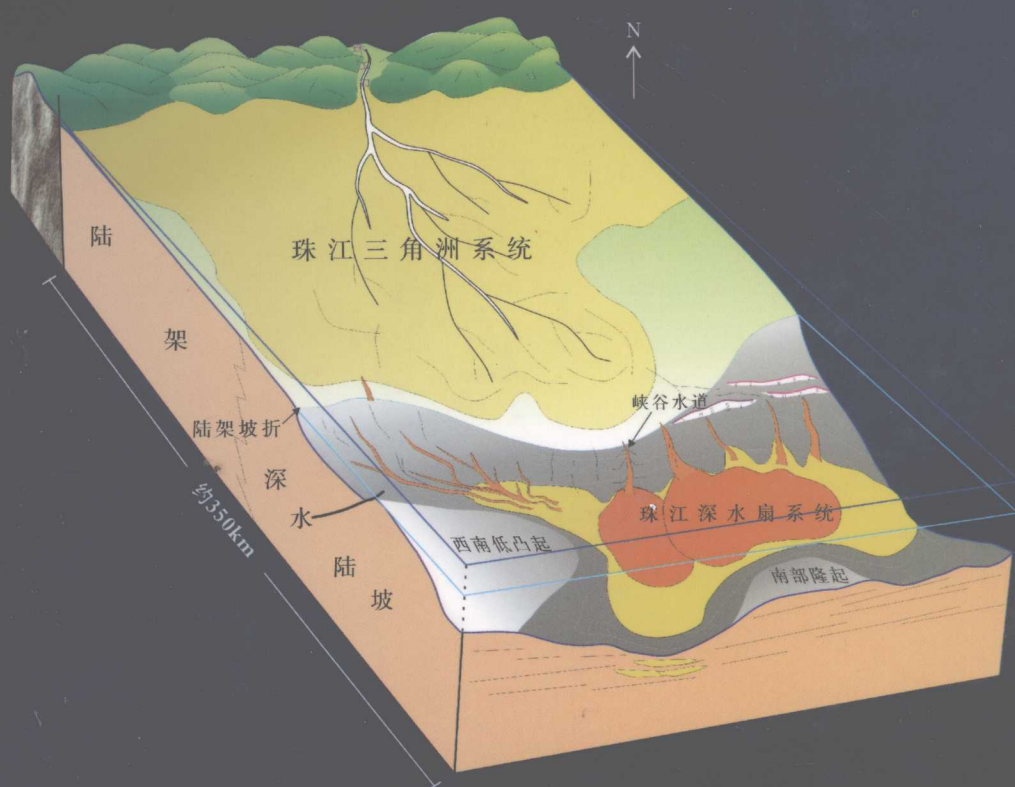


南海珠江深水扇系统及油气

The Pearl River Deep-water Fan System & Petroleum in South China Sea

庞 雄 陈长民 彭大钧 周 蒂 陈红汉 等著



科学出版社

www.sciencep.com



国家自然科学基金资助项目研究专著

南海珠江深水扇系统及油气

The Pearl River Deep-water Fan System & Petroleum in South China Sea

庞 雄 陈长民 彭大钧 周 蒂 陈红汉 等著

科学出版社

内 容 简 介

本书为国家自然科学基金委员会与中国海洋石油总公司联合资助重点项目“南海深水扇系统及油气资源”(40238060)的研究成果,该研究系统探讨了南海北部深水区珠江深水扇系统的地质背景、形成机理、沉积系统、成藏动力学与油气资源潜力等,取得了诸多创新认识,并推动了我国深水油气勘探。

本书是我国第一部研究南海深水油气地质的专著,汇集了大量第一手资料和南海北部陆架、陆坡区多年的研究成果,可供广大石油地质工作者和大专院校石油地质专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

南海珠江深水扇系统及油气/庞雄等著.—北京:科学出版社,2007.6

ISBN 978-7-03-018956-1

I. 南... II. 庞... III. 南海-油气-珠江深水扇系统-研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第067187号

责任编辑:钟如松 / 封面设计:庞 雄 柳保军

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

韶关二九〇研究所地图彩印厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年6月第一版 开本:890×1240 1/16

2007年6月第一次印刷 印张:22

印数:1—1000 字数:730000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《南海珠江深水扇系统及油气》主要研究者和作者名单

庞 雄 陈长民 彭大钧 周 蒂 陈红汉 朱 明 邵 磊
郑晓东 舒 誉 黄先律 何 敏 李劲松 孙 珍 申 俊
柳保军 王燮培 郝沪军 连世勇 王家豪 吴昌荣 黄春菊
游伟芳 朱俊章 陈照光 吴湘杰

全书由庞 雄、陈长民、彭大钧、柳保军、黄先律、申 俊等
编辑整理，庞 雄、陈长民最终定稿。

参与研究的成员还有：

陈汉宗 吴国瑄 石万忠 杨 飞 代一丁 汪瑞良 陈雪芳 秦成岗
杜家元 朱茫征 赵泉鸿 许鹤华 赵彦超 王存武 袁立忠 李淑英
叶 斌 吴梦霜 曹培军 张 昕 刘建章 李福元 雷永昌 高秋丽
陈传联 孙龙涛 甘其刚 徐华宁 屈 亮 宋艳阁 舒 虎 李宏伟

