

文章编号: 1001-6112(2007)03-0253-06

澳大利亚北卡那封盆地 油气地质特征及勘探潜力分析

白国平¹, 殷进垠²

(1. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249;
2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 海外研究中心, 北京 100083)

摘要:北卡那封盆地是澳大利亚最主要的产油气盆地,也是世界上主要的富气盆地之一。盆地经历了裂前、早期裂谷、晚期裂谷和裂后被动大陆边缘发育阶段,充填了以中生界占绝对优势的厚约 15 km 的沉积层系。三叠系一下白垩统内发育了 4 套烃源岩,油气主要储于上三叠统、上侏罗统和下白垩统。区域上,石油绝大部分分布于巴罗—丹皮尔次盆地,而漆金台地和埃克斯茅斯高地则富集了大部分的天然气和凝析油。截至 2004 年底,盆地内已发现石油(包括凝析油)5.27×10⁸ t,天然气 28 424×10⁸ m³。油气地质综合分析表明该盆地仍具有良好的勘探前景,勘探程度中等的埃克斯茅斯高地、埃克斯茅斯次盆地和比格尔次盆地的勘探潜力最大。

关键词:石油地质;油气分布;勘探潜力;北卡那封盆地;澳大利亚

中图分类号:TE122

文献标识码:A

PETROLEUM GEOLOGICAL FEATURES AND EXPLORATION POTENTIAL ANALYSES OF NORTH CARNAVON BASIN, AUSTRALIA

Bai Guoping¹, Yin Jinyin²

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation of Education Ministry, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Overseas Research Center, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The North Carnarvon Basin is the premier oil and gas producing basin in Australia and one of the world-class gas-rich basins. It experienced pre-rifting, early rifting, late rifting, and post-rifting passive margin development stages. The basin was filled with about 15 km thick sediments, which are overwhelmingly dominated by the Mesozoic. Four sets of source rocks were developed in the Triassic-Lower Cretaceous succession. Oil, condensate and gas are mainly reservoirized in the Upper Triassic, Upper Jurassic and Lower Cretaceous. Regionally, oil is mostly distributed in the Barrow and Dampier Sub-basins whereas the Exmouth Plateau and Rankin Platform contain bulk of the condensate and gas. By the end of 2004, 5.27×10⁸ tonnes of oil and 28 424×10⁸ m³ of gas had been discovered in the basin. Integrated petroleum geological analyses indicate that the basin has a considerable hydrocarbon prospectivity. The moderately explored Exmouth Plateau, Exmouth Sub-basin and Beagle Sub-basin comprise the most promising areas with the best exploration potential.

Key words: petroleum geology; oil and gas distribution, exploration potential, North Carnarvon Basin; Australia

北卡那封盆地位于澳大利亚西北大陆架的最南端,面积约 54.44×10⁴ km²,其中陆上面积仅 0.94×10⁴ km²。该盆地为一被动大陆边缘盆地^[1],主要沉积了中生界地层,地层最大厚度约 15 km。自 1954

年发现第一个油田以来,到 2004 年底已发现油/气田 151 个;发现石油(包括凝析油)储量(本文的储量均指探明和控制储量之和)5.27×10⁸ t,天然气储量 28 424×10⁸ m³,折合成油当量为 28.19×10⁸ t^[2],

收稿日期:2007-03-07;修订日期:2007-04-18。

作者简介:白国平(1963—),男(汉族),河北容城人,博士,副教授,主要从事全球油气分布和国外含油气盆地研究。

基金项目:中国石化集团公司重大基础研究项目(P99104)。

其中天然气储量占油气总储量的 81%，该盆地是一个世界级的富气盆地。作为最重要的含油气盆地，北卡那封盆地的天然气产量和石油产量分别于 1989 年和 1995 年超过维多利亚州的吉普斯兰盆地而成为澳大利亚最大的产气和产油盆地，2004 年该盆地的石油和天然气产量分别为 $1\,148.97 \times 10^4$ t 和 234.79×10^8 m³，分别占澳大利亚当年石油和天然气产量的 55.98% 和 59.26%^[3]。

