

文章编号: 1000-0550 (2005) 01-0001-11

从浅水陆架走向深水陆坡 ——南海深水扇系统的研究

彭大钧¹ 庞雄² 陈长民² 舒誉² 叶斌¹
甘其刚¹ 吴昌荣¹ 黄先律¹

¹(成都理工大学 成都 610059)

²(中国海洋石油总公司深圳分公司技术部 广州 510240)

摘要 南海深水扇系统是近年来在南海海域的重大发现,证实自 30Ma 以来深水扇系统密集地分布在我国的近海海域内,并以其宏大的规模、典型的结构及巨大的勘探前景引起国内外的关注。深入展开深水扇系统的研究将是我国油气界与科学界的重大任务。

近 20 年来,深水扇系统已成为国际石油产量与储量增长的主体,已经有 60 多个国家进行深水扇研究,并在国际学术界获得高度重视。据认为:“深水浊流及其有关储层在今后至少 25 年内将成为油气勘探开发研究的前缘”。

南海珠江口盆地深水扇系统发育区域的地质条件与国际上已有重大油气发现的深水扇系统发育区有许多重要的相似。古珠江大河充足的物源供应,长期沉降的深水凹陷与海平面周期性下降是纵向上呈良好叠置状态的深水扇系统发育的要素;而立足于精度较好,保真程度较高的高分辨地震剖面是识别层序界面,识别低水位体系域,辨识陆架坡折带的技术关键,这就使研究领域从浅水陆架进入到深水陆坡。

应当给深水扇系统赋予科学的定义;然而国际学术界对深水扇系统的沉积物性质、类型及预测方法技术存在争议。但是,毫无疑问的是,深水扇系统具有可识别性,它对油气的运移、聚集、隐蔽圈闭的形成以及指导油气勘探有着重要的意义。

关键词 浅水陆架 深水陆坡 南海深水扇系统 低水位体系域

第一作者简介 彭大钧 男 1934 年出生 教授 博士生导师 隐蔽油气藏及油气富集规律

中图分类号 P512.2 TE121.3 **文献标识码** A

1 引言

石油与天然气作为一种战略资源,在我国能源结构、应用领域与环境保护领域占据着十分重要的地位。目前,国内的油气增长远远不能满足国民经济高速增长与发展的需求,从 1993 年起,我国便由石油出口国转为进口国。据报道,2003 年我国进口石油达 8000 万吨以上,支付外汇高达 200 亿美元;而且,此类高额支付还将每年以 10%~20% 的速度递增,这无疑将对我国经济的可持续发展造成重大影响。同时,还必须看到,经由长距离输送的战略能源却依赖于脆弱的物流体系,经不起当今国际政治、经济风云的变化与碰撞。建立在严重依赖于进口石油基础上的国民经济,特别是能源、化工、交通、航空航天和军工国防等主要行业和领域,在风云变幻之际所可能引

发的问题,将会严重地影响到全社会的安全、稳定和发展。

解决此问题的思路应当是多维的,但其中一个关键是尽快拓展我国的油气勘探领域,强化我国的油气自给能力;在深入展开陆上油气的勘探同时,以更大的努力向着我国广阔的海域进军,那里仍然是我国油气勘探的新领域。十多年来,在浅海范围内的初步勘探证明,这些地域是寻找大油气田并可以获得高回报的有利地区。在国际深水勘探不断取得重大进展的今天,我国海域深水沉积体系油气资源前景更是一个迫切需要探索的重大前缘问题。

2 深水沉积——21 世纪全球油气勘探的热点

到 2001 年底,已从全球六大洲 18 个盆地大于

500 m 水深地域发现了 580 亿桶油当量, 90% 的油气储量发现于深水浊流沉积^[1], 其地域主要位于墨西哥湾、西非与巴西。深水油气勘探所获得的骄人成果特别是 1995 年以来的重大发现, 与近三十年来在全球范围内的对深海海域内的不懈探索与科学技术进步有密切的关系。

20 世纪 70 年代, 沉积学与深海钻探计划所取得的阶段成果使人们理解了深海沉积过程, 扇体水道内幕结构、深水扇的总体形态; 80 年代建立了多种扇体沉积模式, 分析扇体发育与相对海平面变化、构造环境、沉积物供给等的关系, 地震地层学获得广泛应用并发挥重要作用; 80 年代后期人机交互工作站的引入加快深水沉积体系的模拟研究, 大洋钻探计划的继续推进促进了海洋沉积学与海洋地质学的发展; 90 年代层序地层学、地震地层学与沉积学等学科的结合推进了海洋深水沉积学研究的发展; 三维地震资料及地震资料处理技术的发展更为其提供了强有力的工具; 通过海洋沉积学、海洋地质学、沉积学等学科的应用与结合, 油气工业界与学术界对现代扇系统和古代扇系统, 特别是晚第三纪深水扇系统已经有了较深入的认识, 并在油气勘探的活动中取得了重大的进展。

目前, 世界深水油气勘探热点主要分布在: 墨西哥湾盆地、巴西以东海域的坎波斯盆地, 西非近海盆地、北海盆地、挪威大陆架、西西伯利亚; 在加拿大、摩洛哥、地中海、孟加拉湾以及南中国海的周边地区均在深水油气勘探中取得进展。墨西哥湾盆地已发现深水油气田 124 个, 其中最大的可采储量达到 15 亿桶当量; 近几年西非深水油气勘探极为耀眼, 已发现深水油气田 55 个, 其中最大的可采储量为 14 亿桶; 安哥拉由于在深水区已发现 11 亿吨石油储量, 该国年产量将从 4150 万吨激增至 1 亿吨; 巴西坎波斯盆地发现 16 个深水油气田, 平均储量为 6.31 亿桶, 最大可采储量为 32 亿桶, 坎波斯盆地总计深水可采储量可达 112.45 亿桶, 来自深水扇浊积砂储层的储量占 93.4%; 在南中国海周边国家也都开始深水扇的勘探。

深水沉积体系油气勘探取得的巨大成功, 极大地促进了深水扇系统研究的热潮, 有关深水扇系统的研究成果愈来愈多地发表在油气勘探各类权威性刊物上, 成为近十余年来学术会议的重要议题。1997 年美国石油地质协会 (AAPG) 年会 (Dallas 年会) 的主题是深水沉积过程和相模式; 1998 年地球科学杂志地质协会双年会 (London 年会) 的特别会议的主题是

