



成都理工大学
能源学院
60周年校庆文集

CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
COLLEGE OF ENERGY
THE 60TH ANNIVERSARY

南海西北部陆坡

形成、演化及油气成藏条件

韩建辉 王英民 著



科学出版社

南海西北部陆坡形成、演化 及油气成藏条件

韩建辉 王英民 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

南海西北部陆坡是包括琼东南盆地、西沙隆起、中建南盆地等构造单元的一个复杂陆坡体系。本书以南海西北部陆坡整体作为研究对象,探讨了该陆坡的地质结构、形成及演化;总结了在陆坡演化过程中的沉积特征及演化规律;通过与电性被动陆缘油气成藏条件对比,指明该区油气勘探的方向。

本书适合从事石油地质、盆地分析的科研人员以及石油、地质院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

南海西北部陆坡形成、演化及油气成藏条件 / 韩建辉, 王英民著. —北京: 科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-048845-9

I. ①南… II. ①韩… ②王… III. ①南海-大陆坡-海洋地质学-研究 ②南海-大陆坡-油气藏形成-研究 IV. ①P736.527 ②P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 133942 号

责任编辑: 杨 岭 黄 桥 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张: 9.5

字数: 220千字

定价: 79.00元

前 言

对南海西北部陆坡的研究多是将现今陆架坡折到琼东南盆地及西沙海槽作为研究对象,而从被动陆缘的演化角度看,南海西北部陆坡是一个包括琼东南盆地、西沙隆起、中建南盆地等构造单元的复杂陆坡体系,应作为一个整体加以研究。本书从被动陆缘的一般规律入手,论述了南海北部陆坡分段性、边缘类型、地质结构、构造特征及演化、沉积特征及演化、油气成藏条件及勘探方向。虽然本书只是南海西北部陆坡的初步研究成果,许多地方还有待进一步深化,但目前已取得的成果对提高陆坡形成演化的理论研究,提高该地区的科学研究及油气勘探水平有一定帮助。

本书受以下项目资助:①国家重点基础研究发展计划(973 计划)“南海深水区盆地远源碎屑岩沉积机理研究”;②国家自然科学基金项目“深水单向迁移水道的成因机理及其内的浊流、内潮流与等深流交互作用研究”(编号:41372115);③高等学校博士学科点专项科研基金“利用正钬(Eu)异常重建晚新生代南海西北部物源转换的时间序列”(编号:20125122120022)。

全书共分 8 章,第 1~2 章介绍了本书的研究目的、意义、研究思路、技术路线以及南海西北部陆坡的地质概况。

第 3 章根据地壳结构和地貌等特征将南海北部被动陆缘划分为西、中、东三段。讨论了南海北部大陆边缘的类型,认为三段均属于非火山型被动大陆边缘。探讨了南海海盆扩张的动力机制,认为南海是在被动裂谷基础上发育起来的。

第 4~5 章探讨了南海西北部陆坡的形成及演化规律。以陆坡转换不整合、分离不整合和裂开不整合将其新生界划分为裂陷、缓慢拗陷、快速拗陷三个构造层序。缓慢拗陷阶段为宽陆架、窄陆坡的特征,快速拗陷阶段则转变为窄陆架、宽陆坡的特征。分离不整合和陆坡转换不整合具有横向迁移特征,分离不整合首先出现在南海西北部陆坡的东部,随后向西迁移;转换不整合的形成、演化受构造沉降和沉积供应联合控制,首先出现在西部和东部,中部稍晚。依据缓慢拗陷阶段的古构造(厚度)和现今构造特征,南海西北部陆坡可划分为陆架外缘斜坡、陆坡拗陷、隆内斜坡、陆坡隆起、隆外斜坡五个带,它们在断裂特征、构造样式、沉降史和岩浆活动等方面均存在差异。研究区的基底固结程度低、地壳不均匀减薄、地幔隆起区活跃等特征控制了拗陷与隆起的形成和分布,并影响各阶段的分带性。