中国从澳大利亚进口的液化天然气(LNG)就产自北卡那封盆地，中海油公司以非作业者的身份已参与了该盆地的油气勘探开发。然而，有关该盆地的中文文献比较少见，已有的研究成果多为盆地和其主油气的图册以及相伴生的简单文字简介^[4]。鉴于此，本文以广泛收集到的公开发表的文献和咨询公司的数据库资料为基础，利用石油地质综合分析的方法，总结了该盆地的油气地质特征，油气分布规律，并分析了其油气勘探潜力，目的就是为我国油公司进一步参与该盆地的油气勘探开发提供参考建议。

1 盆地基础地质特征

1.1 盆地构造特征

北卡那封盆地是发育于澳大利亚西北大陆架最南端的一个沉积盆地，东以乌龟北凸起与柔布克

(Roebuck)盆地分开，西和北与科维尔(Curvier)、盖斯克吟(Gascoyne)和阿尔戈(Argo)深海平原相邻^[5]，分界线人为定为 3 500 m 水深线(图 1)。盆地内划分出的主要构造单元包括埃克斯茅斯(Exmouth)高地、袋熊高地、伊外斯特盖特尔(Investigator)次盆地、滦金(Rankin)台地、埃克斯茅斯次盆地、巴罗(Barrow)次盆地、丹皮尔(Dampier)次盆地、比格尔(Beagle)次盆地、恩德比(Enderby)阶地、皮达姆拉(Peedamullah)陆架和兰伯特(Lambert)陆架^[6](图 1,2)。不同构造单元之间一般有明显的分界线，但是巴罗次盆地和丹皮尔次盆地之间的分界线比较模糊，因此这 2 个次盆地常常被合在一起统称为巴罗—丹皮尔次盆地。

1.2 盆地构造—沉积演化特征

北卡那封盆地是在古生代—中生代冈瓦纳大陆破裂基础上形成的，破碎的陆块分阶段从西北陆架分裂出去，朝欧亚板块漂移和增生。石炭—三叠系地层沉积于拗陷盆地构造背景，随后的地层沉积受到了侏罗纪早期的裂谷活动以及中侏罗世晚卡洛期和早白垩世早凡兰吟期发生的 2 次解体活动的影响。北卡那封盆地的构造—沉积演化史可分为裂前克拉通、早期裂谷、晚期裂谷和裂后被动陆缘 4 个发育阶段，这 4 个阶段对应着 4 套不同的地层单元^[7](图 3)。

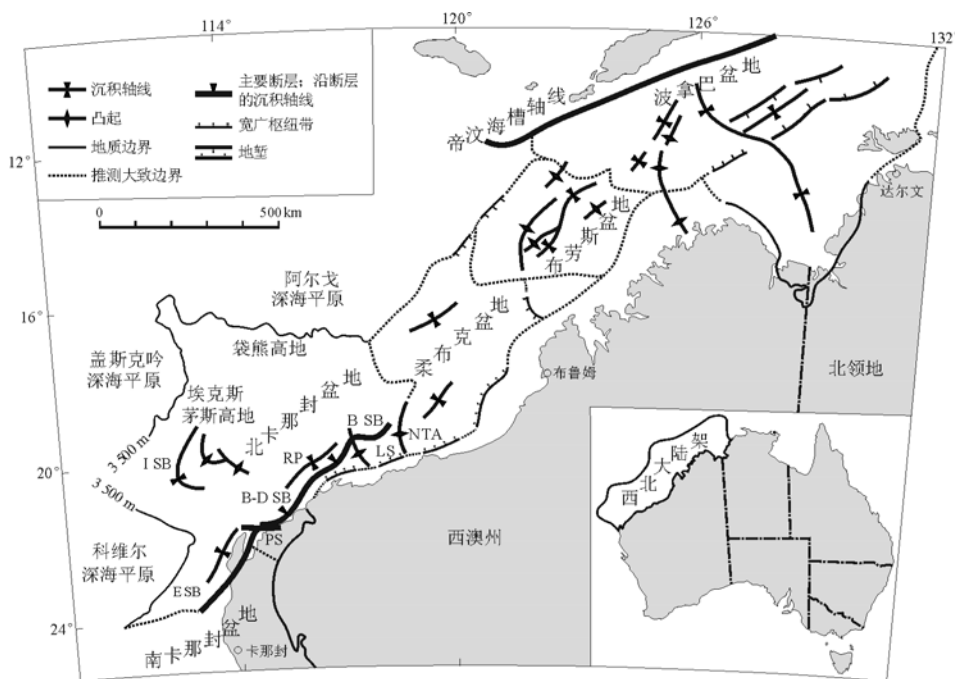


图 1 澳大利亚西北大陆架沉积盆地分布^[5]

