

# 深海扇油气勘探综述

李大伟<sup>1</sup> 李德生<sup>1</sup> 陈长民<sup>2</sup> 黄慧鹏<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司; 3. 辽河油田勘探开发研究院)

**摘要** 深海扇是在大陆坡海底峡谷前缘,由陆源碎屑物经浊流作用通过海底峡谷搬运至洋底堆积而成的扇形或锥形沉积体,一般可分为上部扇、中部扇、下部扇等单元。深海扇的沉积作用主要受地质构造、地形地貌、海平面变化、物源区的气候等因素的控制。世界许多大河口外都发育有大型深海扇,其中最大的为孟加拉深海扇。深海扇蕴藏着丰富的油气资源。上世纪90年代以来,随着世界对能源需求的增加、陆地和浅海区油气发现难度的增大及海洋工程技术的进步,深水勘探逐渐成为热点。深海扇和相关油气藏可能成为今后几十年油气勘探开发的最前沿。目前,国际上深海扇油气勘探已取得空前成功,已有60多个国家进行了深水油气勘探,但在我国尚属新的勘探领域。南中国海可能发育诸多具良好油气勘探前景的深海扇,目前已在珠江口盆地白云凹陷深水区发现荔湾3-1气田。由于沉积成因机理和油气成藏规律的特殊性,深海扇油气勘探与陆地及浅海区的油气勘探有着显著差异。深海勘探被认为是21世纪科学、技术和环境面临的主要挑战之一,诸多理论和技术问题尚待进一步研究和解决。

**关键词** 深海扇 油气 勘探 南中国海 荔湾3-1 前景

## 1 深海扇的基本概念、形态特征及分类

深海扇是在大陆坡海底峡谷前缘,由陆源碎屑物经浊流作用通过海底峡谷搬运至洋底堆积而成的扇形或锥形沉积体,它以海平面下降的低位时期所形成的低位扇(包括盆底扇、斜坡扇、低位楔状体)为主(图1)。相邻的深海扇可连结成大陆隆,而其沉积物也可能被海流携带,使大陆隆沿大陆坡的基部

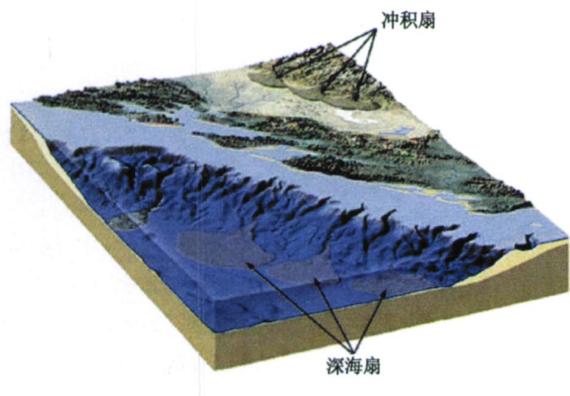


图1 深海扇示意图(转引自朱筱敏,2005)

向远离深海扇的海域延伸。世界许多大河口外均发育有大型深海扇。

关于深海(或深水)的定义,过去一般把水深200~300m的海域称为半深海,水深300~6000m的海域称为深海,而将水深6000m以上的海沟称为超深海。2002年世界石油大会对海洋勘探开发水深的划分是:400m以内为常规水深,400~1500m为深水,1500m以上为超深水。我们认为,深海(或深水)是一个相对的、动态的概念,它会随着勘探和技术的进步而有所变化。迄今能获得经济效益的深水勘探最大深度已接近2000m。

深海扇一般可分为上、中、下部扇等3个单元<sup>[1]</sup>(图2)。上部扇扇体上表面在(横)剖面呈凹形,坡度较陡,约1/100,表面有一条深切的沟谷。中部扇扇体上表面在(横)剖面上呈凸形,坡度较缓,约1/500,为放射形沉积最厚的隆起部分,又称叠覆扇。下部扇扇体上表面在(横)剖面上也呈凹形,坡度极缓,约1/1000,表面微有起伏,发育许多辫状宽浅谷系。此外,深海扇可能还发育有末端扇缘,末端扇缘与