深水沉积体系, 探讨了有关深水浊流系统的若干领域; 1998 年 10 月 EAGE 和 AAPG 联合召集专题会 (西班牙 Almeria) 总结深水油气田开采的经验教训, 认为浊积岩油藏的实际情况比人们所预期的要复杂得多; 1998 年 AAPG Bulletin 第 10 期公布在巴西 Riode Janeiro 举行的 AAPG 国际会议的文章摘要, 其主题是以巴西、阿根廷、委内瑞拉、墨西哥湾、安哥拉、北海、印度等地域海上油气勘探, 特别是深水油气勘探的方法、技术、经验与教训; AAPG Memoir 第 72 卷 (2000) 发表 28 篇有关细粒浊积岩系统的文章; 2002 年第 22 届 GCSSEPM (Houston 年会) 讨论主题是层序地层学模式在勘探与开采中的应用; 2003 年第 23 届 GCSSEPM (Houston 年会) 的主题是陆架边缘三角洲及其相关联的下陆坡沉积系统的全球意义及今后勘探潜力。会议指出, 全球成熟油区的勘探与开发历史表明, 陆架边缘地区确实具有很好的油气储层。在墨西哥湾地区, 主要的油气产区均为上游源于深切河谷、下游与深水扇系统相连的陆架边缘三角洲储层系统, 应当十分强调陆架边缘三角洲作为储层以及作为深水陆坡沉积物质的供给系统的极端重要性。因此选准新的油气勘探战略领域及其相应的科学方法系列将成为新世纪地球科学家与油气勘探家的重大任务。显然, 深水沉积体系的研究正进入一个全新的时代, 展示出全新的研究领域。

深水扇油气勘探的成功得益于深海钻探工程技术的完善。当前最大钻探水深已达 2 953 m^[2] (墨西哥湾, 2001.), 最大深水油田开发区水深达到 1 853 m (巴西坎波斯盆地的 Roncodor 油田, 1999); 在气候严峻的北大西洋环境中, 生产设施安装水深为 1 500 m; 在气候良好的海域, 生产设施安装水深可达到 3 000 m。全球性深水勘探和油田建设的投资也在极度膨胀, 从 1995 年的 35 亿美元到 2002 年已达到 188 亿美元, 预测 2004 年将达到 220 亿美元, 五年内深水海域投资将达 710 亿美元。

H. S. Pettingill, P. Weimer^[3]统计, 深水扇系统储层大多为新生界地层, 少量为白垩系地层; 90% 的油气储量发现于浊流沉积, 少量为浅海和河流相砂岩, 极少数为碳酸盐岩储层; 储层物源来自排流稳定的克拉通稳定地块, 源自成熟度高的大河系统, 并处于年轻的三角洲沉积体系下倾方向的深水地区。

正如 Stow^[4]所言, 深水浊流及其有关的储层在今后至少 25 年内将成为油气勘探与深水沉积研究的前缘。

3 从陆架到陆坡——南海深水扇系统的发现

国际深水油气勘探的理论与实际、深水油气资源的巨大前景,我国油气储备的现状以及错综复杂的国际政治、经济形势,已经充分说明我国油气勘探应当把走向海域、走向深水作为一项重要选择。然而,具体目标何在?面临的理论、方法与工程技术又将会遇到什么挑战?这均将影响抉择的决心及实施的细密部署。

3.1 南海珠江口盆地逐渐地进入关注的焦点

南海珠江口盆地油气资源研究区域,其区域地质条件与国际上已有重大油气发现的深水区有许多重要的相似之处:

- 属于被动大陆边缘的断陷盆地。珠江口盆地位于 32 Ma 开始扩张的南中国海北部被动陆架边缘,由于正处于太平洋板块、欧亚板块和印度板块作用的交汇处,使盆地的发育演化极为复杂。国外深水勘探成功地区多属于此类被动大陆边缘盆地,如西非各盆地、巴西的坎波斯盆地等;

- 位于大流域长源大河出口下倾方向,成为有大量沉积物堆积的场所。早第三纪晚期,中国西部强烈隆升并在其东南缘形成长达 2 129 km,流域面积 $4.4 \times 10^5 \text{ km}^2$,有大量沉积物向海域输送的古珠江大河。巨量沉积物的堆积造就了世界上少有的广阔的南海陆架和大型的高位三角洲,而具有丰富沉积物入海是发育大型深水扇的最重要的物质基础。类似的是在西非尼日尔河、刚果河,进入墨西哥湾的密西西比河、科罗拉多河、格兰德河等均是如此,并在深水勘探取得成功:

- 海平面的周期性升降使大流域长源大河沉积物在低水位时期沉积中心向深水陆坡——海盆迁移,从而导致古珠江大量沉积物在海平面下降期间迁移到珠江口外的陆坡深水区沉积。珠江口深水区白云凹陷渐新世末以来的地层厚度达 6 000 m,是北部浅水区珠江口陷的二倍,这无疑是海平面下降、沉积中心向深水区迁移、大量古珠江沉积物堆积在白云深水区的有力证据;

- 处于已发现油气的年轻的(新生界)三角洲沉积体系下倾方向的深水地区。从 1983 年以来珠江口盆地已从事积极的油气勘探开发研究,已经完成 18 万 km 的二维地震,5 300 km² 三维地震和 137 口开采井的工作量,并在珠江口陷已发现 6 亿吨石油储量和

形成年产千万吨原油产量的规模,对滨岸—三角洲体系的成藏条件有着深刻的理解。古珠江大河充沛的沉积物供应和频繁的海平面变化在北部珠江口陷形成了多套高位—海进体系域陆架三角洲—滨岸体系的砂泥沉积,成为珠江口盆地已发现油田最主要的产层,成为中国海上重要的石油生产基地。勘探的成功证实了珠江口盆地是一个富烃的新生代盆地。这些条件与国际上各深水大油气田发现前的基础条件极为类似。