LS. 兰伯特陆架; B SB. 比格尔次盆地; E SB. 埃克斯茅斯次盆地; RP. 滦金台地; PS. 皮达姆拉陆架; B-D SB. 巴罗—丹皮尔次盆地; I SB. 伊外斯特盖特尔次盆地; NTA. 乌龟北凸起
Fig. 1 Distribution map of sedimentary basins in the North West Shelf of Australia^[5]

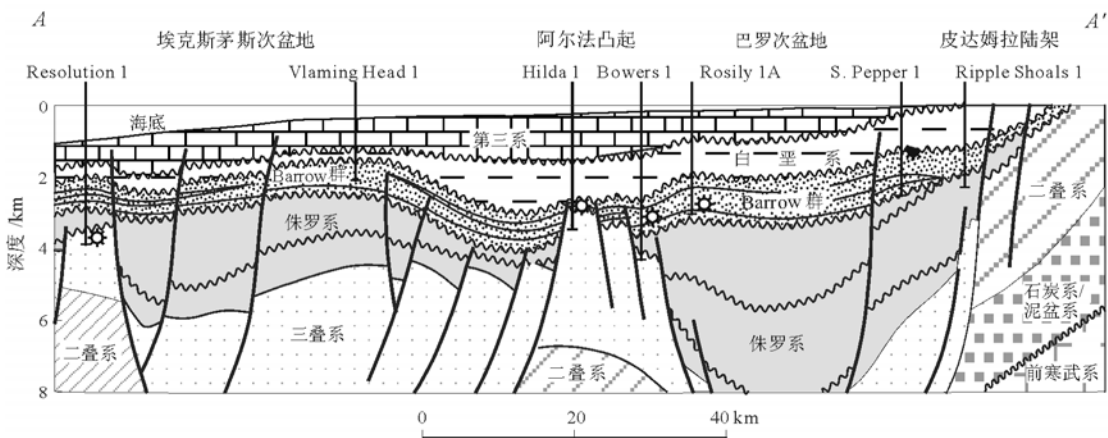
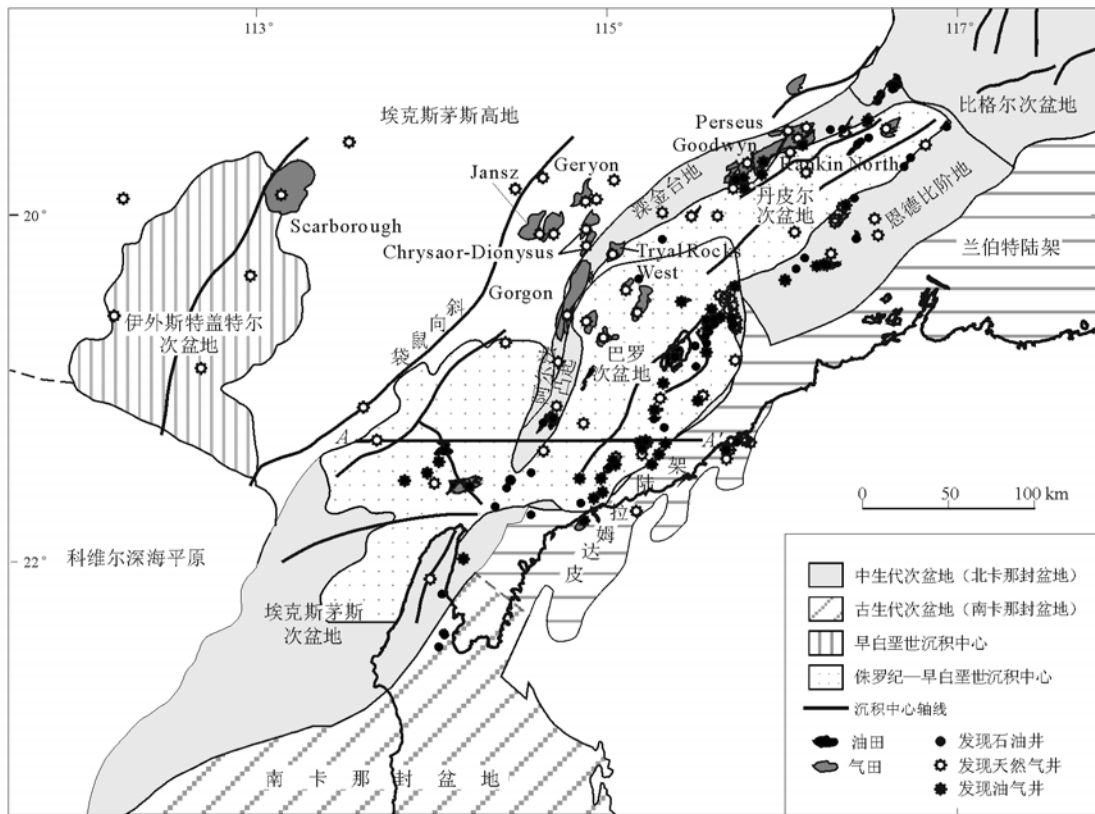