第一作者简介:李大伟,男,高级工程师,1996年毕业于中国地质大学(北京)能源系,获工学博士学位,现在中国石油勘探开发研究院工作,主要研究方向为油藏描述、油气运移、盆地分析模拟及相关软件的设计和开发。地址:北京市910信箱计算所油藏室(邮政编码:100083)。电话:010-62098179。E-mail:leedw@petrochina.com.cn。

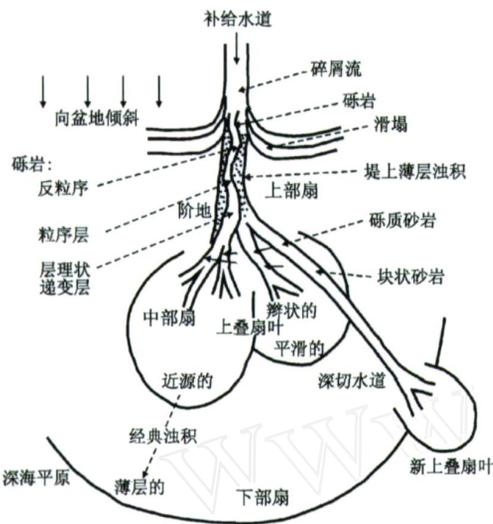


图 2 经典深海扇模式图(据 Walker, 1978, 修改)

深海平原相接,表面被一些窄小的缓斜沟谷所切割。

深海扇表面多沟谷且相互交织,扇体长可达 2 000 km,沉积层厚几十米至十多千米,其前缘水深可达 8 000 m(如美国加利福尼亚岸外蒙特里深海扇)。深海扇上具有“V”形或槽形峡谷,其两壁最高可达 183 m。

在深海扇类型划分方面,不同学者有着不同的分类依据。Shanmugam<sup>[2]</sup>把深海扇分为细粒的延长扇和粗粒的发散形扇。Reading 等<sup>[3]</sup>根据深海扇沉积物供应方式(点源、多源和线源)和沉积物的粒度把深海扇细分为 12 种类型。Richards 等<sup>[4]</sup>主张从沉积物源、沉积类型、沉积物供应速率、海平面变化和区域构造作用等方面来分析深水碎屑沉积系统。此外,按沉积地形形态,深海扇可划分为扇形、水道形等类型。

## 2 深海扇的沉积特征

无论在几何形态、沉积物类型、结构、砂体空间分布、成岩作用等方面,深海扇沉积与浅水扇和深湖盆底扇沉积都有很大差异。

在几何形态上,深海扇沉积可呈现盆底扇、斜坡扇、斜坡裙、进积楔、朵叶、水道充填、深切谷充填、席状体等及其复合体和纵向上的叠置产物,具有类型众多、形态各异特征。

深海扇沉积物主要有以下 4 类。碎屑流堆积:发育于峡谷出口和上部扇的沟谷中,为杂乱的砂砾,分选差。液化流或粒屑流堆积:主要发育于上

部扇的沟谷中,含少量砂砾,分选较好。浊流层:从高流态浊流中沉积下来的物质发育于中、下部扇的沟谷中;从低流态浊流中沉积下来的物质发育于扇谷的内部和外侧。许多深海扇中的砂体被认为是沉积物重力流沉积。半远洋沉积:主要是陆源泥砂和生物源物质,分布于扇谷间、下部扇和扇缘。从沉积物粒径分布看,扇谷内的沉积物颗粒较粗,扇谷间颗粒较细。

深海扇沉积物中常含有植物和浅海生物残骸,它们是浊流从大陆边缘搬运而来的。物源主要来自于克拉通稳定地块,经成熟度高的大河系统搬运而沉积于年轻的三角洲体系下倾方向的深水区。

Skene 证实深海扇的整体形态遵循相对简单的比例关系。大型浊流沉积的扇体发育较大的扇谷、天然堤和垛体。由海滩(一般通过峡谷)或礁缘过程供给的扇,因沉积物的输送速率较低,其沉积厚度和面积较小<sup>[5]</sup>。

## 3 深海扇成因简述

关于深海扇成因研究,早在 1885 年 Forel<sup>[6]</sup>就提出了深水浊流的概念。1962 年, A. H. Bouma 总结出了浊流的层序特征(即著名的“鲍马序列”<sup>[7]</sup>)。上世纪 70 年代, Vail 等<sup>[8]</sup>发现了全球海平面周期性变化的规律性,为深海扇沉积找到了合理解释。通过不断探索,对深海扇的成因机制和油气成藏规律的认识已经逐步得到深化。尽管如此,目前国际上对深海扇的成因、沉积物性质、类型、预测方法技术等仍存在争议<sup>[9]</sup>。