第 6 章论述了南海西北部陆坡的沉积演化规律。在裂陷早期发育了近物源扇体、分隔性湖泊和局限浅海沉积;裂陷晚期断裂活动减弱,发育了大型三角洲和滨岸体系。缓慢拗陷阶段以平缓地形背景下的滨浅海和碳酸盐岩台地沉积为特色。在快速拗陷阶段,北部发育了大规模陆坡进积楔状体,西部发育了巨型红河扇,南部发育了孤立碳酸盐岩台地、淹没台地和台缘斜坡。古隆起、古凸起、古突起等构造背景控制了南海西北部孤立碳酸盐岩台地的形成和演化。研究区的陆坡海底重力流体系可依据物源类型及搬运方

式划分为五种：北部的近距离陆源碎屑斜坡滑塌—浊积扇/海底扇、西部的远距离陆源巨型海底扇、轴向峡谷重力流沉积、内碎屑碳酸盐岩滑塌—峡谷重力流沉积、碳酸盐岩台地边缘斜坡重力流沉积。该区具有多物源、多方向及多种搬运机制的物质输送—分散特征。琼东南盆地西部发育了巨型海底扇，即红河扇。其发育史体现了晚中新世盆地沉降和青藏高原、中南半岛隆升的效应。

第7章论述了研究区油气成藏条件及勘探方向。在以上研究的基础上，通过对比分析，认为南海西北部油气成藏条件与典型被动大陆边缘盆地既存在共性，也有较大差异。南海西北部深水油气勘探应充分考虑本地区的具体地质特征。研究区的隆内斜坡带发育有较大规模的优质烃源岩和多套储盖组合，其断拗转换期及缓慢拗陷期形成的储集层是本区深水油气勘探的首选方向。

第8章对本书的主要内容进行了简单总结。

由于作者的学术水平和研究能力有限，书中可能存在谬误，请各位专家批评指正。

作者

2016年4月

目 录

第1章 引言	1
1.1 选题目的及意义	1
1.2 国内外研究现状及存在的主要科学问题	1
1.2.1 深水油气勘探现状	1
1.2.2 被动大陆边缘研究现状	3
1.2.3 南海研究现状	6
1.2.4 研究区存在的主要科学问题	8
1.3 研究内容与技术路线	9
1.3.1 研究内容	9
1.3.2 技术路线	10
第2章 区域地质概况	11
2.1 南海西北部基本地貌特征	11
2.1.1 西北次盆地地貌	11
2.1.2 西北部陆坡区地貌	11
2.1.3 西南海盆地地貌	13
2.2 南海地区区域构造格局	13
2.3 南海地区断裂体系	14
2.4 南海西北部地壳结构与基底特征	15
2.4.1 地壳结构	15
2.4.2 基底特征	16
2.5 古南海及周边地区构造活动简史	16
2.6 地层特征	18
第3章 南海北部陆缘类型及盆地动力机制	21
3.1 南海北部陆缘的分段性	21
3.2 南海北部被动陆缘的类型	23
3.2.1 火山型被动陆缘和非火山型被动陆缘	24
3.2.2 关于南海北部被动陆缘类型的讨论	25
3.3 南海扩张的动力学机制探讨	28
3.4 南海扩张的历史	30
第4章 南海西北部陆坡的地质结构	33
4.1 南海西北部陆坡区构造层序	33
4.1.1 典型被动陆缘的构造层序划分	33
4.1.2 南海西北部陆坡区主要层序界面及构造层序划分	34

4.2 南海西北部陆坡地质结构	38
4.2.1 南海西北部陆坡地质结构	38
4.2.2 陆坡隆起带与拗陷带的普遍性及成因机制	42
4.3 构造区划	44
4.3.1 裂陷层序构造区划	45
4.3.2 缓慢拗陷层序构造区划	46
4.3.3 快速拗陷层序构造区划	47
第5章 构造特征与演化	49
5.1 断裂特征	49
5.1.1 平面分布特征	49
5.1.2 断层活动性	51
5.1.3 变形期次	52
5.1.4 南海西北部陆坡的多边形断层系统	53
5.2 构造样式与盆地结构	59
5.2.1 构造样式	59
5.2.2 盆地结构	65
5.3 沉降史	69
5.4 岩浆活动特征	70
5.4.1 岩相类型	71
5.4.2 岩浆活动的期次及分布	71
5.4.3 岩浆活动的作用	73
5.5 陆坡的形成与构造演化	74
5.5.1 中沙海槽的形成与演化	74
5.5.2 陆坡隆起带典型台地的形成与演化	76
5.5.3 南海西北部陆坡的形成与演化	77
第6章 沉积特征及演化规律	88
6.1 主要沉积相类型及其地震相特征	88
6.1.1 典型沉积体及其地震相	88
6.1.2 主要泥质非骨架相及其地震相特征	91
6.2 南海西北部陆坡古地貌特征	91
6.2.1 裂陷阶段古地貌特征	91
6.2.2 缓慢拗陷阶段古地貌特征	92
6.2.3 快速拗陷阶段地貌特征	92
6.3 南海西北部陆坡沉积演化	94
6.3.1 裂陷期的沉积演化	94
6.3.2 缓慢拗陷期沉积演化	95
6.3.3 快速拗陷期沉积演化	96
6.4 典型沉积	96
6.4.1 海相断陷	96

