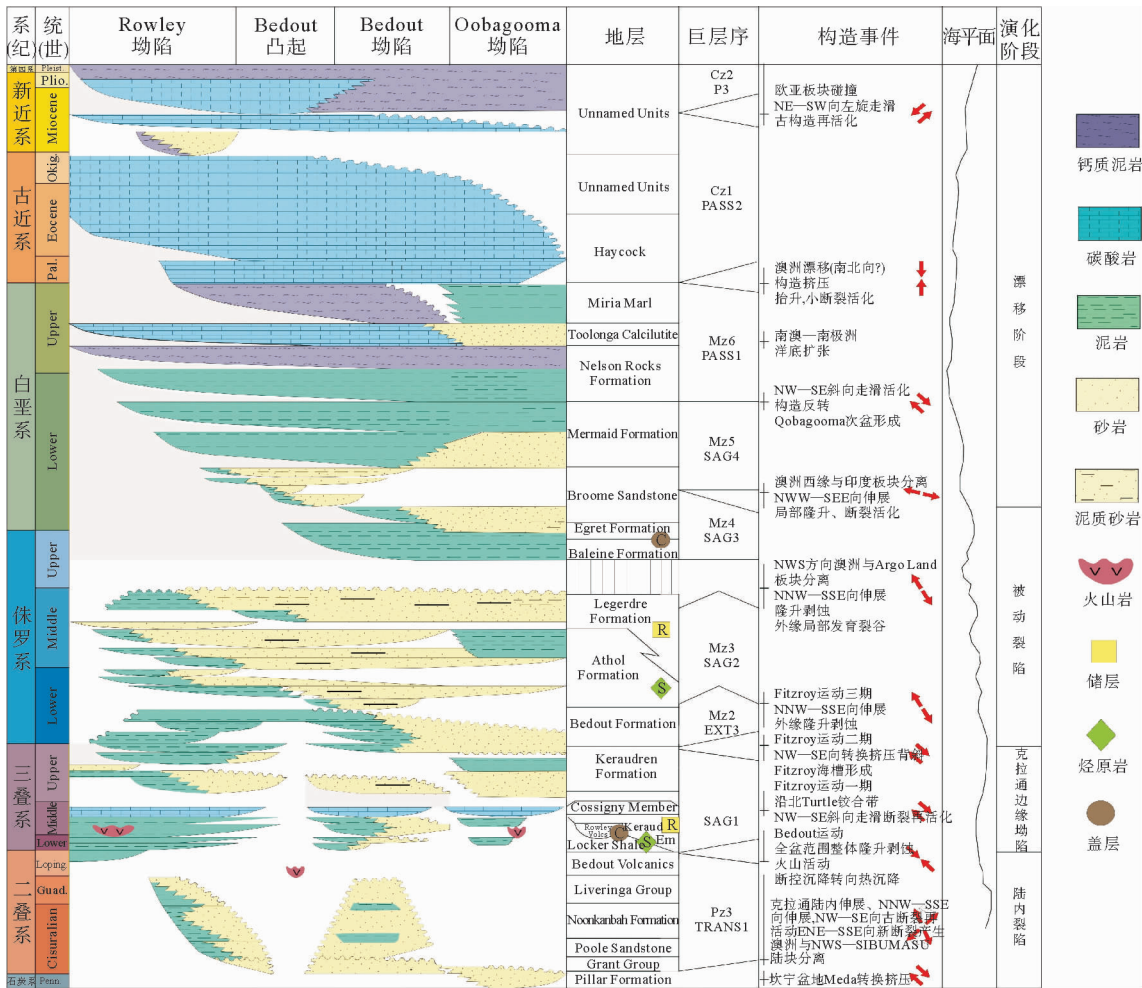


图3 海上坎宁盆地综合地层柱状图

Fig. 3 Integrated stratigraphic chart of Offshore Canning Basin

陷内地层可见明显的半地堑特征,其中古生界地层最大沉积厚度可达5 000 m。

1.2.2 克拉通边缘拗陷阶段(二叠纪末—三叠纪)