一般认为,深海扇的沉积作用受地质构造、地貌、陆架斜坡区的宽度和坡度、盆地的大小、海平面变化、块体运动、大洋深层环流、物源区的气候特征和植被情况、生物活动、陆架斜坡区与物源区之间的距离等因素的控制。深海扇的面积、厚度和形态主要与沉积物的数量有关,此外被供给的沉积物类型、区域构造和地理环境也对扇体类型的发育起着控制作用。海平面的低水位有利于深海扇的发育。山系和物源区抬升、剥蚀速率增大会导致深海扇沉积速率加快(孟加拉深海扇的快速生长就与喜马拉雅山脉的强烈抬升有关)。在形成机制上,它们可能由浊积流、碎屑流、等深流、滑动流、崩塌流和密度流等深水沉积过程形成。深海扇,特别是大型深海扇,一般都是由河流通过三角洲供给的。

随着对海洋资源勘探力度的加大,尤其是深水领域勘探的不断深入,有关深海扇成因及成藏机理的研究会不断完善,并最终为深海油气勘探开发提供理论和决策依据。

## 4 深海扇研究方法

如前所述,对深海扇相关理论的研究由来已久。近十几年来,深海扇研究方法已成为许多学术研究的重要议题。Reynolds 认为<sup>[10]</sup>,在发现和评价阶段,通常难以根据二维和三维地震勘探来确定深海扇分布及储集层的详细特征。在这种资料缺乏的情况下,可以采用类比法来进行初步分析。根据经验选择正确的类比分析方法,并结合地震相和层序地层解释,可以取得良好效果。在深海扇勘探早期,利用扇体面积和体积等要素的测量数据与已知深海扇进行精确的比较,有助于指明类比方向,并预测深海扇的砂体积和纯砂与总扇体积比等重要的未知量。

由于深海钻井的高成本,地震勘探是公认的海洋探测和资源勘探最重要的技术手段和资料来源。混合地震反演技术、似地震反射面勘探技术、区域多次二维叠前深度偏移技术、近偏移距压制多次波、永久检波器排列、钻探成像、实时深度成像、多分量成像、海底检波器随地形排列等都是近十几年来不断发展起来的勘探新技术、新方法<sup>[11]</sup>。以成藏动力学理论和层序地层学理论为指导,结合高分辨率地震、盆地分析模拟等先进的油气勘探技术开展深海扇的系统研究,将会极大地推动深水领域的油气勘探。

层序地层学理论的提出和高分辨率地震技术的发展和运用使深水油气勘探成为可能<sup>[12-14]</sup>。现今海洋深部地震勘探技术的穿透能力一般为 4 000 ~ 6 000 m (约 3.5 s)。高分辨率地震剖面能够提供水下扇上部几十米的内部结构特征,并且可以与陆地上的地层剖面作对比。近 10 年来,应用层序地层学理论在全球深水勘探中取得了巨大成功。高分辨率地震技术和深海钻探项目(DSDP)、大洋钻探项目(ODP)为综合研究深海扇提供了新的数据。全球定位系统(GPS)和多道测深绘图系统提供了深海扇的表面形态和坡度的高精度信息。

深海扇油气勘探的成功促使海洋工程技术突飞猛进,而深海勘探开发用材、海洋平台、深海钻探和油气开发等技术的日趋完善反过来也为深海扇油气

勘探提供了必要条件,从而使我们研究深海扇的能力有了革命性的飞跃。

迄今为止,海洋油气钻井工作水深的最高记录为 2 964 m,是 2001 年美国联合石油公司在墨西哥湾创造的;海洋油气勘探钻井深度垂深记录为 9 210 m,是 2002 年美国谢夫隆公司在 Green 峡谷创造的;海洋采油井最深为 7 088.73 m,是 2001 年美国壳牌近海石油公司在外陆架花园礁创造的;海底采油水深纪录为 2 196 m,是 2002 年美国马拉松石油公司在新奥尔良东南海域创造的。