图 2 澳大利亚北卡那封盆地石油地质综合图^[6]

上图为构造分区和油气田分布图；下图为横贯巴罗次盆地和埃克斯茅斯次盆地的地质剖面图。

Fig. 2 Integrated map showing petroleum geological features of the North Carnarvon Basin, Australia^[6]

1.2.1 裂前发育阶段

中古生代的裂谷和解体活动导致晚古生代和三叠纪期间北卡那封盆地经历了拗陷发育阶段，并于克拉通背景下在全区域内沉积了上二叠统一下侏罗统裂前层系。这套层系由上二叠统一下侏罗统赫塘阶组成，地层包括陆架相二叠系 Kenedy 群、浅海相上二叠统 Chinty 组、河流—三角洲相—中三叠统 Locker 页岩组、河流相中—上三叠统 Mungaroo 组、浅海相下侏罗统 North Rankin 组及其与它们时代相当的地层(图 3)。

1.2.2 早期裂谷阶段

起始于晚赫塘期—早辛涅缪尔期的裂谷作用结束了三叠纪时期的拗陷沉积背景，西北大陆架北部的北西走向的古生代盆地被抬升和褶皱，同时形成一系列北东走向的活动裂谷和夭折裂谷^[8]。在北卡那封盆地，呈雁列式排列的埃克斯茅斯、巴罗、丹皮尔和比格尔等次盆地代表了夭折裂谷，而活动裂谷则沿着埃克斯茅斯高地的西侧边缘和埃克斯茅斯次盆地的西南延伸部分展布，并成为了后来大陆解体的位置。早期裂谷作用形成了三叠系断块

