

综述与评述

# 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景

吴时国<sup>1</sup>, 袁圣强<sup>1,2</sup>

(11 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 21 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 深水油气是世界上油气勘探快速发展的领域, 2004年最高钻井水深纪录已达3 050 m, 我国三大石油公司也开始了南海深水油气的勘探。指出: 从国外发现的深水油气田来看, 绝大多数含油气盆地位于离散大陆边缘, 发育有裂陷前期、裂陷期和裂后热沉降期3个超层序; 烃源岩大多是裂陷期的湖相和滨浅海相沉积以及裂后热沉降期海相灰岩、页岩; 储层则以裂陷热沉降期深水浊流沉积体系和裂陷期的砂岩为主; 深水油气的成藏模式, 除裂陷盆地的成藏模式外, 还有裂后热沉降期裂陷的深水浊积砂岩油藏、底辟构造油藏等特殊类型。通过对南海2个深水地区油气地质条件的分析, 认为南海与国外已有油气发现的深水区具有许多相似的含油气地质条件和丰富的油气远景。

**关键词:** 深水油气; 成藏地质条件; 离散大陆边缘; 南海

**中图分类号:** TE51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 167221926(2005)0620693207

## 1 全球深水油气勘探的3个热点地区

随着技术的进步和能源需求的增长以及陆上和浅海老油田区新发现难度的增大, 自20世纪80年代中期以来勘察家的目光就投向了深水区, 尤其是在巴西坎波斯(Campo s)盆地发现了Albaco ra, Marlin等大型油气田以后, 深水勘探更是不断升温, 如今已成为世界上最热的勘探领域。事实上, 目前世界上已形成3个深水勘探的热点地区, 即大西洋两岸的西非岸外、坎波斯盆地和墨西哥湾<sup>[1~11]</sup>。

世界上著名的能源咨询公司(Douglas Westwood L td)在《2000- 2004年世界深水报告》中指出, 2004年世界投入深水油田的费用将从2000年的76亿美元增加到约220亿美元, 其中西非地区增长最快, 仅2005年的投入已超过50亿美元。从2000年到2010年, 全球深水区石油和天然气产量将分别达273 15亿桶和214 601万ft<sup>3</sup>, 其中西非、巴西、墨西哥湾最多, 其次是挪威、东南亚、英国等。

近期深水钻探的水深记录不断地被刷新。Marathon 石油公司1999年在墨西哥湾Walker Ridge 425区块创下的2 437 m水深的钻井记录, BP

公司于2000年在同一区块突破了2 693 m水深的探井纪录, 2003年11月中旬, Transocean和雪弗隆-德士古公司宣布, Transocean钻探船发现者号创造了深海钻探世界新纪录, 在美国墨西哥湾钻井水深达3 003 m, 而2004年的钻探纪录是3 050 m<sup>[12]</sup>。DDP的大洋钻探船“地球”号钻孔设计钻井水深达到4 000 m。

近来这三大热点地区在深水勘探开发方面捷报频传。

例如在西非的安哥拉和尼日尔三角洲深水区就不断有新的勘探发现和新油田投产, 还有新一轮超深水区块的成功招标。Total公司在安哥拉的17区块发现了Girassol Dalia, Rosa, Lirio, Tulipa, Orquidea, Cravo, Camelia等油田。Chevron公司在安哥拉的14区块也发现了7个油田。Esso公司等安哥拉15区块发现了Hungo, Kissanje, Marimba, Dikanza, Xicomba, Chocalho等油田。BP公司在18区块有Platina, Plutonio, Galia等油田的发现。在尼日尔三角洲深水区, 自1995年发现有10亿桶储量的Bonga油田以后, 1999年又发现Agbami Erha, Nnw a等深水油气田。据Douglas Westwood L td统

收稿日期: 200520822; 修回日期: 20052102041

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(编号: KZCX32SW 2219)资助

作者简介: 吴时国(1963), 男, 湖北襄阳人, 研究员, 博士, 主要从事海底构造、海洋地球物理和天然气水合物研究 E-mail: swu@ms.gdio.ac.cn

计,西非 2000-2005 年间已有 17 个深水油气田投产。

又如坎波斯盆地。巴西 2000 年石油日产量近 130 万桶,其中 70% 来自 400~2 000 m 的深水区,在 2005 年达到日产石油 185 万桶。巴西一方面在积极开发已发现的深水大油田,如 1999 年水深 1 853 m 的 Roncodor 油田 (27 亿桶储量) 投产,更是创下世界记录。另一方面积极对外开放,合作勘探,加速深水区块油气勘探。1999 年 Petrobras 公司宣布将在 2000-2005 年期间投资 329 亿美元,其中 68% 将用于深水区的勘探开发。