然而,深海扇研究至今仍停留在定性阶段,定量分析还很少。随着高性能计算机在石油工业的广泛应用,以及地震采集处理解释、盆地分析模拟、油气藏描述等相关技术的不断进步,对深海扇的研究势必由定性向定量方向发展。

## 5 深海扇的研究内容和实际意义

无论是从其作为石油储层方面,还是从油气开采期供水方面来看,深海扇的规模、几何形态、砂体的体积和连通性等都是油气地质学研究的重要问题。深海扇研究的主要目标可能是深水被动边缘盆地,以及那些具有充足烃源岩补给潜力的深水体系。具有良好烃源岩的深水盆地是未来勘探的最有利地区,因此对深水源岩的研究非常重要。

全球海洋平均水深为 3 730 m,水深在 200 ~ 6 000 m 区域面积已超过海洋总面积的 90%,0 ~ 200 m 水深的大陆架仅占海洋总面积的 7.49%。海洋油气资源占海洋资源总产值的一半以上,海洋是世界未来油气勘探开发的主战场。上世纪 90 年代以来,随着世界对能源需求的增加、陆地和浅海区油气发现难度的增大以及海洋工程技术的进步,深水勘探逐渐成为热点并已取得空前成功。迄今已有 60 多个国家进行了深海油气勘探,但深水勘探在我国尚属新的勘探领域。鉴于陆上油气资源的严峻形势,我国油气资源勘探开发转向海洋尤其是转向深海已成必然趋势。

我国有近 300 万 km<sup>2</sup> 的管辖海域,包括渤海湾盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、东海陆架盆地、南海诸盆地等 30 多个新生代沉积盆地,具有面积非常广阔的深水勘探领域。除南海诸盆地海水深度多大于 500 m 外,我国近海主要含油气沉积盆地的海水深度一般都小于 500 m。我国近海盆地新生代沉

积厚度普遍较大(如东海陆架盆地最厚处可达 14 000~15 000 m),而这些沉积盆地的地质构造一般比较复杂。

我国海洋石油工业开始于上世纪 60 年代末期,最早的海洋石油开发起步于渤海湾地区。我国海上油气勘探主要集中于渤海、黄海、东海及南海北部大陆架。除南黄海以外,其它各个沉积盆地的新生代地层均有工业油气流发现。据国务院 2003 年 5 月颁布的《全国海洋经济发展规划纲要》,我国近海石油资源量约 240 亿 t。

40 多年来,特别是一期海洋 863 计划实施以来,我国海洋地质调查已经开展了许多工作(主要是在渤海湾盆地海域及东海盆地),海洋油气资源勘探水平也有了长足发展并取得了许多有意义的成果,但是我国海域的油气勘探程度和油气资源探明程度均较低,还有许多新领域没有突破,后备基地不足,无论是勘探技术还是工作量与实际需要都有很大差距,总体上仍处于起步阶段,难以满足国民经济发展的需要。在国际深水油气勘探不断取得重大进展的今天,如何尽快拓展我国的油气勘探领域,加快我国深海扇的油气勘探无疑是摆在中国石油人面前的重大课题之一。

## 6 大型深海扇实例

世界许多大河(如亚马逊河、刚果河、密西西比河、印度河、恒河等)河口外均发育有大型深海扇,其中最大的为孟加拉深海扇。

孟加拉深海扇又名恒河深海扇,地处印度洋东北部的孟加拉湾及南延地带,从恒河-布拉马普特拉河三角洲(以下简称恒河三角洲)向南延伸 2 000 多 km,一直到斯里兰卡以南 5 000 m 深的锡兰深海平原,长约 2 000 km,宽约 1 000 km,面积约 200 万 km<sup>2</sup>,最大厚度达 12 km 以上,总体积约 500 万 km<sup>3</sup>。孟加拉深海扇是恒河三角洲的水下延续部分,被许多树枝状谷地分割,其形成和发展与印度板块和欧亚板块的对接及青藏高原的隆起密切相关。分别源于喜马拉雅山南、北两麓的恒河和布拉马普特拉河将大量陆源碎屑携至恒河三角洲,其后主要经由浊流活动散布在大陆坡乃至深海平原,经过漫长的地质历史时期形成深海扇体(图 3,资料源于因特网,本文翻译并修改)。