6.4.2 孤立碳酸盐岩台地的形成和演化	98
6.4.3 海底重力流体系	103
6.4.4 红河扇	111
6.5 陆坡调整模式	118
第7章 油气成藏条件及勘探方向	121
7.1 南海西北部与典型被动陆缘盆地油气成藏条件比较	121
7.1.1 烃源岩	121
7.1.2 储集层	123
7.1.3 盖层	125
7.1.4 圈闭	125
7.1.5 运移和聚集	126
7.1.6 小结	126
7.2 南海西北部陆坡油气成藏条件比较研究及有利勘探方向	128
第8章 结论	132
参考文献	134
索引	141

第 1 章 引 言

1.1 选题目的及意义

本书来源于国家重点基础研究计划(973 计划)科技项目“南海深水区盆地远源碎屑岩沉积机理研究”、国家自然科学基金项目“深水单向迁移水道的成因机理及其内的浊流、内潮流与等深流交互作用研究”、中石油辽河油田分公司“西沙隆起周缘层序地层及油气成藏组合分析”。本书是在这些项目的基础上进一步深化的结果。

我国南海油气勘探尚处于起步阶段,对盆地的结构、演化、成藏条件的认识尚不成熟。虽然我国陆续发现了一大批浅水油田,年产量达 $1.0 \times 10^7 \text{t}$ 以上,但是深水区域目前的勘探成效有限,与全球深水油气勘探的差距较大,南海北部深水区具有巨大的油气勘探潜力^[1-3]。

我国深水油气勘探刚刚起步,对南海北部深水区的地质条件和成藏条件了解尚浅,琼东南盆地中央坳陷带及其以南区域更是如此。因而,针对西北部陆坡的地质结构、演化过程、动力学机制、沉积演化规律、油气成藏条件等关键科学问题进行的研究对南海西北部油气勘探有着重大意义。

本书针对上述油气前缘和热点科学问题开展研究,以系统论方法,将南海西北部复杂陆坡作为一个整体加以研究。南海西北部陆坡具有复杂分带性,每个带都具有其典型的构造、沉积特征,但总体上又在同一个陆坡框架内,具有较强的规律性。本书拟在同一陆坡框架内对各个带进行详细研究,从沉积盆地的地质特征出发,以南海西北部陆坡的典型区域地震大剖面及区域背景资料入手,分析南海北部边缘的类型及西北部陆坡区的地质结构,探讨其演化动力学机制,研究其沉积演化规律,分析油气成藏条件。通过以上研究,为南海深水油气勘探提供新思路、新认识。因此,本书既具有重要的理论意义,也具有不可忽略的应用前景和社会价值。

1.2 国内外研究现状及存在的主要科学问题

1.2.1 深水油气勘探现状

1. 世界深水油气勘探现状

20 世纪 70 年代末期,世界油气勘探开始涉足深水海域。随着全球对能源日趋增长的需求,陆坡深水盆地的油气勘探开发不断升温。近 30 多年来,在南美巴西、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、澳大利亚西北等被动大陆边缘深水海域，相继发现了许多大型油气田(见表 1-1)，勘探领域扩展到了水深 3000m 以下的深海区域，深水油气勘探开发俨然已成为当今世界油气增储上产及油气资源战略接替的重要新领域^[4]。

表 1-1 世界深水油气储量分布^[4]