序

由庞雄、陈长民、彭大钧等著《南海珠江深水扇系统及油气》一书即将由科学出版社出版，我很高兴为本书写序。

2001年以中国海洋石油总公司陈长民先生等为首的专家组向国家自然科学基金委员会提出申请“南海深水扇系统与油气资源”的基础研究项目，当时我曾为该项目写了推荐书。2002年该项目获得批准后，由国家自然科学基金委员会和中国海洋石油总公司联合资助该项目，为期4年。该项目的主要研究者和参与研究的人员共有56名，历经4年辛勤工作，圆满完成了研究项目。

本书是在上述研究成果基础上公开发表的我国第一部研究南海北部陆架深水油气地质的专著。它汇集了大量第一性南海北部陆架和陆坡的地质、地球物理和ODP钻孔成果，提出了白云深水陆坡区在晚中生代处于弧前位置，导致了白云凹陷长期张裂沉降，堆积了11km厚的新生代巨厚沉积，提出了白云凹陷独特的断陷、断拗、拗陷的三重结构特征。应用层序地层学发现了珠江深水扇系统和23.8Ma重大地质事件。通过地球物理解释渐新世以来深水扇储层分布和扇体的内幕结构。全书资料翔实，立论严谨，图文并茂，是进一步研究和探索南海北部陆架和陆坡油气藏分布规律的价值文献。

我国海洋石油工业起步较晚，自上世纪80年代对外开放以来，中国海洋石油总公司和各地分公司在与国际跨国石油公司合作勘探开发海洋石油过程中全方位引进和吸收了许多先进技术，并在自营勘探开发海洋油气田中发展和再创新了这些技术。我国目前海洋石油勘探开发的主要地区仍在渤海、珠江口、北部湾、莺歌海和东海等水深不超过100~300m的浅海地区。当前世界范围的深水油气勘探开发的热点地区，如美国墨西哥湾、巴西坎波斯盆地、西非尼日利亚、安哥拉、加蓬和赤道几内亚等，英国和挪威的北海盆地等近10年来都不断有大油气田发现，深海勘探开发技术亦突飞猛进，日趋成熟。如2003年美国阿纳达柯公司在墨西哥湾发现的Atlas气田，海水深度已达2743m；2006年雪佛龙公司在墨西哥湾发现的Jake-2大油田，海水深度亦达2135m。近年来中国海洋石油深圳分公司在珠江口盆地番禺低隆起和白云凹陷的北坡已钻探发现了流花19-5、番禺30-1、番禺34-1等6个气田，2006年又在白云凹陷陆坡深水区水深1480m的中国海洋石油与加拿大哈斯基公司合作区块所钻的荔湾3-1-1井获得天然气发现，预示着我国南海深水

沉积中油气勘探具有广阔前景。这是“南海深水扇系统与油气资源”课题及本书理论联系实际、科研成果转化为生产力的具体体现，并为后续的研究工作者提出了一系列值得关注的问题。

中国科学院资深院士

李德生

2007年元月

前 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。自1993年我国由石油出口国转为进口国之后,经历多年需求的迅猛增长,2004年石油净进口已增至1.4亿吨,石油对外依赖度达45.2%,进口消耗外汇接近400亿美元,且仍保持上升势头,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、经济风云的变化与撞击。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油气新的勘探领域,强化我国的油气自给能力;在深入展开陆上油气勘探的同时,以更大的努力,更多的智慧,更广泛的集约英才与技术的能力向我国广阔的海域进军,那里在很大程度上是我国油气勘探取得新突破的重要领域。十多年来,在浅海范围内的初步勘探证明,这些海域是寻找大油气田并可以获得高回报的地区。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科学前缘问题。

2001年12月在中国海洋石油总公司的支持下我们向国家自然科学基金委员会提出自然科学基金重点项目“南海深水扇系统与油气资源”项目建议书。

2002年由国家自然科学基金委员会与中国海洋石油总公司联合资助该项目,为期4年。

本著作作为国家自然科学基金委与中国海洋石油总公司联合资助重点项目“南海深水扇系统及油气资源”(批准号:40238060)的研究成果。

近海油气勘探由中浅海向深海领域进军已成为国际趋势。我国南海珠江口盆地具有开展深水油气勘探的巨大潜力,这是本研究的重要背景。但是,地壳在深水的结构变化、沉积系统以及油气成藏系统与陆区和陆架区的巨大差异等都反映出深水领域地质条件有其独特性和复杂性。因此,把涉及深水地质领域的一大批基础科学和应用科学问题组成一个国家级的重点项目进行研究不仅极为必要,而且非常具有前瞻性。在当今能源形势下,汇聚精干的研究力量,创新地对“珠江深水扇系统及油气资源”进行基础性、前景性和油气潜力研究,不仅具有推动海洋地质学科理论发展的意义,更具有推动我国深水油气勘探的现实意义。

国家自然科学基金重点项目“南海深水扇系统与油气资源”是以南海北部珠江口盆地的白云凹陷深水区作为突破口,探讨珠江深水扇系统的形成机理、沉积系统、成藏动力学与油气资源潜力等。研究是在广泛调查、辨识与科学地吸收国际上有关深水扇系统研究的理论与油气勘探经验的基础上,以珠江口盆地第三系海相沉积为研究整体,以珠江深水扇系统为研究重点,从分析影响沉积作用的深部结构、建立南海第三系海平面变化曲线和高精度层序地层学框架等基础研究入手,深入探索南海陆坡沉积成因类型和形成机制,阐明珠江深水扇系统的分布规律和成因机理,建立珠江深水扇系统的沉积模式,研究深水扇系统内幕结构、圈闭类型和储层构成分布规律以及识别方法技术,探索珠江深水扇系统的油气成藏动力学过程,最终综合论证珠江深水扇系统油气资源潜力,以此指导我国深海油气勘探。