再如墨西哥湾。1999 年由 BP 公司发现的 Crazy Horse 油田储量近 10 亿桶,最近在其西北 5 英里外密西西比峡谷 776 区块又发现了 Crazy Horse North 油田,据称它也可列为这里的五大发现之一。截至 2000 年初,已在大于 500 m 水深的区域内找到了 112 处油气显示<sup>[13]</sup>。在美国墨西哥湾大于 330 m 的深水区的石油产量在 2000 年已达到 271 百万桶,比上年度增加 20%,使得美国在整个墨西哥湾区的石油总年产量在去年创下了记录,达 522 百万桶,比 1999 年增加了 5%,也使得深水区的产量第一次超过了浅水区。另一方面在天然气产量方面,深水区的产量增长一定程度上减缓了该地区产量下降的速度。2000 年这里的天然气产量为 4.88 万亿 ft<sup>3</sup>,比 1999 年降低 314%,但浅水区产量为 3190 万亿 ft<sup>3</sup>,比 1999 年下降达 7.4%,自 1996 年以来已下降 18.8%。

除了以上这三大热点地区外,近年来,大西洋两岸北端如挪威、英国、加拿大、摩洛哥、毛里塔尼亚和南端的纳米比亚、南非和阿根廷等,地中海沿岸国家和埃及、以色列、土耳其(在黑海),亚太地区如印度、澳大利亚、新西兰、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾都在积极开展深水勘探或开发活动。

在南海地区,深水勘探开发也在较广泛的进行之中。迄今为止,中国正在开展的 3 个深水勘探项目 3 个,全部在南海海域。中国海洋石油总公司(CNOOC)和加拿大赫斯基能源公司(Husky Energy)合作在 40630 区块打的第一个预探井没有任何发现,但大约 600 m 的油井深度对于中国海洋石油总公司和赫斯基能源公司来说都刷新了记录。文莱在巴兰三角洲外 400~500 m 水深处发现 Merpati 和 Meragi 油气田,其中 Merpati 21 井证实气柱至少高达 605 m。马来西亚在沙巴外海深水 G 区块里由 Shell 公司钻的 Kamunsu East 21 井水深 2 417 ft,是该国深水第一口探井。Murphy 石油

公司在深水 K 区块采集了 2D 和 3D 地震资料。另外 Petronas 公司已在马来西亚海域招标 10 个深水区块,最后一个区块是与 Amerada Hess International 公司签订的 F 区块,该区块位于沙捞越 Bintulu 西北 350 km,水深 200~1 200 m。菲律宾的 Malampaya 油气田已在今年 10 月投产,未来 20 年内将产 3 万亿 ft<sup>3</sup> 的天然气和 120 百万桶的凝析油,预计 2002 年气产量达 360 百万 ft<sup>3</sup>/d。

## 2 大西洋两侧深水区油气田的成藏地质条件

### 2.1 地质构造背景

目前,世界上的深水勘探主要是在被动(离散)大陆边缘盆地进行,而所有现存的离散大陆边缘都是在三叠纪之后产生,并与泛大陆的解体有关。离散大陆边缘盆地的发育一般都经历裂谷前期(裂前期)、裂谷盆地发育期(裂陷期)以及裂后热沉降期 3 个大的演化阶段。对应的沉积地层分别为裂前层序、裂陷盆地层序、热沉降期沉积层序。其中热沉降期层序内又可细分为 2 个次级层序——早期局限海层序及晚期的进积层序。在热沉降期早期局限海相沉积时,由于气候干旱的原因,加上洋脊等屏障作用,可形成蒸发盐岩。在裂谷期前后存在明显的不整合,分别称为开裂不整合(Rift onset unconformity)和裂开不整合(Breakup unconformity)。引起大陆裂解的原因是地幔热点或大规模的地幔横向运动所为。

关于大西洋的张开历史,首先是北大西洋南部先张开,其次是南大西洋,再后是赤道附近的大西洋,而南大西洋的张裂和海底扩张的开始是由南向北时代变新。正因为这样,在大西洋两边发育的地层层序的时代也呈有规律的新老变化。如在非洲西南大陆边缘盆地,从南到北,盆地开裂和裂开不整合的时代都呈渐新的趋势。开裂不整合从 Cape 盆地的 220~200 Ma, Orange 盆地的 160~144 Ma, Luderitz Walvis 盆地的 126 Ma, North Gabon 盆地的 125~122 Ma 到 Rio Muni Douala Benue 盆地的 119 Ma。热沉降期层序的时代从 Cape Orange 2 Luderitz 盆地的 137~130 Ma, Walvis 盆地的 126 Ma, Benguela Kwanza Congo Gabon 盆地的 127~117 Ma, Rio Muni Douala 盆地的 118 Ma 到 Benue 盆地的 80 Ma。