珠江口盆地位于南中国海北部大陆架,面积 175 000 km²,是一个新生代被动大陆边缘的断陷盆地(图 1)。

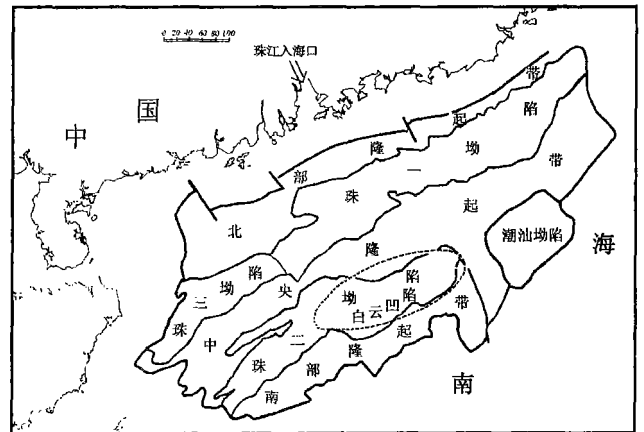


图 1 珠江口盆地及构造单元划分图

Fig 1 Map of Pearl River Mouth Basin (PRMB) and its structural units division

珠江口盆地可分为三个构造单元,分别是:由珠江口陷和珠江口陷组成的北部坳陷带;神狐隆起、番禺低隆起和东沙隆起组成的中央隆起带以及由珠江口陷和潮汕坳陷组成的南部坳陷带。珠江口盆地第三系地层以 T₃ 不整合面为界可分为下第三系和上第三系两套地质单元。下第三纪裂陷期发育众多孤立分隔的断陷,沉积了文昌—恩平组河湖相地层,是盆地主要的烃源岩层系,一般可厚达 3 000 m;深水区白云凹陷下第三系沉积厚度超过 5 000 m,面积达 13 300 km²,是盆地内规模最大的凹陷。上部地质单元为上第三纪裂陷后海相沉积,由珠海、珠江、韩江、粤海、万山组海相地层组成,其沉积作用主要受海平面升降变化以及古地理环境的控制。

由于南海运动及其不整合面的均夷作用,北部坳陷带和中央隆起带演变为宽广平坦的陆架区,而南部的白云凹陷由于持续热沉降成为陆坡—深水海盆环

境。海平面下降以及白云凹陷位于古珠江出口的下倾方向,使其成为低水位体系域沉积的理想场所。深水区白云凹陷上第三系海相地层沉积厚度达 6 000 m,较珠 坳陷同期沉积厚度大一倍,说明白云凹陷长期沉降并不断形成可沉积空间,导致古珠江沉积物被大量堆积到白云凹陷深水区。

南海深水扇系统泛指的是广布在南海珠江口盆地近海海域上第三系深水沉积物,位于珠江口盆地南缘——珠 坳陷,处于古陆架与陆坡的过渡带,属与陆架边缘三角洲体系相联系的深水扇系统。深水扇系统比较密集地分布在南缘地区,沉积厚度 4~8 km。在这些地带,广泛地发育着层序地层学所谓的低水位时期的沉积楔状体,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,是晚第三纪时古珠江三角洲入海沉积物在低水位时期的主要堆积地域,其体积可达 $3 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \text{ km}^3$,水深 200~2 000 m。1999 年从对地震资料的高分辨、高保真、高信噪比的处理入手重新认识与解释了本地区的层序地层格架与深水沉积特征,最终发现这里发育的可能是一种全新类型的油气圈闭,其储层即为深水扇系统。

3.2 层序地层格架及深切谷的发现

层序识别是层序地层学研究的基础,其关键是识别层序界面、初始海泛面、最大海泛面以及其它类型的次级界面。在勘探程度较低,研究程度不足、主要目标地域缺乏钻探资料的地区,例如珠 坳陷白云凹陷,其层序地层学的研究必须也只能立足于精度较好、保真程度较高的二维地震资料,充分了解与吸收前人及邻区层序地层学的研究成果,精细、可靠地选择能较为充分表达层序地层学特征的地震剖面,细致地研究与识别层序界面,并将识别的层序及其特征界面置于年代地层学框架,从全球海平面变化的规律去考察与研究所识别层序的可靠性;进而,在扩大的范围内比较、联系与追索各层序在空间的变化,研究其地质内涵,特别是低水位体系域内部各沉积单元的展布特征。

层序识别与划分的标志主要根据有无海岸上超往下转移、沉积相向盆地转移(三角洲前积特征可作为沉积相转移的典型标志;从加积准层序组转变为前积的准层序组也是十分重要的沉积相转移标志)、河流回春作用(体现在深切谷切入下覆高水位体系域的侵蚀及其充填物)以及是否存在陆架坡折带(往往通过同沉积断层、盆底扇、斜坡扇及滑塌体等综合反映)。这四类标志加上其它辅助标志,对层序地层界

面识别极有帮助。

为了适应层序地层学研究的需要,数年前便对珠 坳陷 50 口探井的古生物进行地层年代和沉积环境的系统研究。50 口探井高精度古生物定量分析为珠江口盆地建立了生物地层的时代格架,同时,生物的环境意义揭示了盆地存在海平面升降的周期性变化。研究发现珠江口盆地相对海平面变化的旋回性与全球海平面变化基本一致,反映海平面的变化主要受全球性事件的影响。自 21~10.5Ma 共有 6 次海平面升降,每次海平面下降都退达白云凹陷的北缘陆架边缘附近。白云深水凹陷高分辨地震剖面的层序识别的研究工作表明,在上渐新统至中新统的地层范围内也可识别出的 7 个层序底界面,即从 21~10.5Ma 的时间间隔中出现六次周期性变化,这与在珠江口盆地珠 坳陷的高分辨层序地层学研究成果所绘制的海平面相对变化曲线以及全球性海平面变化周期所揭示的特征是吻合的(图 2)。

在层序识别的早期研究工作过程中,发现 NEE—SSW 方向的地震剖面和 NW—SE 向的地震剖面具有较为典型的层序发育特征,故以典型剖面为主线进行层序划分与识别的基础研究,进而拓展到区域性的追踪研究。

典型剖面的解剖分析表明,白云深水地区在 435 线以南各层序皆发现存在低位体系域的有关沉积单元,重要的有深切谷及其充填物、盆地扇(丘形体)、斜坡扇及低位进积分复合体。