国家/地区	盆地/海域	储量/10 ⁸ t	石油/10 ⁸ t	天然气/10 ⁸ m ³
西非	尼日尔三角洲 下刚果、宽扎	28.6	24.5	4100
巴西	东南部海域	27.3	23.2	4100
美国	墨西哥湾北部	21	15	6000
澳大利亚	西北陆棚	13.6	0.5	13100
东南亚	婆罗洲	5.3	2	3300
挪威	挪威海	5.1	1.1	4000
埃及	尼罗三角洲	4.8	—	4800
中国	南海北部	1	—	1000
印度	东南海域	1.6	—	1600

深水油气资源非常丰富，据美国地质调查局和国际能源机构估计，全球深水区最终潜在石油储量有可能超过 1000×10⁸ bbl^①。而随着深水油气勘探的深入，实际储量很可能远超此数。深水海域中 90% 油气储量均富集于深水浊流沉积体系之中，地域范围则主要集中分布于具有被动大陆边缘背景的墨西哥湾、西非与巴西三大区域的沉积盆地^[4]。

深水油气勘探程度低，资源探明率较低，尚处于勘探早期阶段，资源潜力巨大。同时，与陆上油气勘探比较，深水油气勘探具有技术要求高、资金风险高、作业难度高等特点，因此对油气藏的储量规模要求较高。Weimer 等^[4]在 2006 年曾指出，深水勘探技术要求高、投入大、风险大，但油田规模大，钻探发现的成功率高。自 20 世纪 90 年代以来，深水勘探成功率显著提高，平均超过 30%。据统计，截至 2006 年底，全球共发现 40 余个探明储量超过 5.0×10⁸ bbl 的大型深水油气田，占全球深水油气储量的 80% 以上。

总的来说，深水油气资源潜力巨大，且集中于被动大陆边缘盆地。这些盆地深水勘探前景好，勘探程度低，并且存在大量新区有待勘探开发。因此，被动大陆边缘的深水勘探将逐渐成为全球油气工业发展的主战场^[5]。

张功成等^[6]总结了深水区油气勘探热点地区的勘探经验，并提出了以下观点：从盆地类型看，探区主要是被动大陆边缘型盆地，且与中生代以来全球板块的裂离事件有关；从含油气系统看，主要烃源岩是大陆裂谷早期陆内裂谷阶段形成的中深湖相泥岩和漂移阶段的海陆过渡相泥岩，主要储层是三角洲和各种扇体，主要的圈闭类型是盐构造和同生断裂构造；从勘探策略看，都是先在浅水区获得成功以后再向深水区推进，这样可以极大地降低深水区勘探风险和提高勘探成功率。

① 1bbl=0.1173m³。

2. 南海的油气勘探现状

自1910年和1929年分别在马来西亚和文莱境内发现米里油田和诗里亚油田以来,南海海域的油气勘探已经经历了一百年的历史。据不完全统计,目前南海已经发现各类油田107个,气田162个^[7]。在南海深水盆地周边,如南沙、文莱、马来西亚等地区的油气资源相当可观^[8,9],从而印证了南海深水勘探的广阔前景。

我国深水油气勘探和研究起步比较晚,经历了初探阶段、自营勘探、合作勘探等3个阶段。在初探阶段(1965年以前)推测莺—琼盆地为含油气远景区。在自营勘探阶段(1965~1979年)确定了莺歌海盆地和琼东南盆地的界限,发现了松涛32-2含油构造,证实琼东南盆地是含油气盆地。在合作勘探阶段(1979年至今)发现了崖13-1大气田(1983年)、崖13-4气田(2000年)和其他8个含油气构造。上述工作主要集中在北部坳陷带以及中部坳陷带的部分浅水区域内,对深水区内的南部坳陷带涉及很少,目前没有任何探井,只有少量地震测线。

1997年中海油总公司与挪威石油公司在珠江口盆地合作开发了陆丰22-1油田,该井水深332m,初步涉足深水。2004~2005年,中海油总公司与赫斯基公司合作,在珠江口盆地40/30区块钻了第一个预探井,井位水深约600m。2006年,继续在珠江口盆地的29/26勘探区块钻探LW3-1-1井,水深超千米,首次在深水区发现大气田,进一步证实了南海北部陆坡深水区具有巨大的油气潜力,从此揭开了南海北部深水区油气勘探的序幕。