### 2.2 深水区烃源岩

在南大西洋两侧巴西和西非深水油气勘探区,最重要的烃源岩是裂陷期湖相页岩或泥岩以及

裂后热沉降的局部海泥岩,但以裂陷期的烃源岩为主。在巴西 Campos 盆地,烃源岩主要为下白垩统 Lagoa Feia 组页岩,有机碳含量 2%~6%,最高达 9%,于中新世时达到成熟。裂后层序中也有些组有机质含量高,但因成熟度原因而不能成为烃源岩或最多只能是次要烃源岩。在西非的加蓬盆地和下刚果盆地,除了发育断陷期 Kissenda 组、Melania 组和 Bucomazi 组烃源岩外,还发育了飘移期烃源岩,如在加蓬盆地地下白垩统 Madiela 组、Azile (Turonian) 和 Aguille 组 (Senonian) 中发现了较好的源岩。而中新统的 Mandorve 组以碳质泥岩为主,总有机碳含量 4%~5% 或更高,但在整个盆地都不成熟。下白垩统 Melania 组的湖相黑色有机页岩总有机碳含量平均为 6.1%,有机质类型为  $E_1$  型和  $^{\circ}_1$  型,而 Kissenda 组湖相源岩只在少数井钻遇,丰度比 Melania 组低,总有机碳含量平均 1.5%~2%,有机质主要由  $^{\circ}_1$  型和  $^{\circ}_2$  型干酪根组成。Azile 组页岩总有机碳含量平均为 3%~5%,有机质类型主要为  $^{\circ}_1$  型,局部  $^{\circ}_2$  型。

对尼日尔三角洲区的烃源岩尚有争论。一种观点认为是前三角洲的海相页岩 (Akata 组),另一种观点是代表三角洲前缘部分的 Agbada 组。但根据现有地质资料和油气性质的对比,认为烃源主要为陆源有机质,最可能是三角洲平原的沼泽环境中沉积的有机质被水流带入更深水体中再沉积而保存下来的有机质,这点是没有太大争议的。这与马哈坎三角洲和巴兰三角洲的烃源岩类型相似。

墨西哥湾盆地目前的烃源岩是热沉降相层序,包括上侏罗统、白垩系和始新统多套海相地层。这些层序虽然未被海上钻井所证实,但却被陆上和深海钻探 (SDP) 535T 和 540 站位所证实。关于以上烃源岩的结论也被石油地球化学研究中的油-岩对比资料所证实。这些源岩大部分为  $^{\circ}$  型或  $^{\circ}_{2S}$  (富硫) 型干酪根类型,这些源岩发育与全球海洋缺氧事件相对应<sup>[14]</sup>。

### 2.3 深水区的储盖层

在被动边缘盆地从理论上讲,作为油气储盖层的地层可在前裂陷期、裂陷期、裂后热沉降期任一阶段出现。以坎波斯盆地为例,储层可以是裂陷期的裂缝性玄武岩,被湖相泥岩盖住;还可以是湖中浅滩上形成的介壳灰岩,以上覆湖侵泥岩作盖层;还可以是岩石热沉降早期的浅水碳酸盐层,海侵泥岩作盖层;或是热沉降晚期深水浊积岩作储层,以深海泥岩作盖层。但由于现今的深水区往往是陆坡向前推进的

结果,储层物性的限制使得越往深水区,储盖层时代越新。在坎波斯盆地大于 200 m 水深的油田基本上是以始新世以来沉积的浊积岩为储层,始新统储层由中粗粒的砂层组成,具有 26%~30% 的孔隙度和高达 1D 的渗透率,砂层最大厚度 90 m;渐新统储层平均孔隙度 25%~30%,渗透率达 2~3D。近来的大发现主要还是在渐新统-中新统浊积岩中。在墨西哥湾也因陆坡推进具有类似的特征,在湾岸和浅水区,储层从上侏罗统一直到中新统,而深水区则主要是上新统-更新统浊积岩作为主要储层。而且上新统-更新统储层由于处于低地温,成岩作用弱,砂岩有极好的物性,孔隙度大于 30%,渗透率  $(50\sim 1350) \times 10^{-3} \text{Lm}^2$ ,最高可达  $30000 \times 10^{-3} \text{Lm}^2$ ,80% 的砂岩渗透率大于  $100 \times 10^{-3} \text{Lm}^2$ 。近些年在下刚果盆地安哥拉的深水勘探也主要集中在中新统浊积岩储层<sup>[15]</sup>。值得强调的是,这些深水浊积体系与大型三角洲的发育及海平面的变化引起陆坡的推进密切相关。

### 2.4 深水区的圈闭

在大西洋两边富产油气盆地最典型的构造特征是发育在早白垩世 Aptian 期蒸发岩之上的薄皮拉伸构造及深水区的盐构造作用。由超深水区的薄皮逆冲构造形成的圈闭类型在浅水区主要以断陷期形成的古潜山、披覆背斜、掀斜断块等,而在深水、超深水区则以热沉降期形成的盐塑性运动或滑脱运动形成的各类圈闭为主,如龟背斜、滚动构造、盐岩构造以及三角洲砂体或浊积砂体形成的岩性和复合圈闭等<sup>[5,6,16-20]</sup>。墨西哥湾盆地的圈闭类型与上述圈闭类型相似,但在深水、超深水地区圈闭类型以盐岩构造与浊积砂体形成的复合圈闭为主。盐岩群构造控制一些小盆地和海底地貌,并在一定时间内、一定程度上控制浊积砂体的分布。在尼日尔三角洲的深水区,逆冲断层带的发育形成了一些挤压背斜及尖灭、上超等地层岩性圈闭。另外泥岩群的活动也造就了一些底辟构造。