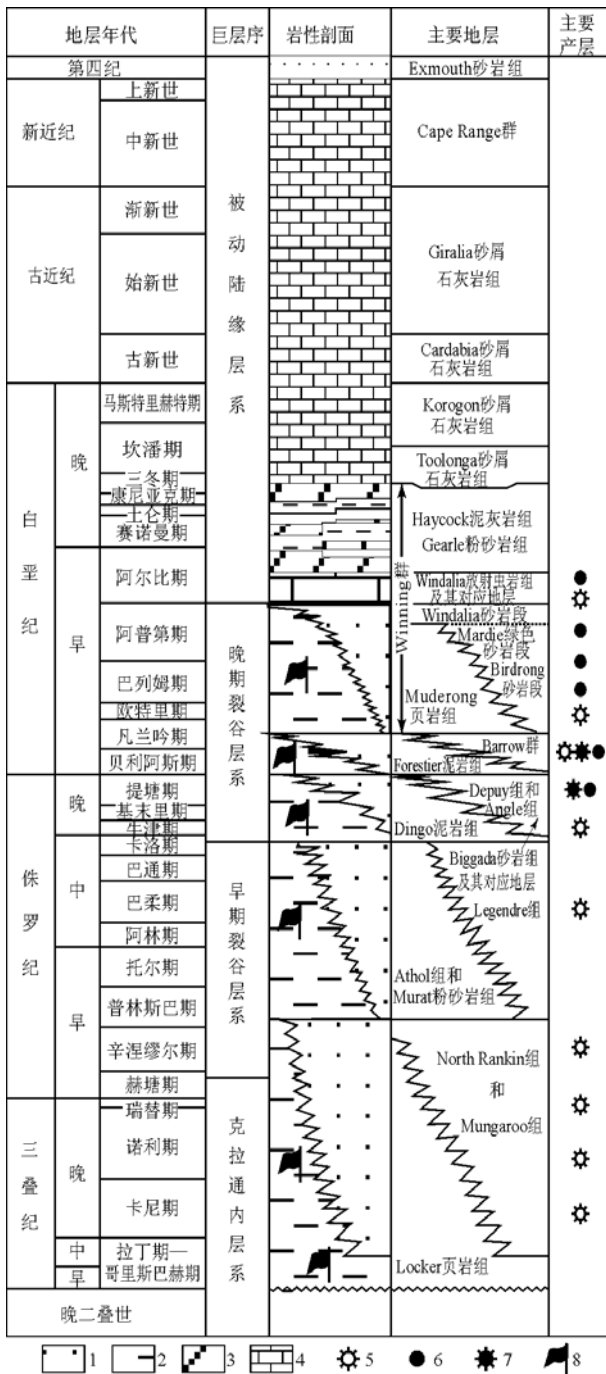


图 3 澳大利亚北卡那封盆地综合地层柱状图

1. 砂岩; 2. 泥岩; 3. 泥灰岩; 4. 石灰岩;
5. 气藏; 6. 油藏; 7. 油气藏; 8. 烃源岩

Fig. 3 Composite stratigraphic column for the North Carnarvon Basin, Australia

构造, 这些构造与沉积于之上的盖层组合在一起构成了滦金台地的大型构造圈闭和复合圈闭, 天然气的聚集成藏形成了大中型气田(图 2)。

早期裂谷阶段发生于普林斯巴期—卡洛期, 早期裂谷层系包括 Murat 粉砂岩组、Athol 组和 Legendre 组(图 3), 它们沉积于滨岸平原—陆架沉积环境。

1.2.3 晚期裂谷阶段

晚卡洛期在阿尔戈深海平原发生了海底扩张和大陆解体, 并形成了卡洛期不整合面, 该不整合面也称为主不整合面或大陆解体不整合面。此时的大陆解体为第一期大陆解体, 它影响到了袋熊高地和比格尔次盆地, 大陆解体和裂谷扩张与裂谷向西北的迁移有关^[8,9]。

凡兰吟期发生了第二期大陆解体, 这时埃克斯茅斯次盆地的局部地区的下凡兰吟阶地层遭受了剥蚀和与走滑断裂活动相关的褶皱构造活动, 沿着科维尔和盖斯克吟深海平原边界的活动裂谷, 发生了明显的大陆分离。在大陆分离之后的凡兰吟期—巴列姆期期间, 断裂带对沉积方式的影响减弱。

晚期裂谷阶段发生于晚卡洛期—阿普第期, 晚期裂谷层系包括 Dingo 泥岩组、Biggada 砂岩组、Angel 组、Dupuy 组、Barrow 群、Forestier 泥岩组、Flag 砂岩组、Birdrong 砂岩段、Mardie 绿色砂岩段、Muderong 页岩组、M. australis 砂岩段和 Windalia 砂岩段(图 3)。