从 444 测线(图 3)各层序底界上发现大量的由河流回春作用诱发的深切谷及其充填物(MF)。深切河谷资料统计:河谷宽度 1 500~6 500 m、河谷深度大于 150 m 的有三条,其中最深的达 300 m;河谷深度在 75~150 m 的有 12 条,平均河谷宽度为 2 500 m。即以当今的标准来看,这些深切河谷均已达到相当的规模,河流回春的规模及其可能携带的沉积物质数量是惊人的。

由 444 测线往南越过断裂带就进入陆坡地带,即从 435 线沿古珠江水系流向往南直到 10 km 以远处就可能到达古陆架边缘,它正位于白云凹陷北侧地区——番禺低隆起南缘。

就深水扇系统的形成而言,目前的基本概念是:在相对海平面下降时,古珠江携带大量物质穿越珠 坳陷和番禺低隆起的古陆架进入古陆坡,并在此形成一大规模的低水位体系域。推测陆架坡折位置与现今的陆架边缘位置基本一致,应该位于白云凹陷的北

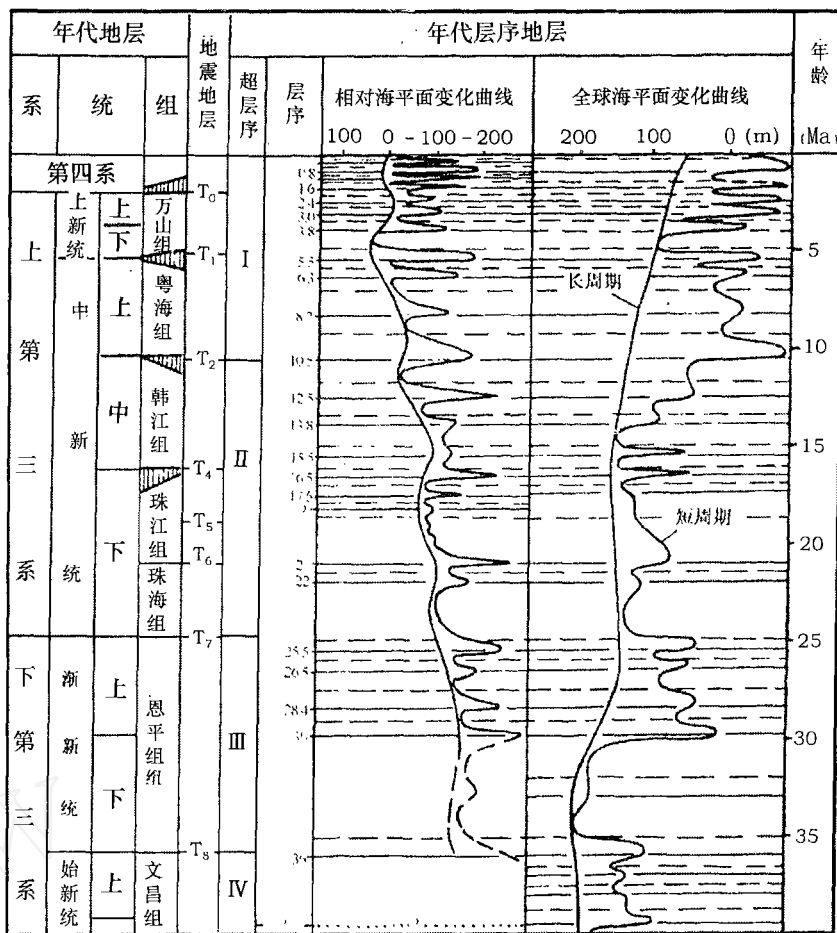


图 2 珠江口盆地第三系地层与海平面变化曲线对比图
(引自东部公司, 1993:本文修改)

Fig 2 Comparison map of Tertiary formation and eustatic change, PRMB. (from East Institute of Nanhai, CNOOC, 1993)

侧。处于深水陆坡环境的白云凹陷持续沉降使得凹陷在接受巨厚低水位沉积同时,沉积空间仍然不断产生,继续保持了深水环境,并发育一系列同生断裂,进而造就了各层序低水位体系域都垂直叠置在白云凹陷之上。

白云凹陷北侧为番禺低隆起,东邻东沙隆起,西南侧受大型的断垒所控制,形成三面高地包围的深水环境。低水位时期,东、北、西面出露,持续沉降的白云凹陷演变成海湾环境,成为北面古珠江入海倾注沉积物的最佳场所。大量峡谷水道围绕凹陷分布证实了海湾环境的特点。

因此,海平面周期性下降,古珠江大河输入沉积物和白云凹陷持续沉降是白云凹陷发育大规模低水位扇体,并使各层序低水位扇垂向叠置的重要原因。

目前,白云凹陷低位体系域的研究只是在认识了区域地质背景基础上对凹陷内较稀的测网进行区域层序地层学解释,21~10.5 Ma期间形成的6个层序都在白云北坡一带发育低水位体系域,但各层序海平面下降程度、低水位扇发育规模都有差异,其中21~17.5 Ma和13.8~12.5 Ma层序海平面下降的幅度可能最大,形成的扇体规模也最大。15.5~13.8 Ma、16.5~15.5 Ma层序的峡谷水道和扇体也都很发育。深水扇系统的全貌、属性及其分布规律等都需要在更高质量资料的基础上作进一步研究。