### 2.5 深水区油气成藏模式

由于在不同地区的深水区生储盖条件及圈闭条件的不同,造成了油气成藏模式的不同。

在巴西坎波斯盆地,裂陷期烃源岩有机质丰度高,成熟度适中,而裂后热沉降期的泥页岩成熟度低,因而前者是油气的主要贡献者。但是由于盆地深水区的储层以上白垩统尤其是渐新统以来的浊积岩为主,其间隔了一层巨厚封闭性能很好的蒸发盐、浅水碳酸盐岩和海相泥岩。因此沟通二者的油气运移

通道就显得十分重要。幸运的是由于盐底辟和晚期断层活动,使油气可通过断层向上运移至圈闭内。

在西非的下刚果等盆地,除了断陷期烃源岩起主要作用外,裂后沉降期的烃源岩也有一定作用,因而储盖条件和圈闭类型以及成藏模式与坎波斯盆地类似。对裂后相层序的圈闭来说还可能存在自生自储的成藏模式。

在墨西哥湾深水区,由于盐丘的形成,烃类可以通过盐丘壁及伴生的同生断层,自下部的烃源岩向上运移至与盐丘相关的构造圈闭或复合圈闭里的上新世-更新统储层中来。而盐丘活动造成了一个个具分割性质的小盆地(Minibasins),烃类运移也受这种小盆地的地形控制。在尼日尔三角洲的深水区,陆源有机质形成的烃类可通过泥底辟、泥火山或断层运移至浅层圈闭内。

### 3 南海深水区油气成藏的地质条件

#### 3.1 南海北部陆坡深水油气成藏条件

南海是自中生代以来一直受欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块三大板块相互作用形成的边缘海盆。近年来针对南海盆地的构造演化做了大量的研究工作<sup>[21-24]</sup>,普遍认为南海北部是一个准被动大陆边缘<sup>[23]</sup>。

南海北部构造演化可划分4个阶段:

(1) 裂陷前阶段。即中生代构造陆相挤压盆地,以陆相沉积为主,出现几次海侵。根据钻井资料,新生代之下发育2套海相地层。与广东沿海地面地质和澎湖、北港、台西南盆地钻井资料对比,认为是晚三叠世-早侏罗世、晚侏罗世-早白垩世海相地层。从地震资料看,在潮汕凹陷中生代地层以大型三角洲前缘相为特征,并发育晚三叠世-早侏罗世大型推覆构造。从火山岩分布来看,中生代的花岗岩广泛出现,与俯冲挤压背景有关<sup>[25]</sup>。但晚白垩世出现裂陷背景下的玄武岩火山作用<sup>[26]</sup>。

(2) 伸展裂陷阶段(发生在古新世-中始新世)。南海北部形成一系列沉积盆地,如珠江口盆地、琼东南盆地、潮汕盆地等,发育巨厚的河流三角洲为主,夹有滨浅海相的陆相盆地,是南海北部沉积盆地最重要的生油岩<sup>[27]</sup>。

(3) 海底扩张阶段(晚始新世-渐新世)。南海发生海底扩张,形成中央海盆玄武岩。在南海北部,分割性的断陷盆地连成大中型的拗陷盆地,巨厚的海相沉积广泛发育,盆地走向以NE-NEE向为主。

(4) 热沉降阶段。为陆坡区构造发育晚期,分割

性的断陷盆地连成大中型的拗陷盆地。

北部深水区的烃源岩主要是裂陷期陆相地层为主的烃源岩。在琼东南盆地主要是始新世崖城组滨海沼泽相(有机碳含量118%~3117%)和渐新世陵水组海相灰岩、泥岩(有机碳含量0146%~0152%),为 $\alpha$ 型干酪根。白云凹陷和潮汕拗陷始新世文昌组有机碳1121%~2120%,为 $\beta$ - $\gamma$ 型干酪根;始新世恩平组河流沼泽相生油岩有机碳含量1130%~2145%,仅次于文昌组,生油岩为 $\alpha$ - $\beta$ 型干酪根;渐新世珠海组三角洲-滨海泻湖相沉积有机碳含量0184%~1143%,以 $\alpha$ 型干酪根为主<sup>[27]</sup>。

南海北部储层主要是裂陷期沉积地层,包括湖相、河流相、滨海相砂岩,以海底扩张阶段的滨海相砂岩、灰岩和低水位域浊积砂岩为主。其中浊积岩和滨海相砂岩都是深水油气的良好储层,具有巨大的储油气能力<sup>[7]</sup>。主要盖层是中新统珠江组中上部陆架和三角洲泥岩系、上新统和第四系高位体系域的泥岩。

南海北部北坡区早第三纪断裂活动强烈,沿断裂带形成了一系列背斜、断鼻、断块等构造圈闭。这些圈闭规模大、成带分布。晚第三系以岩性圈闭为主,由盆地扇、斜坡扇浊积砂体被其侧向和垂向半深海相泥岩包围形成;这类圈闭有的面积超过200 km<sup>2</sup>,且埋藏浅,是琼东南盆地中央拗陷带和珠江口盆地珠二拗陷的重要勘探目标。