本研究历时4年,在发现珠江深水扇系统及其油气勘探潜力原始创新认识的基础上,形成了20多项创新认识,有力地推动了我国深水油气勘探,并在最近的深水钻探中获得重要发现,充分体现了科研促生产、研究成果转化为生产力的重大作用。其突出的成果包括如下几个方面:

(1)层序地层研究发现了珠江深水扇系统。以此揭示了珠江大河流域、陆架区大型珠江三角洲系统与陆坡区珠江深水扇系统的耦合关系,揭示了珠江深水扇系统与海平面变化的响应关系,揭示了珠江深水扇系统与古地理的响应关系。珠江深水扇系统的发现成为导致一系列相关地质学问题提出和创新研究的引擎,成为推动我国深海油气勘探,并在最近深水首钻

就获得重要天然气发现的地质基础。

(2) 论证了中生代俯冲带在南海东北部的展布,指出白云凹陷在晚中生代位于弧前盆地的位置、在新生代又位于构造变形和岩浆活动集中的构造转换带,是导致其长期强烈沉降和沉积巨厚新生代地层的重要因素。

(3) 发现珠江深水扇系统的沉积与喜马拉雅隆升、南海扩张存在明显的深部动力学联系和沉积响应关系。

(4) 特别明确地表现在巨大而稳定的古珠江水系所携带的巨量沉积物质,优质的、主要来自华南古陆火山岩系的碎屑沉积物,巨厚的、多层序的、可确认年代的低位深水扇系统,以及逐渐地在二级海平面海侵的控制下由浅水环境演变为深水环境、再进一步演变为深水饥饿环境等事实均从不同角度证实了南海珠江深水扇系统形成于重大的地质背景中,并受到重大地质事件的控制。

(5) 以珠江深水扇系统形成时间为耦合核心,把周边发生的重大地质事件与珠江深水扇系统的沉积特征关联起来,就可以从更宏观的、系统的观点观察与思考南海珠江深水扇的形成与主控因素,并将南海深水扇系统的主控因素概括为一球五源(缘)。

(6) 提出了白云凹陷具有断陷、断坳和坳陷的三层盆地结构,可能代表了洋-陆过渡地壳陆坡区张性盆地的一种新型成盆机制。

(7) 发现了控制珠江深水扇系统及珠江口盆地沉积作用,并且影响到南海扩张和珠江流域演变的 23.8Ma 重大地质事件(白云运动)。

(8) 确认珠江口盆地三级相对海平面变化与全球海平面变化具有一致性,但二级海平面变化存在明显差异,并表现为台阶式海侵,白云深水区总体呈现下粗上细的沉积充填组合,发育两种沉积层序类型,存在两种储层类型(浅水沉积和深水沉积储层)以及两种不同的圈闭与成藏类型。由此形成极为有价值 and 多样化的油气储盖组合,有着极为重要的油气勘探价值。

(9) 揭示出白云凹陷具有多地质事件、多盆地结构、多种沉积体系、多层序深水扇以及多组生储盖组合等形成纵向叠置的特征,从而形成极为有利的成盆、成烃和成藏的巨大沉积盆地,论证了白云凹陷具有重要的油气勘探前景。

(10) 形成了三级“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统的思路,有利于从宏观、中观和微观视角分层次地考察珠江深水扇系统沉积的地质条件,从成因上有层次地揭示深水扇的形成、发育演化和特殊性,以此建立的深水沉积模式和研究方法将对南海深水陆坡区油气勘探起到重要的指导作用。

(11) 对白云凹陷生烃地球化学特征、存在超压史、晚期断裂和底辟控制油气垂向运移的新认识,以及凹陷内存在大量浅层气亮点异常的新认识等,共同构成了珠江深水扇系统油气成藏的动力学基础。

珠江深水扇系统沉积及其油气资源潜力的研究成果有力地推动了我国深水区油气勘探,并导致了最近深水首钻就获得重大天然气发现。以科研推动白云深水区的油气勘探成效显著。

1) 白云凹陷系统的石油地质条件创新认识导致了在经过 5 家外国大型石油公司近 20 年勘探接连失利的白云北坡浅水区天然气藏群的发现。

2) 深水研究成果引起了中国石油工业界的广泛重视,在 CAPG 第一届年会(2004)上,邱中健院士在会议主题发言中把南海北部陆坡深水区作为中国 3 个有前景的新领域之一。

3) 2005 年国土资源部将南海北部深水陆坡区列为中国油气资源 6 大战略选区之一,并被视为最具潜力的新领域。

4) 2002 年以来有超过 60 家次国外石油公司来访了解白云深水区,白云深水区的勘探前景受到全球油气勘探界的瞩目。

5) 至 2006 年白云深水区的对外合作勘探进入新的历史阶段,4 家外国石油公司(加拿大哈斯基石油公司、美国科麦奇石油公司、美国丹文石油公司、英国 BG)分别于 2004~2006 年与中国海洋石油总公司签署了白云深水区 5 个区块(29/26, 43/11, 42/05, 29/06, 41/06)的石油勘探合同/勘探协议,标志着白云深水区已经进入了实质性的勘探阶段。

6) 我国第一口水深超过千米(探井水深达 1480m)的探井(LW3-1-1)已经成功钻探,并获得重大天然气发现,证实了白云深水区具有巨大的油气勘探潜力,实现了该项目创新成果的应用转化,科研推动深水油气勘探成效显著。