从晚二叠世—晚三叠世 Rhaetian 期羌塘地块与希布玛苏地块从澳洲板块边缘完全裂离,此时的北卡那封—海上坎宁盆地处于冈瓦纳大陆的东南侧,澳洲板块的西北缘与各个毗邻的板块相接,但同时与广海有部分连通,盆地原型为克拉通边缘盆地。

在晚二叠世,位于澳洲克拉通古大陆西北缘的海上坎宁盆地主要受到 NNW—SSE 向伸展应力场的影响,造成 NW—SE 向古断裂再活动和局部 NNE—SSW 向小断裂产生。同时盆地由陆相进入滨浅海—浅海相沉积环境,推测盆地中西部

发育了一套滨浅海砂岩沉积,盆地北部发育了一套浅海灰岩沉积。晚二叠世末期盆地发生了 Bedout 构造运动,造成全盆范围整体隆升剥蚀,盆地内热沉降作用显著。

在三叠纪时期,受北部古特提斯洋扩张和临近微板块活动影响,盆地整体呈现拗陷特征,该时期盆地的沉积中心位于 Rowley 拗陷和 Bedout 凹陷<sup>[5]</sup>,最大厚度可得达 10 000 m,而东南侧的 Willara 拗陷、Broome 隆起和 Oobagooma 拗陷此时处于剥蚀古陆区,缺失相应地层(图 4)。早—中三叠世,盆地东北部分别发生了两期 Fitzroy 构造运动,均以发育 NW—SE 向走滑应力为特征,分别造成盆地中三叠世 NW—SE 向走滑断裂的再活化和晚三叠世 NW—SE 向转换背斜的发育。这两期构造运动主要影响了盆地东北部地

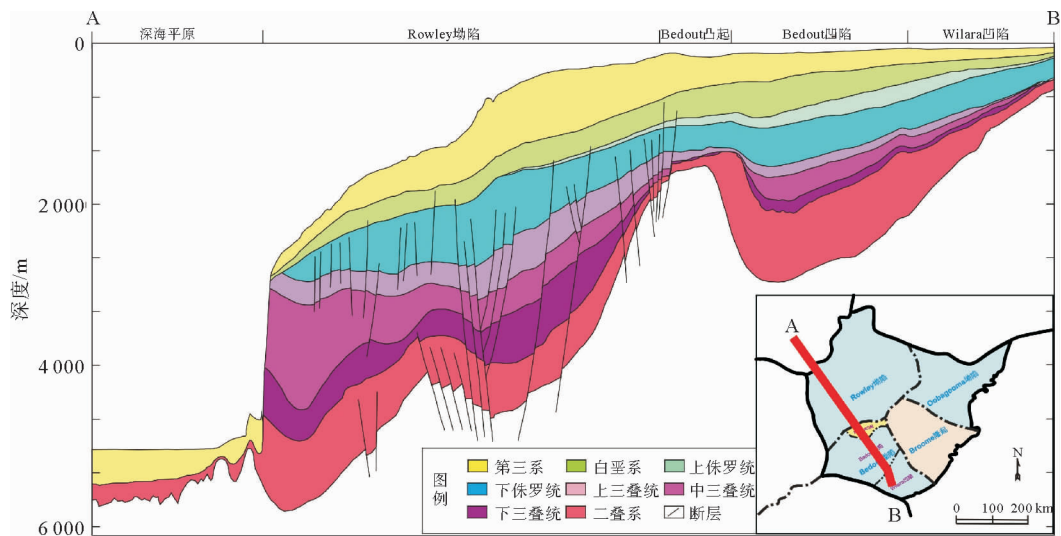


图 4 海上坎宁盆地剖面示意图

Fig. 4 A cross-section of offshore Canning Basin

区,造成盆地北部继承性坳陷的发育。

早三叠世发育一期快速海侵,沉积了一套以海相泥岩为主的 Locker 页岩,推测可能为一套潜力烃源岩。早三叠世末发生强制海退,盆地主要接受来自东侧的物源输入,发育了以盆地东南角为主要、东北角为次要物源的 Keraudren 三角洲沉积,形成了盆地三叠系的重要烃源和储层。