中渐新世南海发生了近南北向的海底扩张,使中央海盆扩张,中央海盆形成。晚第三纪以来,随着南海扩张作用加剧,南海北部陆缘表现出典型的离散型大陆边缘特征,早期的断陷盆地转化为拗陷盆地。南海北部的构造圈闭也是断陷盆地广泛出现的同沉积背斜、重力滑动背斜、底水位扇砂体。

南海北部陆缘盆地深水区位于琼东南盆地中央拗陷带和珠江口盆地珠二拗陷。这2个盆地都经历了裂陷以及裂后两大发育过程。南海北部陆缘盆地深水区具有良好的石油地质条件;发育始新统一渐新统湖相泥岩和渐新统半封闭浅海相泥岩2套主要烃源岩;存在始新统一渐新统河流三角洲相砂岩、上渐新统一中新统扇三角洲、滨浅海相砂岩和台地碳酸盐岩以及中新统半深海—深海相浊积砂岩等3套主要储层,其中中新统半深海—深海相浊积砂岩储层是深水区最有潜力的勘探目的层;发育多种类型的圈闭,从层位上看,下第三系以构造圈闭为主,而上第三系则以岩性圈闭为主发育大量油源断层、多个不整合面和大面积连通砂体,构成了良好的

油气输导体系,有利于油气聚集成藏。与国外已有油气发现的陆缘盆地深水区相比,南海北部陆缘盆地深水区具有相似的构造、沉积演化特征和相应的成藏模式<sup>[26]</sup>。

### 312 西北巴拉望盆地深水油气成藏的地质条件

西北巴拉望盆地位于南海的东南部。该地区的深水钻探始于1981年4月,由Cities Service公司在320 m水深的地方钻了Gabc21井,尽管未钻到先前解释的尼多(Nido)礁灰岩,但在下中新统浊积砂岩层序中试出了油。随后的South Gabc21井产出了天然气和凝析油。1983年以后,该区的钻探活动变得断断续续。直到1989年Occidental在Camago21井尼多灰岩中发现厚层天然气和凝析油储层,掀起该盆地油气勘探热潮。Camago21井的水深为73518 m。随后又有West Linaapacan21和Malampaya井2个深水井在尼多灰岩中发现了油气。前者由Alcorn公司1990年钻探,水深348 m;后者由ShellOxy公司在1991年钻探,水深837 m。在CamagoMalampaya油气田已钻了5口井,报道的可采储量天然气为215亿ft<sup>3</sup>,凝析油85百万桶。目前该油气田已完成建设,今年10月份已为发电厂供气,明年元月份可对外输送商业天然气。该项目上游投资20亿美元,总投资45亿美元。

西北巴拉望盆地的演化与南海的形成密切相关。巴拉望岛西部大部分地区在中生界末以前一直是中国大陆的一部分<sup>[23]</sup>。在晚白垩世到早中新世时裂陷开始,随后由于南海的扩张而使其向南飘移。在中中新世,这个裂解的大陆边缘与菲律宾岛弧碰撞后,直至它现在占据的位置。该盆地地层上可分为裂前层序、裂谷层序及飘移层序。裂前层序为中下二叠统变质岩和上二叠统灰岩及中三叠统燧石与粉砂岩、页岩互层,侏罗系到下白垩统为边缘海相-陆相的灰岩、页岩、粉砂岩、砂岩、火山岩和变质岩。上白垩统缺失。裂谷层序为古新统-始新统,它们沉积在亚洲大陆中生代裂陷形成的半地堑中,少数井钻遇的岩性为页岩、碳质页岩、煤、灰质泥岩,沉积环境为外浅海到近海。在Malampaya21钻遇陆相的始新统地层,说明在一些地堑中存在非海相的地层。晚始新世沉积环境从先前的细粒盆地沉积变为海岸到近海石英砂岩,并与下伏地层不整合接触。飘移层序为被动边缘环境下的沉积,局部因古地形的关系,水深可从深海到滨海,自下到上有上渐新统-下中新统尼

多灰岩、下中新统Pagasa组、中-上中新统Matinloc组、上新统-更新统Carcar组。尼多灰岩由台地碳酸盐、礁灰岩和深水碳酸岩组成。Pagasa组可分上下2段,上段为中中新统,下段为下中新统,岩性主要为深海环境中沉积的泥岩,但区域上有3套砂岩夹于其中,即中中新统的Esperanza砂岩,下中新统的Batas砾岩和Gabc碎屑单元。Gabc碎屑单元由几个上变细旋回的砂岩单元所组成成为浊积扇复合体的沉积。Matinloc组基本上是由多成分砾石所组成,上部没有明显的基质,下部可见有泥质基质。砾石由杂色石英砾屑、粉砂岩、暗绿色岩石碎块偶含方解石和页岩碎块所组成。剖面下部常有厚约6 m的砂岩段为标志,砂岩白到浅灰,细粒,次圆,方解石胶结。Carcar组主要由灰岩组成,向深水区可渐变为泥灰质和泥质灰岩。