7) “南海珠江深水扇系统及油气资源”项目研究在取得多项创新成果基础上,撰写学术论文 50 篇,已有 38 篇在各种重要学术刊物上发表或已被采纳,其中 SCI 检索 5 篇, EI 检索 11 篇;参加各种国内外学术会议交流作学术报告 20 次,项目研究成果和水平得到同行业的认可和赞誉。

由国家自然科学基金委和中国海洋石油总公司联合资助的重点项目“南海深水扇系统及油气资源”的研究,体现了以国家发展需要为己任,面对机遇和挑战,努力增强自主创新能力;体现了国家利益与企业发展的一致性、基础理论研究创新发展与应用前景的有机结合;在意识上体现了思维和领域的创新,以科研促勘探的理念;在方式上体现了科研和勘探的结合;在方法上体现多学科结合,相互渗透和综合;在力量上体现产、学、研结合,老中青结合,实现多渠道力量的集成,同时把人员成长、学科领域的发展作为重要任务,人员结构体现继往开来,最终有效地实现了科研促勘探的目的。

深水油气勘探开发及其相关的观念、理论、技术及海洋工程等的创新成果将是实现中国海洋油气勘探开发事业可持续发展的重要基础之一!

国家自然科学基金委员会与中国海洋石油总公司联合资助重点项目
“南海深水扇系统与油气资源”(40238060)项目组

2006 年 12 月

目 录

序	(i)
前言	(iii)
第一章 深水沉积与深水油气勘探	(1)
第一节 深水油气勘探已在全球范围内取得空前成功	(1)
一、勘探水深不断增加	(3)
二、勘探成功率较高	(4)
三、勘探投资增加, 成本降低	(4)
四、深水区油气地质特征	(4)
第二节 深水油气区研究趋势	(9)
一、深水沉积研究已掀起热潮	(9)
二、深水油气勘探与研究的趋势	(10)
第三节 深水扇系统研究面临的问题与挑战	(16)
一、理论上的术语和概念的不确定性	(16)
二、缺乏对沉积过程的深入了解	(17)
三、缺少系统研究和内幕结构的剖析	(17)
四、面对实际应用的挑战	(17)
第四节 我国深水沉积研究现状	(17)
一、我国海洋地质科学研究现状	(18)
二、我国深水领域油气勘探现状与前景	(19)
第五节 白云深水陆坡油气聚集区发现的认识过程和阶段回顾	(20)
一、早期地质调查及评价阶段	(21)
二、凹陷北部中~浅水区勘探失利及再评价阶段	(21)
三、白云深水区研究再度引起重视及北坡天然气田群的发现阶段	(21)
四、国家自然科学基金重点项目“南海深水扇系统与油气资源”研究 与白云深水油气聚集区大发现阶段	(22)
第二章 南海北部区域地质构造与新生代陆坡演化	(23)
第一节 南海大地构造背景及中新世代演化	(23)
一、区域大地构造背景: 特提斯和古太平洋的演化以及东南亚大地构造分区	(23)
二、南海及邻区中生代演化与欧亚东南缘晚中生代俯冲增生带	(26)
三、南海及邻区新生代构造演化	(31)
第二节 南海北部构造发育特征	(36)
一、南海北部地壳结构特征	(36)
二、南海北部前新生代基底组成和结构特征	(38)
三、南海北部新生代沉积盆地发育特征	(42)
四、南海北部断裂发育特征	(44)
五、珠江口盆地新生代岩浆活动	(49)
六、南海北部中~新生代陆缘性质和构造应力场的转变	(49)
第三节 白云凹陷构造发育特征及新生代演化	(51)
一、白云凹陷及邻区的地球物理场特征	(51)
二、1530 深反射地震剖面的详细研究	(56)
三、白云凹陷基底岩性和结构特征	(62)
四、白云凹陷新生代演化史分析	(64)
第四节 白云凹陷构造演化的物理模拟	(65)

一、物理模拟实验的前提与假设	(66)
二、实验设置与实验材料	(68)
三、实验结果	(70)
四、模拟实验小结	(75)
第五节 白云凹陷成盆和持续沉降机理分析	(77)
一、白云凹陷的结构特点及其对成盆机理的启示	(77)
二、岩石圈热动力条件和岩浆活动	(79)
三、岩石圈伸展随深度变化和地下壳流动	(80)
四、白云凹陷位于伸展构造的转换带上	(81)
五、地幔的作用	(83)
第六节 白云凹陷新近纪沉积充填和陆坡结构演变	(84)
一、恢复陆坡区古地形的思路和复杂性	(84)
二、沉积层厚度的计算——时深转换	(85)
三、白云凹陷新近纪沉积速率和沉积充填样式的变化	(86)
四、回剥计算	(90)
五、沉积充填的正演模拟	(96)
第七节 小 结	(98)
第三章 珠江口盆地沉积环境和物源演化	(99)
第一节 生物地层学研究	(99)
一、ODP1148 站第三纪生物地层框架	(99)
二、PY33-1-1 井生物地层框架	(101)
第二节 南海渐新世以来构造演化历史	(105)
一、地层沉积间断	(105)
二、稀土微量元素分析	(105)
三、黏土矿物分布特征	(109)
四、南海构造演化历史	(112)
第三节 南海北部陆坡区沉积环境演变历史	(113)
一、沉积特征	(113)
二、沉积旋回及海平面变化	(121)
第四节 沉积物物源演化研究	(123)
一、沉积物地球化学特征	(123)
二、ODP1148 站沉积物物源演化	(126)
三、判别分析	(127)
四、南海北部沉积物相关性分析	(131)
第五节 南海北部渐新统-中新统重大地质事件(白云运动)及意义	(135)
一、渐新统-中新统分界面的确认	(136)
二、渐新统-中新统界面作为重要地质事件界面的证据	(136)
三、认识和讨论	(140)
第六节 小 结	(140)
第四章 南海北部陆坡珠江深水扇系统	(142)
第一节 从陆架到陆坡——南海珠江深水扇系统的发现	(142)
一、南海珠江口盆地深水区逐渐进入关注的焦点	(142)
二、深切谷与珠江深水扇系统的发现	(143)
第二节 白云深水陆坡区的层序地层学研究	(144)
一、层序地层格架级别的探讨	(145)
二、地震反射相位等时界面的确认	(146)
三、相对海平面变化与层序	(146)