按照经典的深海扇结构模式,孟加拉深海扇可

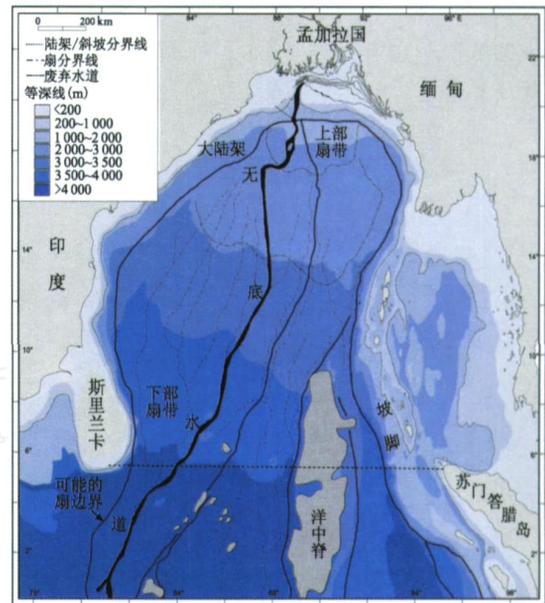


图 3 孟加拉深海扇示意图

分为上部扇、中部扇和下部扇 3 个部分。上部扇通过著名的“无底峡谷”与恒河三角洲衔接。中部扇和下部扇分布许多辫状沟道,全新世以来除中部偏西的一条沟道仍在活动外,其余沟道均已废弃。孟加拉深海扇存在一个低能而保持较高沉积速率的沉积环境,而低密度浊流及等深流引起的雾状层可能是沉积物的主要载体。该深海扇的粗粒沉积物非常缺乏,除了主要活动沟道的深海钻探资料曾揭示若干重要的砂质浊积单元外,扇体主体(特别是在中下部区)一般由质地均匀的细粉砂质土组成<sup>[15]</sup>。

亚马逊扇也是世界上非常著名的深海扇,它位于大西洋中央带,发育于一个面积很大的被动大陆边缘海盆,其面积(包括深水平原)约为 33 万 km<sup>2</sup>。在更新世低位海平面期,扇体快速堆积,在过去的 0.5 Ma 中堆积了 500 m 厚的沉积物。但在高位时期,沉积物沿陆架向北平流,实际上没有沉积物到达扇体。据推断,更新世浊流来自于前三角洲沉积物,也可能是风暴作用使沉积再悬浮搬运形成浊积<sup>[16,17]</sup>。

## 7 深海扇与油气

深海扇蕴藏着丰富的油气和天然气水合物资源,将成为重要的油气和其它资源的勘探开发区。据前人统计:全球大于 900 m 水深的海域蕴藏着全球 90% 以上尚未开发的烃类资源;海洋油气总储量的 44% 蕴藏在大于 2 000 m 的深水区;海底天然气

水合物异常区水深也多大于 2 000 m。从岩性来看, 90 % 的深水扇油气储量发现于浊流层, 少量为浅海和河流相砂岩, 极少数为碳酸盐岩。

据 Stow 等<sup>[16]</sup> 统计, 全球约有 1 300 个已勘探和开发的油气田分布于深海扇浊流沉积及相关的低位体系域; Pettingill<sup>[18]</sup> 记载了其中 925 个油气田 (不包括碳酸盐区带), 这 925 个油气田中有 43 个可归为巨型油气田 (储量大于 5 亿桶油当量)。早期发现的巨型油气田几乎都位于聚合型或斜向聚合型边缘盆地, 而后来发现的巨型油气田则主要分布于离散型边缘盆地 (如墨西哥湾、尼日尔三角洲等地区)。现在尚未开发的巨型油气田位于马更些三角洲、委内瑞拉岸外的 Margarita 盆地及澳大利亚西北陆架等区域。目前, 全球大于 500 m 的深水区已探明的油气储量超过 570 亿桶, 石油和天然气分别约占 64 % 和 36 %, 其中约 20 % 已开发动用, 日产油 190 万桶; 全球大于 1 000 m 水深海域的探井数约有 200 口。

目前, 世界深海扇勘探热点主要分布在墨西哥湾盆地、巴西坎普斯盆地、西非近海盆地、北海盆地、挪威大陆架、西西伯利亚大陆架等。此外, 加拿大、摩洛哥、地中海、孟加拉湾、南中国海及其周边地区都在开展深水勘探并有所发现 (图 4); 含油气层位主要为新近系、古近系和白垩系等。受篇幅所限, 仅对墨西哥湾盆地、西非近海盆地、南中国海等地的深海扇油气勘探作简要介绍。