该区的石油比重为27~54 API,具有低碳优势指数(CPI)和低的姥植比,指示源岩为还原环境。同时油的硫含量变化大,说明(据GCMS分析)含有一定量的陆源高等植物成分输入。对油的分析表明,至少有3种源岩的贡献,这些源岩的环境有局限海相碳酸盐、缺氧的海相页岩、河流-三角洲和湖相。源岩分析表明下中新统Pagasa组有机质贫乏,干酪根类型为I、II型,因而是偏向生气的源岩;下中新统尼多灰岩也普遍缺乏有机质,但部分剖面含有大量的藻类碎屑,因而可作为偏向生油的源岩。West Linaapacan油田的地化分析表明深水尼多灰岩可能是该油田的油源。目前从地质学上看始新统和古新统前尼多灰岩层系是西北巴拉望盆地的最可能的油气源岩。在Cadiao21井,始新统剖面具有3114%~62188%(煤)的有机质含量,但干酪根类型为I、II型,代表偏生气类型。

最近在民都洛(Mindoro)地区的地球化学研究中,发现沉积在断陷环境中的中晚始新统页岩具有好的混合产油、气潜力。本区5口井的地温梯度平均为218 °C/100 m,范围为2124~3128 °C/100 m,前第三系地温梯度3196 °C/100 m。

本区的储层以尼多灰岩为主,还有下中新统Gabc碎屑单元的浊积砂岩、中中新统Esperanza砂岩及始新统砂岩。对于渐新统和中中新统储层来说下-中中新统Pagasa组是盖层,对于始新统储层来说,组内的泥岩是作为盖层的。尼多礁灰岩是本区主

要的勘探目标,其孔隙度平均18%,最高可达34%,渗透率高达2~7D;尼多台地灰岩的孔隙度13%~29%,平均17%;浊积碳酸盐岩只发现于地堑的深部位,通常孔隙度小于10%。Gala碎屑单元中的浊积砂岩孔隙度12%~18%,Gabc和Oton油气田就从这砂岩中产出油气。在Gabc地区,测得的渗透率35~90mD。在Oton地区,测得的渗透率42~252mD。次要的储层像下-中中新统Pagasa组内的Batas砂岩段,尽管无重要发现,但因孔隙度达10%~20%,具有储集潜力。始新统砂岩是本区第四位的储层。在San Martin A 2IX井,这种砂岩孔隙度从3%~21%,平均11%;在民都洛陆上始新统露头中,这种砂岩孔隙度7%~20%,渗透率达225mD。

西北巴拉望盆地主要有3类圈闭:晚渐新统-早中新统礁灰岩,深水裂缝型碳酸盐岩构造,浊积砂岩。

这里的成藏模式是断陷中烃源岩生成的烃类通过断层或边缘相砂体向侧上方运移,进入两侧受古地形控制的高地上所形成的礁灰岩中或进入受挤压影响的裂隙型碳酸盐岩背斜构造或之上的浊积砂岩体中。Nido灰岩中的烃源岩的贡献程度不一定通过侧向运移进入这些为上覆泥岩覆盖的圈闭之中并聚集起来,平面上油气运移途径也受构造脊控制,在一个脊中的多个圈闭遵循充满-溢出规律。

## 4 南海深水油气资源勘探开发问题与讨论

### 4.11 区域地质条件研究问题

区域地质研究贯穿勘探选区和以后的整个勘探过程中,必须重视区域地质条件(构造和沉积)的研究。例如在20世纪90年代初,西非的深水勘探尚未广泛开展,就有不少石油地质学家把西非的地质与南美洲东部海域的地质条件进行类比研究,指出了西非早白垩世Aptian期盐盆和南美东部的坎波斯盆地二者间大地构造的关联性及石油地质条件的相似性,具有良好的深水油气勘探前景,而西北非则与美国东海岸一样,油气勘探潜力就差一点<sup>[13]</sup>。另外还把这些盆地的深水区与浅水区相类比,其中有些地质因素是相似的,如烃源岩;但也有不相似之处,如深水区的浊积岩储层、构造类型等与浅水区不同。以上这些研究结论大大推动了这些盆地的深水勘探。在深水勘探过程中,对区域地质研究也不能

放松,如根据深水招标区块新采集的地震资料对西非和尼日尔三角洲深水区构造样式的研究<sup>[5]</sup>,和对盐、泥构造的形成机理的大量研究<sup>[5,6,15,16,18~20]</sup>以及对深水勘探区的浊积岩、海底扇的研究<sup>[15]</sup>,这些研究对扩大深水勘探的成果并向邻区扩展起到了积极作用。

通过对上述大西洋两侧盆地与南海2个主要深水盆地石油地质条件的对比,我们发现对盐层和大型河流三角洲的研究十分重要。前者的后期活动产生了许多圈闭和断层,造成了油气向上运移的通道和聚集场所;后者造成了沉积的快速堆积和向前推进。这样,一方面使得大量陆源有机质快速保存下来,有利于裂后期优质烃源岩发育和烃源岩成熟,另一方面还有利于良好的三角洲储层、盖层和浊积岩的发育。