四、层序类型及层序界面的确认	(147)
五、生物地层年代、相对海平面变化、全球海平面变化、古地理与沉积层序 的相互响应研究	(149)
六、层序格架内各沉积体的相互响应关系研究	(149)
第三节 珠江口盆地海平面变化特征	(151)
一、珠江口盆地相对海平面变化曲线	(151)
二、珠江口盆地相对三级海平面变化与全球海平面变化具有一致性	(152)
三、珠江口盆地二级海平面变化周期与全球海平面变化比较具有差异	(154)
四、珠江深水扇系统沉积与相对海平面变化的响应	(155)
五、台阶式海侵沉积层序组合的油气勘探意义	(156)
第四节 南海珠江深水扇系统的形成特征与控制因素	(157)
一、珠江深水扇系统形成的地质背景	(157)
二、陆坡深水区具有独特的纵向叠置特征并受深部热沉降制约	(157)
三、周边重大地质事件对珠江深水扇系统的控制	(160)
四、珠江深水扇系统是对应于青藏高原隆升的沉积响应	(161)
五、珠江深水扇系统的主控因素	(165)
第五节 白云深水区珠江深水扇系统的沉积特征	(166)
一、稳定的古珠江是主要供流系统	(166)
二、低位期沉积中心有适度迁移并受峡谷水道控制	(168)
三、表现出经典层序地层结构特征但内幕结构具有多样性	(169)
第六节 三级次“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统	(178)
一、第一级次的“源-渠-汇”耦合研究	(179)
二、第二级次的“源-渠-汇”耦合研究	(181)
三、第三级次的“源-渠-汇”耦合研究	(181)
第七节 珠江深水扇系统的形成模式	(184)
一、深水扇系统形成模式概述	(184)
二、珠江深水扇系统形成模式的构建思路	(188)
三、珠江深水扇系统的形成模式	(189)
第八节 小 结	(190)
第五章 珠江深水扇地球物理识别方法	(193)
第一节 珠江深水扇研究的现状与问题	(193)
一、珠江深水扇识别亟待解决的技术问题	(193)
二、珠江深水扇储层地球物理识别的难点	(193)
三、珠江深水扇地球物理识别研究对策与进展	(193)
第二节 珠江深水扇地球物理响应特征	(194)
一、深水扇岩石物理特征	(194)
二、深水扇地震响应特征	(196)
第三节 珠江深水扇地球物理识别方法	(198)
一、深水扇地球物理识别的研究思路	(198)
二、海上长电缆地震资料处理	(199)
三、珠江深水扇正演模拟方法	(200)
四、无井约束地震反演方法	(204)
五、地震属性分析方法	(209)
六、叠前地震反演方法	(210)
七、深水扇砂体分布的空间预测方法	(219)
第四节 小 结	(224)
第六章 白云深水区成藏动力学及油气资源潜力	(226)

第一节 南海北部深水领域油气勘探现状和基本地质	(226)
一、南海北部陆坡深水区属准被动边缘盆地	(227)
二、南海北部陆坡深水区成藏条件	(227)
三、南海北部深水区与国外被动陆缘深水盆地比较	(229)
第二节 白云深水区沉积充填演化及控制因素	(230)
一、白云凹陷的沉积充填及演化	(231)
二、白云凹陷沉积控制因素分析	(235)
三、小结	(236)
第三节 珠二坳陷湖相烃源岩的形成条件	(236)
一、珠二坳陷始新世-早渐新世时期具备潮湿的古气候条件	(236)
二、珠二坳陷断陷期发育大型湖相沉积环境	(238)
三、白云凹陷文昌-恩平组生烃潜力及地球化学特征	(242)
四、几点认识	(243)
第四节 白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积的发现及其意义	(243)
一、珠海组顶底界面及时代确定	(243)
二、珠海组浅海三角洲沉积的确认	(245)
三、珠海组三角洲沉积特征	(246)
四、认识及待深入研究的问题	(248)
第五节 珠二坳陷油气资源潜力评价	(248)
一、前期油气资源评价	(249)
二、白云凹陷的油气资源评价	(250)
三、珠二坳陷油气资源评价结果评述	(253)
第六节 白云北坡-番禺低隆起油气聚集规律	(254)
一、白云北坡-番禺低隆起天然气地球化学特征	(255)
二、番禺低隆起油气成藏过程分析	(265)
三、晚期断裂控制天然气运聚成藏是白云北坡天然气藏的成藏特色	(269)
第七节 白云凹陷地层压力特征及演化分析	(270)
一、番禺低隆起温、压条件	(271)
二、流体包裹体古流体压力热动力学模拟	(271)
三、白云凹陷地层压力数值模拟	(272)
四、晚期东沙运动是第3压力旋回泄压的动力背景	(278)
第八节 白云凹陷中央底辟带的发现	(279)
一、白云凹陷底辟构造的识别	(279)
二、白云凹陷底辟构造的形态分类	(280)
三、白云凹陷底辟构造的形成背景	(282)
四、白云凹陷中央底辟带发现的意义	(283)
第九节 白云深水区油气成藏条件及勘探前景	(283)
一、白云凹陷的烃源岩、储-盖、圈闭等地质单元的配置关系	(284)
二、白云深水区油气成藏的动力学条件	(289)
三、白云深水区有利油气成藏区	(295)
第十节 小 结	(296)
第七章 结语	(298)
一、创新成果	(298)
二、研究思路及研究方法	(303)
附 录	(304)
附录 I 深水沉积的基本概念	(304)
一、沉积物重力流的概念	(305)