3.3 浅水陆架—深水陆坡的地震相结构

在深水及深埋的条件下,特别是缺乏直接钻探资料以及三维地震资料的地区,为了研究古陆架坡折带、古陆坡及古海盆,地震相的分析与研究不仅是极

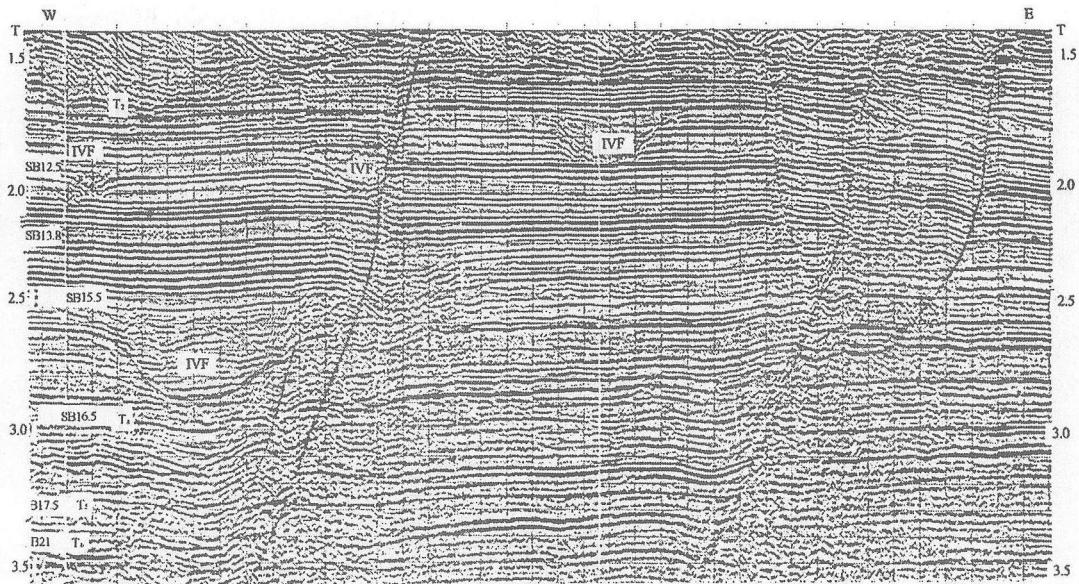


图 3 高分辨地震剖面显示深切谷 MF

Fig 3 High resolution seismic section showing incised valley filled (MF)

为重要的手段,而且是最为基本的研究方法。其中,核心的是地震相标志的研究。

典型高分辨地震剖面的分析表明,主要的地震相构型有平行(亚平行)反射构型、波状反射构型、发散状反射构型、前积反射构型、退积反射构型、丘形反射构型、透镜状反射构型、侵蚀充填反射构型等,这些反射构型特征明显,易于识别,较少多解性并与层序地层学及沉积学研究有密切的对应关系,可靠性也较强。因此,在地震相反析,特别是古沉积环境的研究中具有特别重要的意义。

地震相构型可分为两大类:可以明确指示古沉积环境的“指相性”地震相构型以及必须通过较为细致的综合分析才可以间接地解释古沉积环境的“非指相性”地震相构型。在一个特定的研究地区,查明何种类型的地震相构型属于“指相性”地震相构型显得特别重要,尤其在勘探早期缺乏足够的沉积岩石学的直接依据时尤为重要。南海珠江口盆地珠坳陷的深水扇系统的发现,在很大程度上依赖于侵蚀充填反射构型的确认。

前 AAPG 主席 P. Weimer 曾指出,层序地层学应用以来最重要的找油新领域之一是层序界面上的谷地充填砂体。其实深切谷充填砂体是其重要作用的一个方面,更为重要的是,它指示了古陆架的边缘,往上游可追索广阔的陆架,往下游可进入陆坡系统,通过海底峡谷进入深水沉积体系,它是指示古陆架边缘

的一个最重要的指相性地震相构型。

类似的“指相性”地震相构型还有前积反射构型指示古大河三角洲前缘,是沉积物进积的产物,反映古水流的方向。因此,前积构型是三角洲、扇三角洲,各种扇体以及大陆坡的边缘斜坡的典型标志;平行(亚平行)反射构型,它是沉积速率在横向上大体相等的均匀垂向加积作用的产物,在陆棚、深海盆地等许多相带都可发育,多解性强,但在特定的限制条件下,例如,是位于陆架边缘上倾方向抑或位于陆坡的下倾方向,就可判断出究竟属于稳定条件下的陆架沉积环境或是稳定、均匀条件下的深海盆地沉积环境。其它“指相性”的地震相构型还有很多,对研究古沉积环境而言,最重要的是将“指相性”地震相构型与通过综合分析确认的“非指相性”地震相构型很好地结合起来,从较为宏观的角度入手,确认浅水陆架—陆坡—深水海盆的地震相结构。

南海珠坳陷上第三系深切谷及其充填的发现引导我们从全盆地范围内去研究典型的地震相组合,逐渐地认识了不同年代层序底界面上所代表的古沉积环境及在低水位时期深水扇系统的概貌。这方面的系统研究工作还在深入地进行。

高分辨地震剖面的地震相组合的研究,使得以深切谷及其充填的发现为起端的典型剖面研究逐渐扩展为全盆地范围的系统研究,逐步地揭示出晚第三纪各个层序发展阶段的古陆架、坡折带、陆坡与盆地的

展布特征,表现出不同时期深水扇系统的特征;当将典型研究的剖面穿越整个盆地并与深部的重、磁资料研究相结合时,深水扇系统的完整演化过程就清晰起来。系统的、繁杂的、耗时巨大的研究工作还在进行,但其要点先作如下介绍:

3.3.1 地震相组合类型

·陆架环境、加积型地震相组合

特征鲜明,总体表现为多层纵向叠加,每一层序多组同相轴平行组合,振幅强弱相间,连续性好,大体上表现为整合接触与假整合接触的地震相组合,反映

的是古陆架平稳的沉积环境,并以海进体系域与高水位体系域的沉积为主(图 4-1);

·陆架边缘、前积型地震相组合

往往出现在加积型地震相组合的下方,具有前积特征并往盆地方向下超在层序底界面之上,越往底界面靠近,其反射同相轴振幅值变强。此类型强调的是两种环境的过渡地带;往陆地方向是较为稳定与平坦的古陆架,同相轴转变为加积型;往海洋方向就是地形坡度变化的陆坡沉积环境;有的层序底界上可出现极为壮观的前积型结构(图 4-1);