#### 1.2.3 被动裂陷阶段(三叠纪末—早白垩世早期)

在三叠纪末—早白垩世早期,随着印度板块东北和澳洲板块北部部分微板块与澳洲主板块的分离,盆地仍处冈瓦纳古大陆内,受区域张性应力作用,盆地转入裂陷活跃期。此时盆地整体处于 NNW—SSE 向伸展应力场,并存在稳定的沉降。

在早侏罗世早期,海上坎宁盆地发生又一次海侵作用,沉积了一套以海相泥岩为主的 Athol 组泥岩,形成盆地内侏罗系重要的烃源岩。紧随其后的海退作用在早—中侏罗世形成了大型 Legendre 三角洲沉积。这套三角洲物源主要来自盆地东南陆上,三角洲广泛发育,形成了侏罗系重要的储层。

在中侏罗世末期,北部 Argo 等微板块与澳洲板块分离,新特提斯洋开始形成,导致大陆解体,造成盆地北缘不断抬升,卡洛夫阶地层遭受大面积剥蚀,此时形成盆地最大的卡洛夫区域不整合面。在晚侏罗世—早白垩世早期,随着海平面

的不断上升,盆地主要是以海相泥岩沉积为主,形成盆地主要的盖层段(图 3)。同时由于西缅甸地块的裂离,盆地整体发生了构造反转,盆地北部隆升遭受严重的剥蚀,所以导致盆地北部缺失下白垩—上侏罗统地层(图 4)。

#### 1.2.4 漂移阶段(早白垩世—现今)

在早白垩世,随着新特提斯洋的扩张,凡兰吟期大印度板块开始裂离澳洲板块并向北漂移,与欧亚板块碰撞,此时形成了澳大利亚西北陆架区域显著的凡兰吟不整合界面,标志着盆地正式演变为被动大陆边缘盆地。此时盆地整体处于 NWW—SEE 向伸展应力场,造成部分早期断裂的再度活化,盆地中东部发生坳陷作用,西北部发生差异性隆升;在早白垩世晚期,盆地发生 NW—SE 向走滑作用,Oobagooma 坳陷形成;在晚白垩世,北部新特提斯洋继续扩张,盆地北缘持续隆升,部分小断裂再度活化。

在古近纪,盆地处于快速漂移期,受北部洋壳持续扩张、板块漂移提速影响,盆地构造再次活跃,造成全盆小断裂活化和西北局部隆升。盆地整体进入浅海—半深海沉积环境,水体向西北由浅变深,远端为深海平原的远洋饥饿沉积,近源则为陆缘碎屑与碳酸盐岩混积<sup>[5]</sup>。受古地形控制,盆地沉积厚度中心位于 Rowley 坳陷中东部地区。自新近纪以来,受北部与东南亚板块作用,盆地发生 NE—SW 向左旋走滑作用,造成部分断层

再活化,盆地构造与沉积作用整体进入平静期,以发育海相碳酸盐沉积为主;随着水体的演变,晚中新世以来盆地沉积以海相泥岩为主。

## 2 油气地质特征

### 2.1 烃源岩

在演化过程中,盆地已证实发育中下三叠统 Lower Keraudren 组泥岩和中下侏罗统 Athol 组泥岩两套烃源岩(图 3)。

中下三叠统的三角洲—浅海相 Lower Keraudren 组泥岩为主力烃源岩,其有机质丰度以中等为主,HI<200 mg HC/g,TOC 值为 0.5%~5%,有机质类型以Ⅲ型干酪根为主,含少量Ⅱ<sub>2</sub>型干酪根,以生气和凝析油为主。由于盆地相较周边相邻盆地具有地温梯度低、生烃门限深的特点,地层埋深达 3 700 m 才进入生烃门限(Ro 值 0.7%)(图 5);埋深到 6 000 m 才进入陆源有机烃源岩生烃高峰(Ro 值 1.3%),所以该套烃源岩仅在 Rowly 坳陷和 Bedout 坳陷内进入生烃门限。目前,Bedout 坳陷内已证实 Phoenix South 油藏和 Roc 气藏均为该套烃源岩供烃。