二、沉积物重力流的形成条件.....	(305)
三、沉积物重力流的形成机制与过程.....	(306)
四、沉积物重力流的基本类型及其特征.....	(307)
五、沉积物重力流沉积相与相模式.....	(311)
六、深水沉积系统与深水扇系统.....	(312)
七、深水扇系统研究的有关学派及发展史.....	(314)
八、层序类型分析.....	(315)
附录 II 深水沉积研究的回顾与前瞻.....	(316)
一、深水沉积研究历史回顾.....	(316)
二、深水沉积研究存在的问题.....	(317)
三、对深水沉积研究存在问题的理解和前瞻.....	(320)
附录 III 世界重要深水油气田的构造特征.....	(321)
一、东巴西裂谷系和坎波斯(Campos)盆地.....	(321)
二、西非沿岸裂谷系和尼日尔三角洲.....	(328)
三、墨西哥湾盆地.....	(334)
四、南沙海槽盆地.....	(336)
五、其他深水含油气盆地.....	(338)
六、白云凹陷与世界深水油气盆地的比较.....	(339)
参考文献.....	(342)
后记.....	(361)

第一章 深水沉积与深水油气勘探

随着人类对油气能源需求量的增大及科学技术的快速发展，油气勘探开发从陆地走向海洋、从浅水走向深水是必然的发展趋势，海洋深水区的深水扇（海底扇）已成为目前国际油气工业研究重要而活跃的领域。

第一节 深水油气勘探已在全球范围内取得空前成功

世界上的深水油气勘探已经进行了近大半个世纪，特别是在最近 20 年许多研究者已对海底扇的地表露头进行了详细研究，大洋钻探也为人们提供了深入研究和了解现代海底扇体的良好机会，尤其是深水沉积系统中有大量的油气被发现和开采，都大大促进了对深水沉积过程的理解和对深水扇系统的研究。

自世界上第一个海上钻井平台于 1947 年安装在墨西哥湾水深 6m 的地方，至今已有 50 多年，在此期间相关科学和技术的发展迅速推动了海上油气田的勘探与开发（Pramanik 等，2000）。特别自 20 世纪 90 年代以来，国外深水勘探不断获得突破，有 60 多个国家进行了深水油气勘探，其中很多为巨型发现（图 1-1，表 1-1）。深水低位扇巨型油气田的接连发现，成为近 10 年来国际石油产量和储量增长的主体，预测 2000~2010 年世界将要开发的深水储量达 87.5681 亿吨油当量（王春修，2001）。

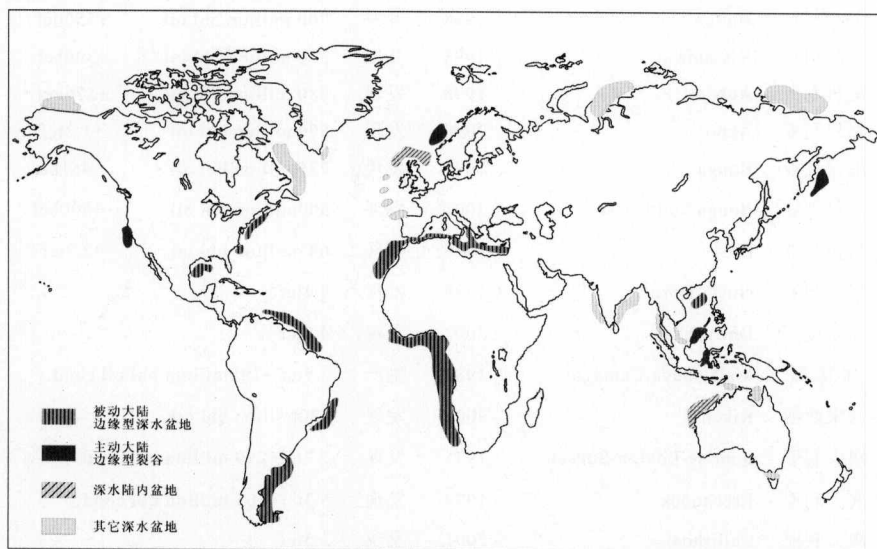


图 1-1 全球深水油气勘探略图（据 Stow 等，2000 修改补充）

目前从深水浊积岩及其相关体系中已知的油气田（包括新发现和在生产中的）约有 1200 到 1300 个（Stow et al., 2000），这还不包括俄罗斯、前苏联和中国公开发表的数据。在 Pettingill（1998）关于世界主要浊积岩油藏（包括很多深水块状砂岩油藏）的简略回顾中，列举了 54 个盆地中 925 个油田的文献，其中 43 个油田可以划为巨型油田（大于 50 亿桶原油当量）。这些巨型油田主要是位于离散大陆边缘，包括墨西哥湾、坎波斯盆地、尼日尔三角洲、刚果/安哥拉地区、北海 Shetlands 西部、澳大利亚西北陆架的 Margarita 盆地等。仅 20 世纪 90 年代的 10 年间，世界上共有 67 个大型油气田被发现（>500 MMBOE 的可采储量）（Pettingill H. S., 2000）。