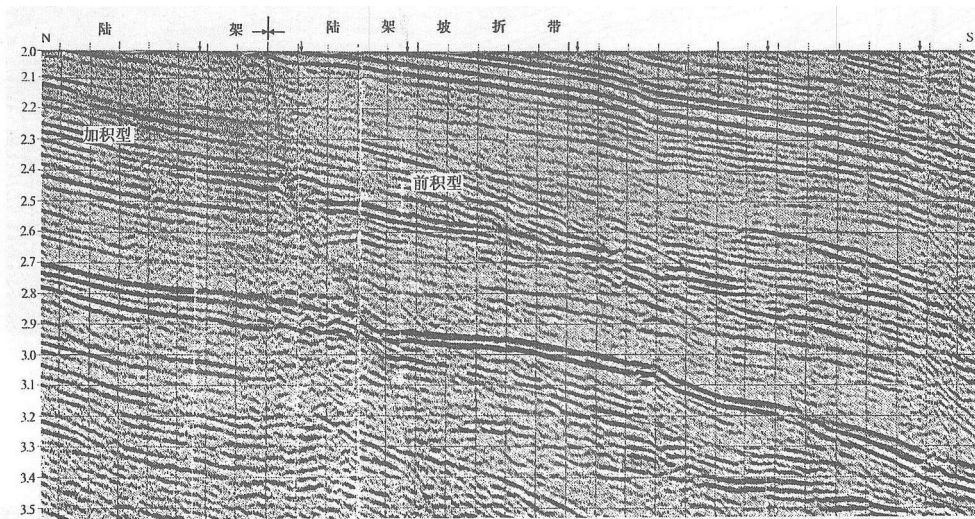


图 4-1 陆架—陆架坡折带加积型与前积型地震相图

Fig 4-1 Shelf, accretionary type seismic facies complex and shelf margin, progradation type seismic facies complex

·陆架边缘、深切谷充填型地震相组合

在垂直于古珠江古陆架的地震剖面上表现明显。在特定的边界以南方向,可以见到各层序底界上规模不等的深切谷及其充填。深切河谷一般下切入前期层序的高水位体系域,切谷两侧强振幅同相轴中断,切谷充填物可见双向塌积或一侧下超前积,另一侧上超海侵,但更多的是下部双向塌积,上部海进覆盖(图 4-2);

·上陆坡、丘形反射体型地震相组合

本地区陆架坡折带受同沉积断层控制,距断层不远处陆坡就变得平缓,故丘形反射结构特征明显,两侧分别下超在相对平整的层序底界上;往盆地一侧延伸很远并逐渐与层序底界面平行;另一侧则终止于断层(图 4-2);

·下陆坡、斜坡扇地震相组合

下部可见波状反射构型,而上覆则为由发散状前

积型逐渐收敛为平行反射构型地震相组合,表现的是横向展布不稳定、纵向叠加也不稳定的下陆坡环境(图 4-2);

·深水盆地盆底扇地震相组合

此类地震相组合总体上反映的是在盆地相对平静环境下接受沉积物的过程。因此,平行反射构型地震相组合特征十分明显,即以平行状、同相轴强弱相间、连续性好、横向变化相对稳定的平行反射构型地震相组合为主,辅以波状反射构型的地震相组合(图 4-2)。

3.3.2 从地震相组合类型到深水扇系统

如果我们在 NW—SE 向地震剖面 SB12.5 Ma 界面上所看到的一条长达 14 km 的深切谷,并在下游方向穿越同沉积断层后发现的盆底扇及斜坡扇体系(丘形反射、前积、下超、上超、雁飞结构等)后,我们会毫不怀疑此类扇体的庞大规模,与侧邻几公里的类似剖面均可见到位于 SB12.5 Ma 底界上的盆底扇,

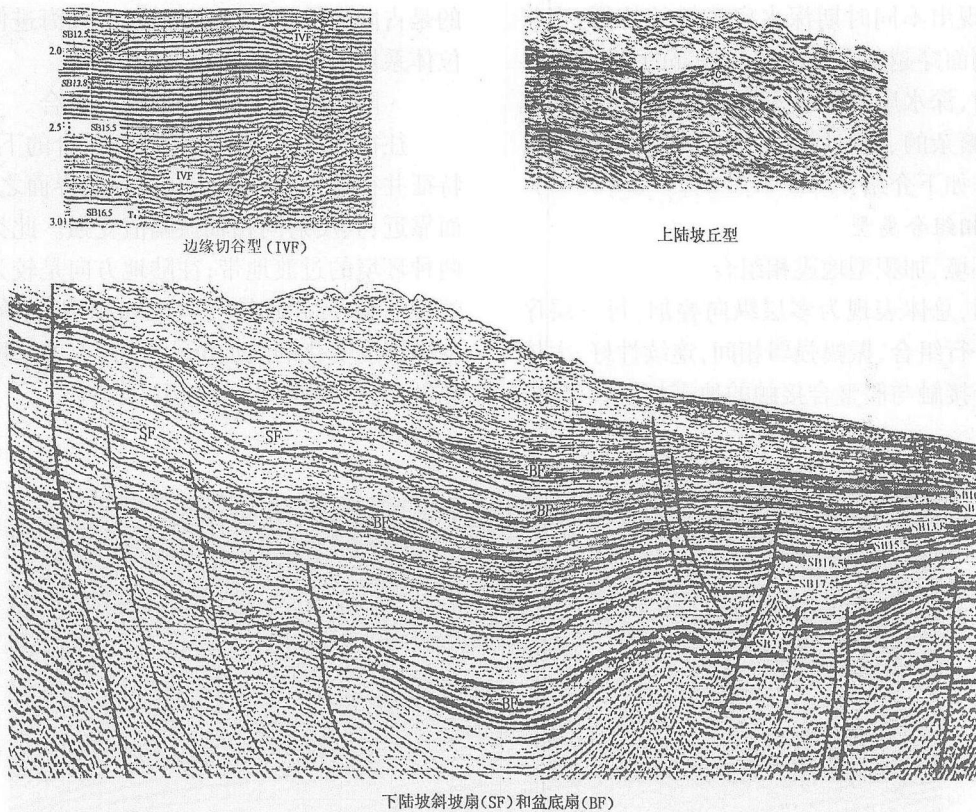


图 4-2 陆坡—盆地地震相

Fig 4-2 Slope and Basin seismic facies complex

且往两侧还可延展;其总体体积可达 $1.8 \times 10^{10} \sim 3.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。此深水扇系统从宏观上应包括巨大规模的深切河谷—海底峡谷—盆底扇—斜坡扇—低位进积复合体。如果我们从剖析该扇系统的地震相组合的形态特征、地质含义、反射特征组合、振幅特征、相位特征、层速度特征、吸收系数特征、相对波阻抗特征以及频率谱特征,并研究其在横向上与纵向上的变化,就会形成一种基本认识:如果说,高速与低速平行相间、高阻抗与低阻抗平行相间、强弱振幅相间、高频与低频平行相间、强弱相位相间等特征所呈现的是“成层性好、连续性好、平行整合性好、稳定性好的陆架环境;体现的是海进与高水位体系域时的稳定性好、由海进、海退规律所控制形成的层状似层状的砂泥质互层整合沉积;那么,任何变化,特别是处于低水位时期所发生的前积分异、暴露河道废弃与形成新的水道、水道充填、崩塌、溯源侵蚀、断崖滑塌物与杂乱堆积等主要受古环境的变迁与海平面升降所控制的地质作用以及切谷充填、海底峡谷充填、盆底扇与斜坡扇等地质产物的形成,必然导致原有的“成层性”特征的急剧改观;这正如象深切谷充填地震相组合等