### 4.12 新技术、新方法的应用问题

在这方面首先是地震属性的提取已经有了成功的案例。如利用振幅信息和AVO等直接烃类指示(DHI)检测技术在墨西哥湾<sup>[28]</sup>和尼日尔三角洲取得了重要发现<sup>[29]</sup>。再如应用三维可视化技术等了解储层的变化,特别是对于浊积砂体做储层油气田的勘探开发十分重要。东赤道几内亚海上18区块内Zafiro油田(储量大于3亿桶)于1995年3月发现,1996年8月25日很快投产,就是得益于三维资料能够提供足够的时、空分辨率和三维可视化分析技术掌握了储层变化。此外,对于底辟等复杂构造,采用叠前深度偏移(PSDM)和射线追踪处理技术可以得到高清晰成像效果。近年来还兴起了一种新的地震方法即随钻地震(Seismic while drilling, SWD),它可提前预测钻头下地层及孔隙压力。以上新技术都有广阔的应用前景。

### 4.13 南海深水油气勘探开发前景问题

南海有含油气构造200多个,油气田180多个。南海北部含油气盆地主要有北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地等。在南海南部主要有曾母盆地、万安盆地、文莱—沙巴盆地、礼乐滩盆地、西北巴拉望盆地、南薇盆地、安渡滩盆地等。经初步估计,整个南海的石油地质储量大致在230~300亿t之间,约占我国石油总资源量的1/3,有“第二个波斯湾”之称。现在南沙海域油井已超过1000口,每年开采的石油超过5000万t,超过

了大庆一年的产量。但是南海水深一般在 500~2 000 m, 属于深水作业区。因此, 我国目前迫切需要发展深海油气的勘探和开发技术。

目前, 在国家的高度重视和大力支持下, 我国南海深海油气开发已陆续开展起来。中石油已获批准在南中国海 12 万 km<sup>2</sup> 的海域勘探和开发油气资源, 为此中石油以辽河油田和大港油田为基地成立了海洋石油公司。中海油也已获批准在南中国海 7 万多平方公里的海域勘探和开发油气资源, 并且已有 8 个区块开始向全球招商, 积极寻求外部合作; 另外, 其子公司中海油服股份公司也投入巨资积极准备建造 1 500 m 水深作业的半潜式平台。

#### 参考文献:

- [1] Pinder D. Offshore oil and gas: Global resource knowledge and technological change[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(9210): 5762600
- [2] Johansen R H, Cooper C. Deep spillfield study of a simulated oil and gas blowout in deep water[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2003, 8(526): 4332443
- [3] Deluca M. Deep discoveries keep West Africa at global forefront[J]. *Offshore*, 1999, (2): 32233
- [4] Gaddy D E. Deep water drilling steady over past 4 years[J]. *Oil & Gas Journal*, 2000, (6): 802854
- [5] Akanni F. Structural styles in deep offshore West Africa: Deepwater geology not extension of inshore basins[J]. *Offshore*, 1998, (3): 80284
- [6] Cardador M H, Cuevas A L, Watanabe H, *et al* Experimental evaluation of hydrocarbon detection with the Long Offset time domain electromagnetic Method in the Cretaceous carbonates of the Tampico-Misantla basin, Mexico [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 52(223): 1032122
- [7] Pettingill H S, Weimer P. Worldwide deepwater exploration and production: Past, present, and future[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(4): 3712376
- [8] Yapa P D, Zheng L, Chen F. A model for Deepwater Oil & Gas Blowouts[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 43(72): 2342241
- [9] Regg J. Deepwater gulf of Mexico and the MMS[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 5092510
- [10] 金春爽, 乔德武, 姜春艳. 国内外深水油气勘探新进展[J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(10): 20223
- [11] 娄承. 世界深水油气勘探发展前景[J]. *国际石油经济*, 2003, 11(8): 43244
- [12] Ochoa O O, Salama M M. Offshore composites: Transition barriers to an enabling technology[J]. *Composites Science and Technology*, Corrected Proof, Available online, 2005, 12(6): 129
- [13] Khain V E, Polakova I D. Oil and gas potential of deep and ultra-deep water zones of continental margins[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2004, 39(6): 6102621
- [14] Santamaría-Drozdo, Horsfield B, di Primio R, *et al* Influence of maturity on distributions of benzene and dibenzothiophenes in Tithonian source rocks and crude oils, Sonda de Campeche, Mexico [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(728): 4232439
- [15] Anderson J E. Controls on turbidite sand deposition during gravity-driven extension of a passive margin: Examples from Miocene sediments in Block 4, Angola [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(10): 116521203
- [16] Vendeville B C, Jackson M P A. The rise of diapirs during thin-skinned extension[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9: 3312371
- [17] Porebski J S, Steel R J. Shelf margin deltas: Their stratigraphic significance and relation to deepwater sands[J]. *Earth Science Reviews*, 2003, 62(324): 2832326
- [18] Duval B. Raft tectonics in the Kwanza Basin, Angola [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9: 3892404
- [19] Lundin E R. Thin-skinned extensional tectonics on a salt detachment, Northern Kwanza basin, Angola [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9: 4052411
- [20] Mauduit T. On the asymmetry of turtle-back growth anticlines[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14: 7632771
- [21] Talyor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin [A]. Hayes D E. *The Tectonic and Geologic Evolution of the South East Asian Seas and Islands Part 1*. Geophysical Monograph [C]. Washington AGU, 1983: 23256
- [22] Briaux A, Patriat P, Tapponier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the tertiary tectonics of southeast Asian [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 629926328
- [23] 姚伯初, 曾维军. 中美合作调研南海地质专报(GM SCS) [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 1662178
- [24] 何家雄, 夏斌, 张启明, 等. 南海北部边缘盆地生物气与生物气资源潜力与勘探前景分析[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 1672174
- [25] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 2692287
- [26] Li X. Cretaceous magmatism and lithosphere extension in SE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 2932305
- [27] 刘铁树, 何仕斌. 南海北部陆缘盆地深水油气勘探前景[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(3): 1642170
- [28] 洪菲, 胡天跃. 深海油气地震勘探进展和展望[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 2302236
- [29] Stephens A R. The relevance of seismic amplitudes in exploring the Niger Delta [J]. *Offshore*, 1996, 10: 54260