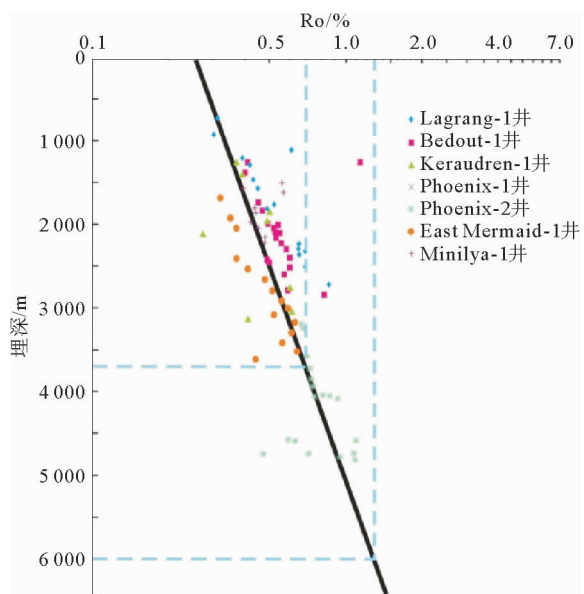


图 5 海上坎宁盆地烃源岩 Ro 与埋深的关系

Fig. 5 Source rock Ro vs depth relationship of Offshore Canning Basin

中下侏罗统 Athol 组泥岩在盆地内广泛发育,其主体处于三角洲—浅海相沉积环境,盆地北部 Rowly 坳陷发育大套浅海相厚层泥岩,盆地南部多发育三角洲相砂泥岩互层,从而导致 Athol 组泥岩厚度有“北厚南薄”的分布特征。其有机质丰度以中等—好为主,TOC 介于 0.5%~6%,有机质类型以Ⅲ型干酪根为主,以生气为主。地化分析认为,盆地西邻的 Beagle 坳陷内发现的 Nebo 油藏为 Athol 组泥岩供烃。从盆模分析来看,该套烃源岩仅在 Rowly 坳陷西部小范围进入生烃门限,盆地主体还处于未熟—低熟阶段,生烃潜力有限。

除此之外,推测下三叠统的 Locker 页岩可能为一套潜在油源岩,从区域认识上看,位于北卡纳封盆地以南的 Perth 盆地已证实了与 Locker 页岩同期发育的下三叠统 Kocktea 组页岩是一套有利油源岩,且 Locker 页岩在海上坎宁盆地内指标良好,TOC 介于 0.57%~2.73%,平均为 1.59%,推断 Locker 页岩具有供烃潜力。

### 2.2 储盖组合

盆地发育 2 套证实的储盖组合,自下至上分别是中下三叠统 Keraudren 组砂泥岩互层自储自盖储盖组合和中上侏罗统 Legendre 组砂岩/上侏罗统—下白垩统 Baleine 组 + Egret 组泥岩下储上盖储盖组合(图 3)。盆地整体储层较发育,但是受沉积相带、埋深、成岩作用等因素的影响,储层物性横向变化较大。两套储盖组合在储层岩性和平面分布上有着各自的特点。

#### 2.2.1 中上侏罗统 Legendre 组砂岩/上侏罗统—下白垩统泥岩储盖组合

在早—中侏罗世盆地发育大型的 Legendre 三角洲,其物源主要来自盆地东南陆上,盆地整体发育三角洲平原—三角洲前缘沉积体系,形成了侏罗系重要的 Legendre 组砂岩储层。Legendre 组沉积时期,岩性组合表现为大套砂岩夹薄层泥岩,该套储层在盆地内分布较广泛,钻井揭示储层物性普遍较好,平均孔隙度可达 20%,渗透率最大可达  $700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

该储盖组合的盖层是晚侏罗世—早白垩世时期发育的泥岩,主要包括 Baleine 组和 Egret 组两套地层。在这两套地层沉积期,盆地经历了大规模海侵作用,受此影响,盆地整体进入浅海相沉积

环境,以泥岩沉积为主,自SE向NW方向沉积厚度有减薄趋势;同时在该时期,由于西缅地块的裂离,盆地整体发生了构造反转,盆地北部隆升遭受严重的剥蚀。因此,受盖层沉积期远物源隆起区沉积背景和构造反转隆升剥蚀的综合影响,泥岩盖层整体呈现“西北薄东南厚+北缘局部缺失”的特征,故该储盖组合只在盆地南东部发育。