1.2.4 裂后被动大陆边缘阶段

阿尔比期, 埃克斯茅斯高地和滦金台地开始沉降, 但在晚白垩世—古近纪时期沉降缓慢, 沉降导致了袋鼠向斜(图 2)构造锥形的形成, 该向斜位于牛津期之后裂谷所处的地壳脆弱带。地壳沉降引起埃克斯茅斯高地向东南倾斜以及埃克斯茅斯和巴罗—丹皮尔次盆地边界周围的褶皱, 这种褶皱作用形成了 2 个北东走向的沉积体系: 一个沿埃克斯茅斯高地的东南边缘(袋鼠向斜)分布, 另一个则分布于巴罗—丹皮尔次盆地的西南部。晚白垩世—第三纪期间, 沉积集中于袋鼠向斜的北部, 结果在比格尔次盆地和滦金台地的北边沉积了第三系地层。

整个晚白垩世期间, 巴罗—丹皮尔次盆地的北部地区依然经历了断裂构造活动, 在裂谷内, 沉积有碎屑岩。然而, 滦金台地的构造高地或出露于地表或被浅海所覆盖, 浅海环境导致了碳酸盐岩凝缩层的沉积。晚中新世—上新世期间, 盆地的外测(西北部)沉降至深海深度, 从而形成了该地区目前的地形地貌。

阿尔比阶—全新统构成了北卡那封盆地的裂后被动大陆边缘层系, 地层包括 Windalia 放射虫岩组、Haycock 泥灰岩组及其上覆地层(图 3)。

2 油气地质特征

2.1 生储盖特征

北卡那封盆地的烃源岩一般为具有生油和生

气潜力的中等品质的烃源岩,但也包括一些优质的生油岩。裂谷层系中的侏罗系海相至边缘海相泥、页岩构成了盆地的主要烃源岩,这些烃源岩主要分布于各个次盆地的凹陷内。北卡那封盆地主要发育4套烃源岩:三叠系 Locker 页岩组—Mungaroo 组烃源岩(既可生油也可生气,但以生气为主)、下一中侏罗统 Athol 组生气岩、中—上侏罗统 Dingo 泥岩组烃源岩和下白垩统 Forestier 泥岩组—Muderong 页岩组生油岩(图3)。

北卡那封盆地的储集岩分布于三叠系至古新统的多套层系,岩性以碎屑岩占绝对优势,主要由河流相至海相的石英砂岩和次长石砂岩组成。一般而言,储集岩的孔隙度为15%~30%,并随着深度的增加,由于压实作用和石英次生加大,孔隙度降低。海绿石是许多储集砂岩的重要组分,海绿石砂岩比纯砂岩容易压实,因此孔隙度随埋深更易降低。盆地内发育的主力储集层包括上三叠统 Mungaroo 组,下侏罗统 North Rankin 组、Brigadier 组和 Murat 粉砂岩组,上侏罗统 Angel 组和下白垩统 Barrow 群等(图3)。

北卡那封盆地的主要盖层从侏罗系 Dingo 泥岩组到下白垩统 Muderong 页岩组都有分布,其中的 Muderong 页岩组(图3)和更年轻的细粒沉积层在区域上广泛分布,因此构成了有效的区域盖层。除区域盖层外,三叠系—白垩系层系内还发育了多套层内局部盖层,但相对区域性盖层来说,其封盖作用要小得多。

2.2 油气成藏组合

北卡那封盆地共有24个油气成藏组合。主要石油成藏组合有 Winning 群构造成藏组合、Barrow 群构造成藏组合和 Angel 组构造成藏组合(图3),这3个组合内的石油储量分别占北卡那封盆地石油总储量的28%,27%和21%,由此可见盆地内的石油主要聚集于构造圈闭。

主要天然气成藏组合有 Mungaroo 组构造—

不整合面成藏组合、牛津阶地层成藏组合、Mungaroo 组构造成藏组合和 Barrow 组构造成藏组合(图3),它们的天然气储量分别占盆地天然气总储量的28%,20%,18%和13%。与油田(藏)的圈闭类型不同,天然气既可在构造圈闭、构造—地层圈闭和构造—不整合面复合圈闭内聚集成藏,也可在地层圈闭内聚集成藏。构造气藏、复合气藏和地层气藏中的天然气储量分别占天然气总储量的37%,43%和20%。