(下转第 714 页)

(3) 生物礁的发育与分布受到当时海平面升降的影响和古地理环境的控制

#### 参考文献:

- [1] 叶俭, 杨友运, 许安东, 等. 陕南早寒武世生物礁[A]. 范嘉松. 中国生物礁与油气[C]. 北京: 海洋出版社, 1996
- [2] 刘学利. 大巴山、米仓山南缘早古生代礁滩发育特征及分布规律研究[D]. 西南石油学院, 2000
- [3] 张廷山, 沈昭国, 兰光志, 等. 四川盆地早古生代灰泥丘中的微

生物及其造岩和成丘作用[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 2432-248

- [4] 黄世伟, 张廷山, 谢刚平, 等. 赤水地区上三叠统须家河组沉积特征[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 487-491.
- [5] Peters K E, Moldovan J M. 生物标记化合物指南——古代沉积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜刀煌, 张水昌, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1995. 822-149.
- [6] 蒲心纯, 叶红专. 中国南方寒武纪岩相古地理[A]. 岩相古地理文集[C]. 北京: 地质出版社, 1991.

## EARLY CAMBRIAN REEFS AND BANKS DEVELOPMENT IN SOUTHERN MARGIN OF DABA M t AND M icang M t

ZHANG Ting2shan, LAN Guang2zhi, SHEN Zhao2guo, WANG Shun2yu, JIANG Zhao2yong  
(Southwest Petroleum Institute, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** In the Early Cambrian, the southern margin of Daba M t and M icang M t located at the northern margin of Upper Yangze Platform. The reefs and banks which developed at the margin of carbonate platform, distributed in the area of Nanzheng, Xixiang, Zhengba, Ziyang of Sanxi province and nanjiang of Sichuan. The reefs and banks include cyanobacteria Archaeocyathus reefs, thrombolite micrite mounds, oncolite biostromes and bioclastic & oolitic banks. The reef building organisms have Archaeocyathus, cyanobacteria. And the biomarkers analyses are also proved that the microbial materials are in mud mounds. The reef living organisms have brachiopoda, trilobite, crinoida, sponge. Because of the sea level change and paleogeographic environment control, the reefs and banks show the cycle sequence, and migrate upper in sequence from the west to the east.

**Key words:** Reef & bank; Development; Early Cambrian; Southern margin of Daba M t and M icang M t

(上接第699页)

## ADVANCE OF EXPLORATION AND PETROLEUM GEOLOGICAL FEATURES OF DEEP-WATER HYDROCARBON IN THE WORLD

WU Shi2guo<sup>1</sup>, YUAN Sheng2qiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2 The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Exploration in deep water hydrocarbon has a fast increase in the world. The water depth for drilling well arrived to 3 050 m in 2004. Three giant China oil companies (CNPC, CNOOC, SINOPEC) launch the oil exploration in the deep water region of the South China Sea (SCS). According to the discoveries in the world, all of them are distributed in the passive continental margin. Three giant sedimentary sequences have been deposited in the basin, those are pro-rifting, rifting and breakup sedimentary sequences. Source rocks are lacustrine and shore facies, as well as after-rifting drift marine limestone and shale. The reservoirs are characterized by the deep water turbidite sandstones, and rifting sandstone. The hydrocarbon reservoirs preserved in the various trap in the rifting basin, and some unique deep water turbidite sandstone, and diapir structures. By the geological analysis of the two deep water regions in the SCS, the same petroleum geological features and richful hydrocarbon exist in the SCS.

**Key words:** Deep water hydrocarbon; Petroleum geological feature; Passive continental margin; South China Sea