### 2.2.2 中下三叠统 Lower Keraudren 组砂泥岩互层储盖组合

在早三叠世末发生强制性海退,盆地主要接受来自东南侧的物源输入,发育了大规模的 Keraudren 三角洲<sup>[5]</sup>,它与北卡那封盆地的 Mungaroo 三角洲同期<sup>[10]</sup>,同时也为盆地提供了三叠系的重要储层。Keraudren 三角洲规模较大,也可细划为两期:早中三叠世的 Lower Keraudren 和中晚三叠世的 Upper Keraudren 三角洲。其中 Upper Keraudren 组地层主要发育处于三角洲平原—三角洲前缘相带,整体表现为大套砂岩夹薄层泥岩的岩性组合特征,地层高砂地比,缺乏有效的厚层泥岩隔层作为局部盖层;Lower Keraudren 组整体处于三角洲平原—滨浅海相带,多表现为砂泥岩互层岩性组合特征,Phoenix\_1、Roc\_1 等钻井均揭示该层段发育连续的砂泥岩互层多旋回沉积结构,可作为有效盖层,从而形成自储自盖式储盖组合,但其只在盆地西北部与中部发育,盆地东南部的 Broome 隆起和 Oobagooma 坳陷在三叠世时处于剥蚀区,缺失大部分三叠系地层。目前盆地仅在中下三叠统的 Lower Keraudren 组内获得油气发现。

受中下三叠统 Lower Keraudren 三角洲分布范围、地层埋深、压实与成岩作用等多因素的影响和控制,其有利储层的分布也相对局限,主要分布在盆地中部。从已钻井的储层物性分析来看,北部远离物源,颗粒分选较好,但地层平均埋深 >4 000 m,压实和成岩作用都变强,物性有变差的趋势;而盆地东南部主要处于剥蚀古陆区,地层相应缺失。由于盆地三叠系地层整体上沿物源方向埋深不断增加,那么离物源较近且埋深相对较浅的三角洲相带范围的有利储层的仅分布在盆地中部的 Bedout 坳陷以及 Rowley 坳陷附近,其中在 Bedout 坳陷内钻探的 Keraudren-1 井就揭示了良好的储层物性,其埋深较浅且处于三角洲平原

相带内,在中下三叠统的平均孔隙度就可达 18%~19%。同时结合钻井和地震资料分析,推测该套储盖组合的厚度向北部逐渐变厚,因远离物源,沉积相带逐渐过渡到浅海相,层间盖层条件有变好趋势。

## 3 油气田分布规律

截至目前,盆地内共有 2 个油气田发现,其中 Phoenix South 油田见轻质原油,原油 API 值达 45~47.8,发现储量 19 mmboe(据 WoodMackenzie 数据库,截至 2016 年 12 月)。Roc 气田发现以天然气为主,见少量凝析油,发现储量达 47.89 mmboe(据 WoodMackenzie 数据库,截至 2016 年 12 月),且 2016 年底钻探的 Roc\_2 井钻获高产气流,其测试天然气产量可达 51.2 million scf/d,凝析油产量可达 2 943 barrels/d。

从目前来看,已发现油气藏规模可观,纵向上均集中在中下三叠统成藏组合内,平面上仅在 Bedout 坳陷内分布。从区域构造特征分析,盆地由于受到伸展应力影响,三叠—侏罗纪时期发育大量张性复杂断裂,主要为沿着 NNE—SSW 方向展布的正断裂系,导致三叠—侏罗系易形成断层遮挡相关的断块、断背斜、半背斜等良好的构造圈闭类型,后续构造圈闭将成为下一步勘探的主要对象。

从盆地整体勘探程度较低推测,随着研究工作的不断深入,盆地会不断发现新的潜力较大油气成藏组合以及新的油气藏。

## 4 勘探潜力

研究表明,海上坎宁盆地与相邻北卡那封盆地构造沉积演化特征大致相似,中生界地层成藏条件明确,其中盆地中部的 Bedout 坳陷以及 Rowley 坳陷从烃源以及储盖条件上相对优越,且这 2 个构造单元内仍有大量待钻的有利构造圈闭,进一步发现油气的潜力较大。