按照盆地背景，大陆边缘盆地提供了 20 世纪 90 年代中所发现的资源的大半，而深水（500m 及更深）油气发现十分突出，大多数发现于 20 世纪 90 年代末的 4 年中，并位于沿巴西、非

洲、墨西哥湾的大西洋边缘的新生代储层之内。目前世界深水扇勘探热点主要分布在墨西哥湾盆地、巴西坎波斯盆地、西非近海盆地、北海盆地、挪威大陆架、澳大利亚西北陆架、西伯利亚、地中海、孟加拉湾以及南海的周边等地区。

表 1-1 世界重要深水油气田发现列表 (据 Petroconsultants, 2003)

盆 地	国 家	发 现 名 称	发现 年份	状态	可采储量	水深 /m
墨西哥湾	美国	Mars	1989	生产	486 million bbl oil; +504 bcf	1014
墨西哥湾	美国	Tahiti	2002	发现	502 million BOE	1231
墨西哥湾	美国	Thunderhorse	1999	发现	1.0 billion BOE	1963
坎波斯(Campos)	巴西	1-Ess-121	2002	发现	660 million bbl oil	1426
坎波斯(Campos)	巴西	Albacora	1993	生产	872million bbl oil +549bcf	1000
坎波斯(Campos)	巴西	Barracuda	1989	生产	807 million bbl oil +316bcf	1160
坎波斯(Campos)	巴西	Marlim	1985	生产	2.7 billion bbl oil +1.2tcf	853
坎波斯(Campos)	巴西	Marlin Sul	1987	生产	2.5 billion bbl oil +1.3tcf	1120
坎波斯(Campos)	巴西	Roncador	1996	生产	2.9 billion bbl oil +1.75tcf	1853
Santos	巴西	1-RJS-582	2002	发现	2.9 billion bbl oil +1.76tcf	1493
Santos	巴西	1-SPS-35	2003	发现	7.7tcf	485
More	挪威	Ormen Lange	1997	发现	13.2tcf +138 million bbl cond.	886
Nile Delta	埃及	Scarab-Saffron	1998	生产	4.5 tcf total	612
Nile Delta	埃及	Simian	1999	发现	2.5-4.0 tcf	579
Lower Congo	安哥拉	Dalia	1997	开发	900 million bbl oil +450bcf	1360
Lower Congo	安哥拉	Girassol	1996	生产	725 million bbl oil +950bcf	1365
Lower Congo	安哥拉	Hungo	1998	开发	700 million bbl oil +150bcf	1202
Lower Congo	安哥拉	Kissanje	1998	开发	500 million bbl oil +300bcf	1011
Niger Delta	尼日利亚	Agbami	1998	发现	780 million bbl oil +576bcf	1435
Niger Delta	尼日利亚	Akpo	2000	发现	590million bbl oil +1.2tcf	1366
Niger Delta	尼日利亚	Bonga	1995	发现	735million bbl oil +451bcf	1125
Niger Delta	尼日利亚	Bonga Southwest	2001	发现	500million bbl oil +500bcf	1245
Niger Delta	尼日利亚	Bosi	1996	发现	683million bbl oil +2.3tcf	1424
Niger Delta	尼日利亚	Nnwa-Doro	1999	发现	4.4tcf	1283
Krishna Godavari	印度	Dhirubhai	2002	发现	4.8tcf	1006
W. Palawan	菲律宾	Malampaya-Camago	1989	生产	3.5tcf +198million bbl oil cond.	736
Baram (Sabah)	马来西亚	Kikeh	2002	发现	530million bbl oil	1341
Bonaparte	澳大利亚	Sunrise-Loxton-Sunset	1975	发现	7.7tcf+299 million bbl cond.	159
Browse	澳大利亚	Brechnock	1979	发现	5.3tcf+103 million bbl cond.	543
Carnarvon	澳大利亚	Callirhoe	2001	发现	3.5tcf	1221
Carnarvon	澳大利亚	Chrysaor	1995	发现	2.9tcf+75 million bbl cond.	806
Carnarvon	澳大利亚	Geryon-Othrus	1999	发现	4.0tcf+1.2 million bbl cond.	1231
Carnarvon	澳大利亚	Io	2001	发现	Included in Jansz	1352
Carnarvon	澳大利亚	Jansz	2000	发现	20tcf+54million bbl cond.	1321
Carnarvon	澳大利亚	Scarborough	1979	发现	6.0tcf	912

20 多年来的勘探实践证明, 深水区是油气蕴藏极为丰富的领域。尤其是近 15 年来, 在 南美、西非大西洋沿岸、墨西哥湾、北海、巴伦支海、喀拉海以及东南亚、澳大利亚西北大 陆架等海域相继发现了许多大型油气田, 其勘探领域已扩展到水深 3000 m 的深海区。尤为 引人注目的是墨西哥湾、南美和西非大西洋沿岸已成为目前世界深水油气勘探的热点地区。

例如巴西坎波斯盆地, 20 世纪 70 年代初开始勘探, 1984 年开始进入深水陆坡区, 至 20 世纪 90 年代末已发现油气田 66 个, 总储量 112.15×10^8 桶 (油当量), 其中大部分位于水深