3 油气分布规律

自1954年发现第一个油田以来,截至2004年底北卡那封盆地内已发现151个油/气田。发现石油储量(包括凝析油) 5.27×10^8 t,天然气储量 $28\,424 \times 10^8$ m³,折合成油当量为 28.19×10^8 t(表1),其中天然气储量占油气总储量的81%。在已发现这些油气田中,9个为大气田(天然气可采储量超过 850×10^8 m³ 的气田),分别为 Jansz, Gorgon, Rankin North, Perseus, Scarborough, Goodwyn, Chrysaor—Dionysus, Geryon 和 Tryal Rocks West 气田(按储量大小排序),其中的4个分布于埃克斯茅斯高地,5个分布于滦金台地(图2)。

全球油气分布呈现出高度的不均一性^[10],油气分布的这种不均一性在北卡那封盆地也表现得相当明显。从区域分布看,发现的绝大部分石油分布于巴罗—丹皮尔次盆地,分布于此的石油储量占石油总储量的76.36%。天然气和凝析油则主要分布于滦金台地和埃克斯茅斯高地,前者的天然气和凝析油储量分别占天然气和凝析油总储量的51.50%和75.91%,后者的天然气和凝析油储量占40.73%和14.83%。油气的地理分布显示出“内侧为油、外侧为气”的特征(图2),这种分布特征主要受烃源岩灶和构造圈闭展布的控制。

从层系分布看,天然气和凝析油主要储于上三叠统 Mungaroo 组,其他主力储集层还包括上侏罗

表1 澳大利亚北卡那封盆地油气储量的层系分布^[2]

Table 1 Distribution of oil, condensate and gas reserves in different reservoir intervals in the North Carnarvon Basin, Australia

| 层位 | 石油 | | 凝析油 | | 天然气 | | 油当量 | |
|------|--------------|--------|--------------|--------|---------------------------|--------|--------------|--------|
| | 储量/ 10^6 t | 所占比例,% | 储量/ 10^6 t | 所占比例,% | 储量/ 10^8 t ³ | 所占比例,% | 储量/ 10^6 t | 所占比例,% |
| 古新统 | — | — | 0.17 | 0.08 | 75.38 | 0.27 | 6.25 | 0.22 |
| 下白垩统 | 227.42 | 71.96 | 21.32 | 10.09 | 6 077.71 | 21.38 | 738.77 | 26.21 |
| 上侏罗统 | 78.49 | 24.84 | 21.20 | 10.03 | 6 463.14 | 22.74 | 620.79 | 22.02 |
| 中侏罗统 | 6.44 | 2.04 | 35.34 | 16.72 | 2 560.44 | 9.01 | 248.22 | 8.81 |
| 下侏罗统 | 1.29 | 0.41 | 2.10 | 0.99 | 201.51 | 0.71 | 19.63 | 0.70 |
| 上三叠统 | 1.93 | 0.61 | 131.19 | 62.08 | 13 043.61 | 45.89 | 1 184.80 | 42.03 |
| 其它 | 0.48 | 0.15 | 0 | 0 | 1.70 | 0.01 | 0.62 | 0.02 |

统和下白垩统储集层(表1)。与天然气不同的是,石油主要储于下白垩统和上侏罗统,油气的层系分布显现出“上油下气”的特征,这与我国鄂尔多斯盆地古生界储气中生界储油的“上油下气”分布特征^[11]相类似。

4 勘探潜力分析与有利区预测

北卡那封盆地是澳大利亚最重要的产油气盆地,截至2004年底,已累计产石油(包括凝析油) 1.61×10^8 t,天然气 $2\ 701.13 \times 10^8$ m³^[3]。据美国地质调查局的资评结果^[12],该盆地待发现的石油、天然气和凝析油可采资源量均值分别为 3.26×10^8 t, $18\ 300 \times 10^8$ m³和 5.04×10^8 t,折合成油当量为 23.08×10^8 t。油气发现过程分析表明,尽管该盆地已经历50余年的油气勘探,但是每年发现的油气储量并没有明显减少的趋势(图4)。据此认为,该盆地依然具有良好的勘探潜力,特别是天然气的勘探潜力。

丹皮尔次盆地和巴罗次盆地的油气勘探已进入高勘探成熟阶段,但是这2个次盆地内仍存在有待钻探的构造和地层圈闭,生烃灶附近地区为有利的勘探区,在这些地区,有进一步发现油气的潜力。