与此同时,盆地东南部的陆上坎宁盆地业已证实存在古生界含油气系统<sup>[11]</sup>,且获得众多商业性发现,而 Oobagooma 坳陷与陆上坎宁盆地的古生界沉积盆地有延续性,推测其也具有一定的生

烃潜力,是后续油气勘探的重要潜力战略区之一。

整个盆地的勘探程度相对较低,仅在 Bedout 拗陷内取得油气勘探突破。这两年,由于 Phoenix South 油田和 Roc 气田的相继发现,使得海上坎宁盆地的油气勘探受到国际大型能源公司的持续关注,勘探也日趋活跃,多家石油公司纷纷开展地震采集和地质研究工作,极大的推动了勘探的进程。Carnarvon Petroleum 和 Quadrant Energy 公司近两年已经在盆地连续钻井 2 口,均有油气发现,预计今年还要钻探 Phoenix South-2 和 Dorrado-1 井,也从侧面反映出盆地可能具有一定的勘探潜力,值得我们进一步关注并寻找合作勘探的机会。

随着地质认识的不断深化,钻探技术的不断提高,这种低勘探程度的前瞻盆地必将成为下一步值得关注的勘探重点地区。

#### 参考文献:

- [1] 朱伟林,胡平,季洪泉,等. 澳大利亚含油气盆地[M]. 北京:科学出版社,2013:1-4.
- [2] 张建球,钱桂华,郭念发,等. 澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏[M]. 北京:石油工业出版社,2008:88-103.
- [3] Smith S A, Tingate P R, Griffiths C M, et al. The structural development and petroleum potential of the Roebuck Basin [J]. The APPEA Journal, 1999, 39(1): 364-385.
- [4] 许晓明,于水,骆宗强,等. 澳大利亚西北陆架天然气富集的主控因素[J]. 海洋地质前沿,2013,29(9):32-36.
- [5] Lipski, P. Structural framework and depositional history of the Bedout and Rowley subbasins[C]// Perth: Petroleum Exploration society of Australia, 1994:769-777.
- [6] Harrowfield M J, Cunneen M, Keep M, et al. Early-stage orogenesis in the Timor Sea region, NW Australia [J]. Journal of the Geological Society, 2003, 160:991-1001.
- [7] Kovac P, Lowe S, Rudge T, et al. Basin architecture from high-resolution gravity gradient, magnetic, and seismic data, King Sound, Canning Basin, Western Australia [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97:1597-1620.
- [8] 冯杨伟,屈红军,杨晨艺. 澳大利亚西北陆架油气成藏主控因素与勘探方向[J]. 中南大学学报, 2012, 43(6): 2259-2268.
- [9] Becker R T, Feist R, Kirchgasser W T. Devonian goniatite biostratigraphy and timing of facies movements in the Frasnian of the Canning Basin [J]. Geological Society of London Special Publication, 1993, 70:293-321.
- [10] 白国平,殷进垠. 澳大利亚北卡那封盆地油气地质特征及勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3):253-258.
- [11] Eyles N, 于建. 西澳大利亚坎宁盆地北部二叠纪-石炭纪构造地层演化和石油潜力[J]. 石油勘探开发情报, 2002(2):1-15.

## PETROLEUM GEOLOGY AND EXPLORATION POTENTIAL OF THE CANNING BASIN OFF AUSTRALIA

LI Peipei, YANG Songling, LIU Zhiguo, XU Xiaoming, TAN Zhuo, LI Lintao

(Research Institute of CNOOC, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Studies of sedimentary-tectonic evolution and petroleum geological features are carried out in this paper for the offshore Canning Basin on the northwest shelf of Australia, using the data of regional geology, seismics and drillings. It is revealed that the offshore Basin of Canning has experienced four evolutionary stages from intracontinental rifting, through craton margin depression and passive rifting, up to drifting period, and filled with Mesozoic deposits. There occur two sets of source-reservoir-cap assemblages in the Basin. So far, oil and gas have been discovered only in the Triassic petroleum system of the Bedout Depression. However, the whole basin remains rather low in exploration level. Integrated geological analyses suggest that the Bedout and Rowley depressions are prospective for future exploration.

**Key words:** North West Shelf; offshore Canning Basin; sedimentary-tectonic evolution; petroleum geology; exploration potential