不同类型典型地震相结构所揭示的那样,无论其形态特征及其沉积学内涵都会出现多种混杂沉积物在空间上呈“非成层性”的展布特征,并极其明显地展现在高分辨地震剖面、相对波阻抗剖面、层速度剖面等特殊处理的地震剖面之中,构成地质解释的准确依据,使地震资料的多解性逐渐趋向于科学解与唯一解。这就是说,地震相组合特征可以有力地说明古沉积环境,说明深水扇系统内部各种结构单元的特征,为深入剖析深水沉积物提供重要依据。

3.4 深水扇系统的定义

深水沉积体系的研究涉及众多的学科,包括层序地层学、地震地层学、沉积学、油气地质学、海洋沉积学、海洋地质学与深水沉积学等与深水沉积体系直接有关的学科,也包括地球物理学、油气勘探与开采、地震资料处理与解释系统、深海钻探、全球卫星定位及计算技术等多种工程与应用技术学科,构成一个庞大的领域。就深水沉积体系的主体深水扇系统而言,首先应当给予科学的定义。

曾有多种名称以表示深水扇系统,例如深水沉积、深水浊流、盆底扇、斜坡扇等,为了确切地给予科

学的内涵,本文提出如下的定义:

它是深水沉积物的主体部分,广见于各类深水沉积盆地,主要分布在被动大陆边缘陆坡带附近,它是由具有低水位期典型结构特征、有成因联系的若干个同源的沉积体所组成,具有等时性与共源性,并能构成有序的、有逻辑联系的深水沉积系统,具有多种沉积模式,控制因素是多重的,沉积物的岩性组合也具有多样性。

深水扇系统具有可识别性,它对油气的运移、输导、聚集以及隐蔽圈闭的形成具有重要的控制作用。

在地理位置上,这些沉积体系主要分布在陆架坡折带以下,但由于沉积物质供给涉及到陆架部分,因此深水扇系统的研究范围往往涉及到海岸带、陆架、陆坡与海盆;

在时间范围上,应当以新生代第三纪,特别是晚第三纪为主,并发育于不同的低海平面发展时期,有明确的等时性;

在几何形态上,它们可能表现出盆底扇、斜坡扇、斜坡裙、进积楔、朵叶、水道充填、峡谷、深切谷充填、席状体以及它们的复合体及纵向上的叠置产物,具有类型众多、特征各异、形态多变的复杂性;

在形成机制上,它们可能由浊积流、碎屑流、底流(等深流)、滑动(Slide)流、崩塌流(Slump)、密度流等深水沉积过程形成;

由于深水扇系统内的各种沉积体具有不同尺度的可识别规模,可以应用沉积学、海洋地质学、地震地层学、层序地层学等理论与方法技术在层序、体系域、内幕结构单元、岩性与物性等各个侧面进行识别。

因此,深水扇系统的概念属于深水沉积系统的范畴,是有机整体,对沉积物供给、搬运、沉积过程及沉积后的改造等在时间上、空间上、过程中有成因联系的各个子系统的研究时均不可忽略;应当强调物源、等时与过程,强调内幕结构,强调可识别性。

深水扇系统的研究凸显了我们对沉积体系的理解不应只是现今形态描述,而应根据沉积体的现时状态,采用多种现代技术手段和先进的研究思路,通过多学科的研究分析,推断其形成机理,认识其沉积过程响应,再现深水扇沉积系统的沉积史,进而达到对深水扇系统油气潜力认识的目的。

4 南海深水陆坡的勘探前景

白云凹陷新生代地层沉积厚度超过 11 km,面积 13 370 km²,是南海珠江口盆地最大的凹陷,下第三

系文昌—恩平组沉积厚度超过 5 000 m,凹陷内沉积速率高,地震呈低频平行强振幅反射,初步分析认为以湖相沉积为主。凹陷边部探井 TOC 值超过 1.5%,文昌—恩平组地层是一套已经被珠 坳陷勘探所证实了的湖相烃源岩,白云凹陷的沉积规模展示其更好的烃源前景。

据北部 50 口探井的上第三系海相泥岩总有机碳分析,白云凹陷北侧海侵的密集段 TOC 值已达到 1.5%,根据沉积环境展布趋势,白云凹陷内将有更高的总有机碳。由于白云凹陷的持续沉降,上第三系的海相地层沉积巨厚,下部(如 SB15.5 界面以下地层)已进入油气成熟窗,极有可能成为新的烃源岩。

深水扇系统上倾方向的白云凹陷北缘探井有大量的烃显示,地震资料显示出多处大面积的亮点、AVO 异常,据探井气测组分分析为油伴生气。周边大量的显示表明白云凹陷生成的油气已经发生了自凹陷深部穿越上覆深水扇系统,并泄漏到凹陷周边浅部地区。目前该地区已占获工业性气井,发现相当规模的天然气储量。

最近十年全球许多深水扇系统勘探取得重大成功,最重要的原因是它具有形成大型地层圈闭的条件。珠 坳陷的油田大多数为古珠江三角洲—滨岸砂质储层,以高孔高渗高采收率而闻名。相信以古珠江物源为主要沉积物的白云凹陷低水位扇同样具有良好的储集性能。白云凹陷的沉降使各层序低水位扇垂向叠置,并位于凹陷烃源岩之上;沉降作用产生的同沉积断裂成为油气的有利运移通道。所有的因素都展示白云凹陷深水扇系统具有诱人的勘探前景。

5 结论

珠江口盆地白云凹陷深水区域层序地层学研究初步成果展示了深水扇系统分布的宏大规模。海平面周期性下降、古珠江大河充足物源供应和白云凹陷长期沉降是大批低水位扇发育的前提条件。