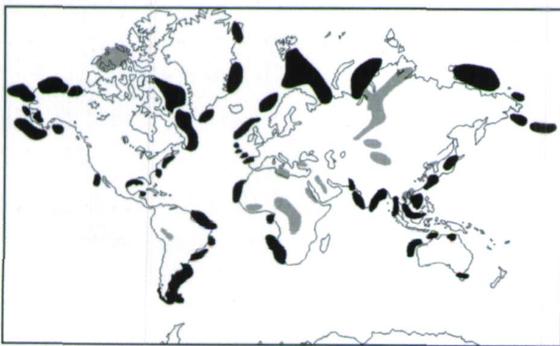


图 4 世界主要深水油气勘探区 (图中黑色区域部分)<sup>[16]</sup>

(1) 墨西哥湾盆地 墨西哥湾盆地的深海扇很发育 (图 5), 但墨西哥湾深海曾一度被人们称为油气勘探的“死海”。上世纪 90 年代以后, 墨西哥湾深海油气勘探取得了巨大成功, 出现了所谓的“第二次找油热潮”, 油气勘探开发每年以近 30 % 的速度上升, 目前已发现深水油气田 120 多个 (其中最大的

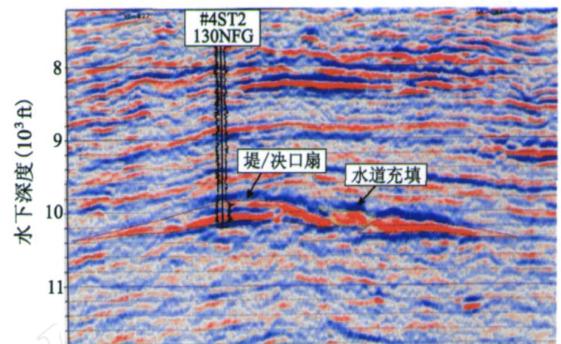


图 5 墨西哥湾某深海扇复合体在地震剖面上的显示 (转引自朱筱敏, 2005)

可采储量达 15 亿桶油当量), 开发 30 余个, 单口探井控制储量 1 400 万桶, 其中仅壳牌石油公司在墨西哥湾已获得近 40 个深水发现, 油气日产量近 10 万 t。墨西哥湾 Mad Dog 油田的石油储量达 4 亿 ~ 8 亿桶, 成为墨西哥湾的最大发现之一; Green 峡谷 158 区块油当量储量也大于 2 亿桶。到 2000 年, 整个墨西哥湾深海石油和天然气产量占总产量的比例已分别增至 64 % 和 36 %。现在整个美国外大陆架 30 % 的已开发油气田位于墨西哥湾的深海区域。据预测, 未来 10 年墨西哥湾深水区 (主要是美国) 的油气年产量将从目前的 7 500 万 t 增长到 1.1 亿 t, 这一数量的产能再加上阿拉斯加现今 4 500 万 t 的年产能, 足以弥补美国陆上产量的递减。

(2) 西非近海盆地 西非深水勘探成果显著, 已发现深水油气田近 60 个 (其中最大的可采储量达 14 亿桶油当量)。由于深水区已发现 11 亿 t 的石油储量, 安哥拉石油年产量将从 4 150 万 t 增至 1 亿 t 左右。

(3) 南中国海 南中国海也是深水油气勘探的有利区, 其周边的许多国家均已进行了深海勘探。例如, 越南在湄公河口外湄公盆地深水区发现大量极具潜力的深水低位扇。菲律宾的 Malampaya 油气田位于 850 m 的深海, 可采储量为天然气 850 亿 m<sup>3</sup>、凝析油 1.2 亿桶, 已于 2001 年 10 月投产。马来西亚大河口三角洲外深水浊积扇的油气产量占该国油气总产量的比例已经相当高。Merah Besar 是印尼的第一个深水油气发现, 储量约为 0.75 亿 ~ 3.00 亿桶油当量; West Seno 油田水深约 853 m, 估算储量为 2.1 亿 ~ 3.2 亿桶油当量。