400~2000 m 的深水区。如 Marlim 油田, 可采储量为 41.54×10^8 桶 (油当量), Albacora 油田可采储量为 18.09×10^8 桶 (油当量)。该区创造了当时世界最深水钻井 (1-RJS-538 井水深 2443 m) 和最深水油田开发 (Marlim South 水深 1709 m) 记录。2000 年巴西石油日产量近 130×10^4 桶, 其中有 70% 来自 400~2000 m 的深水区。巴西石油公司在坎波斯盆地中开发的油气田日产原油 68×10^4 桶, 日产天然气 $1060 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前, 该公司所属的 6 大区块证实有 42×10^8 桶的地质储量 (Palagi, 2002)。

在西非安哥拉的下刚果盆地, 1996 年在 1300 m 的深水区发现了 Girssol 油田之后又相继发现了 Dalia 等油田, 其储量均在 $(7 \sim 15) \times 10^8$ 桶。据 1997 年统计, 西非地区石油总储量为 173.4×10^8 桶, 比 1996 年增长 22 %, 新增储量 31.6×10^8 桶, 其中 28.6×10^8 桶位于深水区。该地区每口探井控制储量从 1995 年的 22.5×10^6 桶及 1996 年的 35.5×10^6 桶增至 1997 年的 71.5×10^6 桶 (20 口预探井), 深水区单井控制储量为 159×10^6 桶, 而浅水区单井控制储量 7.0×10^6 桶 (20 口预探井)。据 Texaco/Famfa 石油公司报道, 该公司在尼日尔三角洲的 216 矿区 1400 m 深水区也发现了大油田, 发现井为 Agbami-1 井。到 2001 年, 尼日利亚的 34 口探井已发现原油可采储量 40×10^8 桶左右, 天然气可采储量 $7075 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。尼日利亚政府制定的油气生产目标是在 2010 年日产达到 400×10^4 桶, 储量达 400×10^8 桶。那时, 深水油气产量要占总产量的一半, 储量占总储量的五分之一才能达到这一目标 (Pettingill, 2002)。

安哥拉的石油生产仅次于尼日利亚, 但其深水油气的发现和开发居首位。安哥拉重要的含油气区主要位于下刚果盆地的 14、15、17、18 区块, 这几个区块原油可采储量在 100×10^8 桶以上。

墨西哥湾盆地也是深水区勘探最成功的地区之一。至 1998 年 1 月, 在水深 >305m 的区域已发现油气田 104 个, 其中 30 个已投产。位于 AC600 区块的 Baha 油田, 水深 2324m; Mensa 油田已投产 (水深 1625m)。1998 年 Chevron 公司在 AC118 矿区所钻的初探井位于 2354m 的深水区, 近年来在深水区又相继发现了 Mad Dog、Mirage、Magnolia 等油田。2000 年美国在墨西哥湾大于 305m 的深水区石油产量达到 2.71×10^8 桶, 天然气产量为 $277.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2001 年深水油气产量继续增加, 比 2000 年增加了 24 %, 天然气增加了 20 % 左右。由于深水油气产量的增长, 2001 年美国在墨西哥湾年产原油 5.9×10^8 桶, 其中一半以上产于水深大于 200m 的区域, 天然气产量也有增长, 产量为 $1435.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中浅水天然气产量持续下降。2006 年 9 月初 Chevron 公司宣布, 在墨西哥湾新奥尔良西南 500.04km 发现 Jack 油田储量 150 亿桶油, 水深 2135m; 2006 年 3 月在 Veracruz 州海岸 Coatzacoalces 港以南 111.12km 处新发现的 Noxal 大油田, 预计储量为 100 亿桶油, 较墨西哥最大的油田 Cantarell 还要大 (Chevron, 2006)。

此外, 北海地区 (特别是挪威) 的深水区油气资源同浅水区一样丰富, 勘探开发潜力也十分巨大。据预测, 1999~2007 年北海深水区待开发石油储量达到 77.45×10^8 桶油当量 (Vergala, 2001)。

在东南亚及南海海域, 近年来在深水区也不断有新的油气田发现 (表 1-1)。如巴拉望近海水深 864 m 的 Malampaya 油田和水深 350 m 的 Linapacan 油田; 印尼东加里曼丹近海发现的 Seno 油田, 也位于 823.5m 深水区, 估算储量为 $(2.1 \sim 7.2) \times 10^8$ 桶 (油当量), 在东印尼宾图尼盆地深水区发现的 Tangguh (Weriagar, Vorwata) 气田, 证实储量 13tcf, 远景储量 20tcf, 这是近年来东南亚最大的发现, 也是 ARCO 公司有史以来的第三大发现。

近年来, 深水油气勘探呈现如下特点。

一、勘探水深不断增加

自从 50 多年前首次在海底打钻以来, 随着石油工业技术尤其是钻井技术的迅速发展, 海上油气钻探的水深不断增加。1949 年海上钻井水深仅 5m; 到 20 世纪 80 年代中期进入 500 m 水深领域; 90 年代后期更是快速发展, 突破 1000 m 大关, 1999 年已超过 2000m; 2001 年 5 月 9 日 Unocal 公司在墨西哥湾的 Alaminos Canyon 903 区块的一口探井水深达 2953 m, 创造了深水油气钻探新的水深记录。随着钻探水深的不断增加, “深水”这一概念也不断发生变化。20 世纪 60 年代常指水深大于 100 m 的区域, 70 年代常指水深大于 200 m 的区域, 80 年代为