深水扇系统与珠 坳陷油田群的优质砂岩储层都是来自古珠江的沉积物,相应白云凹陷深水扇系统也具有好的储集性能。叠置在巨厚下第三系潜在烃源岩之上的深水扇系统将成为珠江口盆地的勘探热点。

南海深水扇系统的发现是基于二维地震资料叠后高分辨的处理,层序地层学的研究则立足于精度较好,保真程度较高的典型地震剖面。根据海岸上超往下转移、沉积相向盆地转移、河流回春作用以及是否

能确切辨识陆架坡折带等层序地层学关键标志,识别与划分层序界面并将其置于年代地层学框架,从珠江口盆地及全球海平面变化周期的规律去考察与研究识别出层序的可靠性,并发现自 30 Ma 以来各个层序低水位体系域发展阶段所形成的典型沉积微相单元,且深切河谷与盆底扇在纵向上具有叠置特征,在空间均发育在呈继承性发育的受同沉积断层控制的陆架坡折带附近,具有深刻的地质背景。

在全球深水油气勘探发展迅猛的今天,在南海我国领海地域内发现规模宏大的深水扇系统具有极大的经济意义与学术价值。

深水扇系统的发现只是研究的第一步,面临国际学术界对深水扇系统沉积属性的争论,面临深水沉积系统的复杂性,面临深水油气勘探是我国油气勘探未曾涉足的全新领域,我们将打开视野,与国际深水研究接轨,在基础研究与积极勘探这两条基本战线努力进取,把南海深水扇系统的研究与勘探工作做多做好。

参考文献 (References)

- 1 Dajun Peng, Changmin Chen, Xiong Pang, Xianlu Huang Discovery of deep-water fan system in Pearl River Mouth Basin, South China Sea AAPG Bulletin, 2003, International Conference & Exhibition, Barcelona, Sep 21 ~ 24, 2003
- 2 陈长民,施和生,许仕策,等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京:科学出版社,2003 [Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, *et al* Original Condition of the Tertiary Oil and Gas Accumulation, Pearl River Mouth Basin Beijing: Science Press, 2003]
- 3 邱中建,龚再升. 中国油气勘探. 北京:地质出版社,1999 [Qiu Zhongjian, Gong Zhansheng, Petroleum Exploration of China Beijing: Geological Publishing House, 1999]
- 4 Chen Changmin, Pang Xiong The deep-water lowstand fan and its exploration potential of Pearl River Mouth Basin (PRMB). 2001
- 5 Dorrik A, Stow V, Mike Mayall Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 125 ~ 135
- 6 Shanmugam G 50 years of the turbidite paradigm (1950s ~ 1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective, Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 285 ~ 342
- 7 Richards M, Bowman M. Submarine fans and related depositional systems: Variability in reservoir architecture and wireline log character. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15: 821 ~ 839
- 8 Galloway W E, Huang Chunju Slope and base-of-slope depositional system. AAPG Bulletin, 1998, 82(4): 569 ~ 595
- 9 Jack Caldwell Deep water exploration opportunities: South Atlantic African Basins. Petroconsultants, 1997
- 10 Apps GM, Peel FJ, Travis C J, Yeilding CA. Structural controls on Tertiary deep water deposition in the northern Gulf of Mexico. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994. 1 ~ 7
- 11 Luca Baruffini, Carlo Cavalli, Lorenzo Papani Detailed stratal correlation and stacking patterns of the Gremiasco and Lower Castagnola turbidite systems, Tertiary Piedmont Basin, Northwestern Italy. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research conference Stratigraphic Analysis, 1994. 9 ~ 21
- 12 Arnold H, Bouma H, Deville W, Wickens, Tanqua Karoo Ancient analog for fine-grained submarine fans. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994. 23 ~ 34
- 13 Carlos H L B ruh and Roger G Walker High-Resolution Stratigraphy and reservoir geometry of turbidites from the marine transgressive Megasequence of Campos (Late Cretaceous) and Espirito Santo (Early Eocene) Basin, Brazil. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994. 34 ~ 35
- 14 Cesar Cainelli Shelf Processes and Canyon/Channel Evolution Controlling Turbidite Systems: Examples from the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil. GCSSEPM Foundation 15th Annual Research Conference Stratigraphic Analysis, 1994. 39 ~ 50
- 15 Elverhoi A, Norem H, Anderson E S, Dowdeswell J A, *et al* On the origin and flow behavior of submarine slides on deep-sea fans along the Norwegian-Barents Sea Continental Margin. Geo-Marine Letters, 1997, 17: 119 ~ 125
- 16 Reading H G, & Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. AAPG Bulletin, 1994, 78: 792 ~ 22
- 17 Wells N A. Clastic sedimentology-deep sea. Geotimes, 1998, 43: 31 ~ 32

From Shallow-water Shelf to Deep-water Slope ——the study on deep-water fan systems in South China Sea

PENG Da-jun¹ PANG Xiong² CHEN Chang-min² YU Shu²
YE Bing¹ GAN Ji-gang¹ WU Chang-rong¹ HUANG Xian-lu¹

1(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

2(Technology Department, Shenzhen, CNOOC Ltd, Guangzhou 510240)

Abstract Oil and gas are strategic resources. China became oil input country since 1993. In order to ensure the energy security, one of the best energy policies is to find out several giant oil-gas fields in the coastal ocean regions and to establish new petroleum strategic base. The deep-water fan system in South China Sea could become the breakthrough area.

The deep-water fan systems play a dominant role for the international oil production and reserve increasing in the last 20 years, more than 60 countries doing well for the research of deep-water fan system. This subject attracts the international academic attention and considered as “one of the principal scientific technical and environmental challenges for the new century” and “deep-water turbidite and related reservoirs will be at the forefront of oil and gas exploration and production for at least the next 25 years” (D. A. V. Stow, *et al* 2000).

Deep-water fan system which being discovered recently with the characteristics in South China Sea of huge scale, densely distribution, typical architecture and great exploration future. The deep study for the deep-water fan systems is becoming the major subject for oil and gas industry and scientific academy.

This article gives a definition for deep-water fan system, and points out the discovery of large-scale deep-water fan systems in the South China Sea has significant economic potentials and academic values.

Key words shallow-water shelf, deep-water slope, deep-water fan systems, lowstand systems tract