比格尔次盆地和埃克斯茅斯次盆地只经历了中等的勘探程度,但它们却有着与丹皮尔和巴罗次盆地类似的构造沉积演化史,据此,推测其勘探潜力较大,特别是埃克斯茅斯次盆地。此外埃克斯茅斯高地的勘探潜力亦不容忽视,在该地区于2000年发现了Jansz大气田(盆地内最大的气田,可采储量

估计为 $5\ 660(10^8\ m^3)^{[2]}$ (图2),这一发现表明埃克斯茅斯高地的勘探潜力良好,不过需要指出的是该高地位于深水区,因此勘探开发成本要高的多。

参考文献:

- 1 Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[A]. In: Halbouty M T, ed. Giant oil and gas fields of the decade 1990—1999, AAPG Memoir 78[M]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 2003. 15~105
- 2 IHS Energy Group. Basin Monitor. North Carnarvon Basin, Australia, Indian Ocean Region[DB]. Englewood, Colorado: IHS Energy Group, 2005 [Database available from IHS Energy Group, 15 Inverness Way East, Englewood, Colorado, 80112, U. S. A.]
- 3 Geoscience Australia. Oil and gas resources of Australia 2004 [M]. Canberra: Geoscience Australia, 2006. 1~233
- 4 童晓光, 关增森. 世界石油勘探开发图集(亚洲太平洋地区分册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 1~288
- 5 Bradshaw M T, Yeates A N, Beynon R M, et al. Palaeogeographic evolution of the North West Shelf region [A]. In: Purcell P G, Purcell R R, eds. The North West Shelf, Australia, proceedings petroleum exploration society Australia symposium [C], Perth: WA, 1988. 29~54
- 6 Geoscience Australia. Carnarvon Basin [EB/OL]. [2006-03-10]. http://www.ga.gov.au/oceans/rpg_Carnarvon.jsp.
- 7 Jablonski D. Recent advances in the sequence stratigraphy of the Triassic to Lower Cretaceous succession in the northern Carnarvon Basin, Australia [J]. The APPEA Journal, 1997, 37(1): 429~454
- 8 Labutis V R. Sequence stratigraphy and the North West Shelf of Australia [A]. In: Purcell P G, Purcell R R, eds. The sedimentary basins of Western Australia: proceedings of petroleum exploration society of Australia symposium [C], Perth: WA, 1994. 159~180
- 9 Barber P M. Sequence stratigraphy and petroleum potential of Upper Jurassic—Lower Cretaceous depositional systems in the Dampier Sub-basin, North West Shelf, Australia [A]. In: Purcell P G, Purcell R R, eds. The sedimentary basins of Western Australia, proceedings of petroleum exploration society of Australia symposium [C], Perth: WA, 1994. 525~582
- 10 史丹妮, 王 骏, 张艳秋等. 论新形势下海外油气勘探开发方向[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 474~479
- 11 常象春, 王明镇, 郭海花. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产共存特征及其相关性[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 507~510
- 12 Ahlbrandt T S, Carpentier R R, Klett T R, et al. Global resources estimates from total petroleum systems, AAPG Memoir 86 [M]. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 2005. 1~323

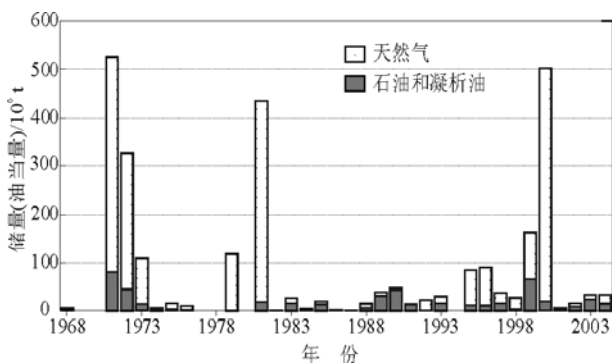


图4 澳大利亚北卡那封盆地年增油气储量直方图^[2]
Fig. 4 Histograms of oil and gas reserve additions by year in the North Carnarvon Basin, Australia