我国目前所说的“南海深水扇系统”是指南海近

海海域新近系深水沉积物,它处于古陆架与古陆坡的过渡带,向南进入海盆,主要分布于珠江口盆地南缘。这些地带广泛发育低水位沉积体,包括深切谷充填、海底峡谷、深水滑塌物、盆底扇、斜坡扇与低位进积复合体等。

位于珠江口外深水区的白云凹陷是珠江口盆地中面积最大、沉积最厚的巨型凹陷。白云凹陷的区域地质条件与国外已经有重大发现的深水区有如下相似之处:均属于被动大陆边缘断陷盆地;均位于大河口外,是大量沉积物堆积的场所;海平面周期性升降变化的低位时期大河沉积物的沉积中心由陆架向深水陆坡海盆迁移,在深水区形成大型的低位扇沉积。层序地层学研究显示,白云凹陷发育大批相互叠置的低水位深水扇。有大河沉积物供应的低位扇具备极好的储集条件;具有先断后拗、下陆上海、下生上储的双层结构,烃源岩以下伏湖相为主,次要烃源岩为低位扇的海相密集段,而各种成因的生长断层成为油气运移的良好通道。因此,推测白云凹陷深水区是南中国海发育深水低位扇并具有极好油气勘探潜力的地区<sup>[19,19]</sup>。

目前我国在深海油气勘探方面已取得突破,中海油和加拿大哈斯基公司发现的荔湾3-1大气田就位于白云凹陷中央水深1500m深水扇处,是首个在中国领海内发现的深海油气田。该气田潜在天然气储量可能超过1000亿 $m^3$ <sup>[1]</sup>。

(4) 其它深海扇 除上述实例外,国外还有其它许多深海扇及油气发现。例如,巴西的坎普斯盆地发现了16个深水油气田,可采储量达112.45亿桶,其中来自深海扇浊积砂储层的储量占93.4%;位于该盆地 Roncador 大型油田的 Petrobras 油井海水深达1853m,生产能力2万 bbl/d。世界上其它具油气勘探前景的深水区还有北海盆地、美国密西西比深海扇区、加利福尼亚岸外蒙特里深海扇区、地中海的部分地区、北大西洋边缘到英国苏格兰东北部—设得兰群岛西部、挪威、加拿大东部等。迄今为止,巴西、墨西哥湾、西非、挪威和英国深水区的油气储量已经分别占其海域油气储量的90%、89%、45%、38%和9%<sup>[19]</sup>。

## 8 结束语

深海扇研究的活跃,一方面是由于它在经济上

的重要性,另一方面则是由于它在科学上的挑战性。海洋油气勘探开发向深海拓展已成必然趋势,深海扇和相关油气藏可能成为今后几十年油气勘探开发的最前沿。世界上许多国家的学者从不同方面对深海扇进行了深入研究。近期通过 Google 搜索引擎可以查到约270万个与深海扇有关的条目,说明了全世界对它的高度关注。

过去30年以来,发现和开发的各种规模的浊积型油气田增加很快,而且这种趋势还会继续。深海扇的重大发现使得深水领域成为各大石油公司竞相抢占并注入巨资进行勘探开发的热点所在。迄今全球已有约30个深水勘探开发作业者,在约200万 $km^2$ 的深水区进行作业。各大石油公司的深水勘探投资已经占到总勘探投资的30%~40%。全球深水勘探和油田建设的投资已从1995年的35亿美元激增到2004年的200多亿美元。

由于沉积成因机理和油气成藏规律的特殊性,深海扇油气勘探与陆地及浅海区油气勘探有着显著差异。深水作业的成本高、施工风险高、技术要求高,深海勘探被认为是21世纪科学、技术和环境面临的主要挑战之一,深海扇系统内幕、结构和构造演化、油气生运聚特征、深海扇含油气系统的成藏机制及定量研究,以及海上平台、造船、计算机、材料、通信、测量、运输、工程施工、国防等诸多理论和技术问题尚待进一步研究和解决<sup>[20]</sup>。

本文修改过程中得到中海石油(中国)有限公司深圳分公司庞雄高级工程师的帮助;文中引用的部分材料来自于互联网,因无法查到原作者,难以一一注明;在此一并致以谢意。

### 参 考 文 献

- [1] WALKER R G. Deep water sandstone facies and ancient submarine fan: models for exploration for stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(8): 932-966.
- [2] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models — a critical perspective[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 285-342.
- [3] READING H G, RICHARDS M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 792-822.
- [4] RICHARDS M, BOWMAN M. Submarine fans and related depositional systems: variability in reservoir architecture and wireline log character [J]. Marine and Petroleum Geology

1) 庞雄,陈长民,等.南海深水扇系统及油气资源[R]. 2006.

- gy, 1998, 15: 821-839.
- [5] NORMARK W R, PIPER D J W, OSBORNE R H. Initiation processes and flow evolution of turbidity currents: implications for the depositional record[M] OSBORNE R H. From shoreline to abyss: contributions in marine geology in honor of Francis Parker Shepard. Tulsa: Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont., Miner., 1991, 46: 207-230.
- [6] FOREL F A. Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires [J]. Comptes Rendus, Acad. Sci., Paris, 1885, 101: 725-728.
- [7] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits [J]. Amsterdam: Elsevier, 1962, 1: 168.
- [8] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [J] Payton C E. Seismic stratigraphy — application to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 63-81.
- [9] 彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 从浅水陆架走向深水陆坡—南海深水扇系统的研究[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 1-11.
- [10] REYNOLDS R, SMITH T. Improved global sea surface temperature analyses [J]. J Climate, 1994, 7: 929-948.
- [11] HUFFMAN A R. What technologies will impact deepwater appraisal and development 10 years from now? [J]. The Leading Edge, 2001, 20(4): 372-384.
- [12] 魏魁生. 非海相层序地层学—以松辽盆地为例[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [13] 威尔格斯. 层序地层学原理: 海平面变化综合分析[M]. 徐怀大, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [14] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [15] 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): 230-236.
- [16] STOW D A V, MA YALL M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 125-135.
- [17] DAMUTH J E. New evidence for sand distribution in mud-rich deep-sea fans based on drilling the Amazon fan [J]. Geoscience, 1998: 9.
- [18] PETTINGILL H S. Turbidite giants: lessons from the world's 40 largest turbidite discoveries [C]. EAGE/ AAPG 3rd Research Symposium, 1998.
- [19] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气成藏条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 牛滨华, 孙春岩, 张中杰, 等. 海洋深部地震勘探技术[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 274-281.

收稿日期: 2006-01-23 改回日期: 2006-06-24

(编辑: 张敏 周雯雯)

### An overview of hydrocarbon exploration in deep submarine fans

Li Dawei<sup>1</sup> Li Desheng<sup>1</sup>  
Chen Changmin<sup>2</sup> Huang Huipeng<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing, 100083; 2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Guangzhou, 510240; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Liaohe Oilfield, Liaoning, 124010)

**Abstract:** Deep submarine fan, a kind of depositional bodies in shape of fan or coniform, normally develops in the front of canyons along continental slope, and is products of terrestrial clastics by turbidity current, including several parts such as upper fan, mid fan, lower fan and so on. The sedimentation of deep submarine fan is mainly controlled by geological structure, terrain, sea-level change and provenance climate. Many large rivers in the world have great submarine fans in their estuarine area, with the Bengal Fan the biggest. There are plenty of oil and gas resources in deep submarine fans. Since 1990's, deep sea exploration has become very active, because of increasing demand of energy in the world, increasing exploration difficulties in land and shallower sea and significant progress in offshore engineering technology. The research of deep submarine fans and their hydrocarbon may become a leading edge of oil and gas exploration and development in the following several ten years. Currently, 8 hydrocarbon exploration in deep submarine fans has made big progress in the world, with more than 60 countries involved. For China, however, it is still a frontier of hydrocarbon exploration. There may be many deep submarine fans with excellent prospectiveness of hydrocarbon exploration in South China Sea, with LW 3-1 gas field discovered in Baiyun sag, Pearl River Mouth basin. Compared with onshore and shallower water areas, deep submarine fan is quite different in hydrocarbon exploration due to its uniqueness in sedimentary process and hydrocarbon accumulation. Deep water exploration is considered one of the major challenges to science, technology and environment in the 21st century, and a number of theoretical and technical problems have to be further studied and resolved.

**Key words:** deep submarine fan; oil and gas; exploration; South China Sea; LW 3-1; prospectiveness