近年来,各大石油公司加快了南海深水油气勘探的步伐。中海油在南海深水陆坡区及邻近区钻探了23口井,采集了 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 地震资料;除此之外,中石油和中石化也开始向深水油气勘探领域进军,并已在琼东南盆地南部、中建盆地以及浪花断陷区等陆坡深水区采集了约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的二维地震资料以及上千平方千米的三维地震资料,相应研究工作也已全面展开。

1.2.2 被动大陆边缘研究现状

目前,深水油气绝大部分赋存于被动陆缘盆地,学术界为此投入了相当多的精力。Bally^[10]、Kingston等^[11]学者分别从垂向序列和演化阶段的角度研究了盆地沉降的动力学机制。Edwards和Santogrossi^[12]主编的论文集《离散或被动陆缘盆地》对重点被动陆缘盆地进行研究,着重总结了被动陆缘盆地的油气成藏条件。Weimer等^[4]在《深水石油地质导论》中从油气勘探的角度对被动陆缘盆地进行了分类。

1. 被动大陆边缘的定义

Bally^[10]提出“大西洋型”被动大陆边缘的概念。认为其基本特征是跨越陆壳和洋壳,发育有陆架、陆坡和陆裾,在垂向上包括四个层序:①属于克拉通内部坳陷或活动大陆边缘的裂谷前层序;②裂谷层序;③过渡—漂移早期局限相层序;④漂移晚期的进积层序。它属于位于刚性岩石圈上的盆地大类,与洋壳有关的盆地亚类。

《离散或被动大陆边缘盆地》中对被动大陆边缘盆地给出如下定义^[12]:所有的被动

陆缘盆地都是发育在邻近板块间的大陆边缘,上覆并横跨在陆壳和洋壳之上。这些盆地现在基本上无地震和火山活动。所有现存的离散大陆边缘都是在三叠纪后产生,并与泛大陆的一系列解体有关,它们代表了地球历史中威尔逊旋回的开阔海部分。被动陆缘盆地的内侧根部位于海岸平原大陆架和陆坡之下变薄的下沉陆壳上,其外侧位于陆坡和陆裾下面下沉的洋壳上。这些盆地的多期发育史的所有阶段均以重力驱动的拉伸构造为主。因此,它们又被称为离散边缘、拉伸边缘或者大西洋型边缘。被动大陆边缘发生盆地规模的沉降是由地壳的机械减薄、热收缩和沉积载荷引起的。其演化十分复杂,可以形成范围广泛的特殊沉积层序和构造样式。

Miall^[13]认为离散边缘包含裂谷盆地、大洋边缘盆地、拗拉谷和大洋岛屿海山海底高原四类,而大洋边缘盆地相当于上述的被动大陆边缘盆地。

Klein^[14]的盆地分类中,将被动大陆边缘作为一种大的背景,其下划分了裂谷盆地、拗拉谷和挠曲盆地,挠曲盆地则相当于上述的被动大陆边缘盆地。

陆克政等^[15]编著的《含油气盆地分析》中总结被动陆缘的概念为:被动陆缘位于板内,其两侧的大陆与大洋属于一个统一的板块。由大陆架、大陆坡和陆裾(或称陆基)所组成。它的形成与岩石圈离散活动有关,岩石圈张开经历了大陆内部裂谷阶段—红海或原始大洋阶段—窄大洋或内海阶段—大西洋式被动大陆边缘阶段。每个阶段均形成了各自的层序并依次叠置。被动大陆边缘下伏的、较早形成的裂谷层序主要受张裂作用所控制。被动大陆边缘下沉的主要原因包括岩石的拉伸变薄变冷、地壳蠕变、沉积负荷、深层变质等。在被动大陆边缘有复杂的陆坡推进过程,它受陆架沉降、海平面变化、构造运动和沉积供给等多方面控制。

2. 被动大陆边缘油气成藏条件

Edwards 和 Santogrossi^[12]指出被动陆缘盆地最富和最厚的生油岩为断陷层序的湖相泥岩和页岩,连过渡—漂移期也可形成商业价值的油气,储集层分布广泛,以新生代的深水扇体为主。据统计^[4],深水扇系统储层大多形成于新生代,少量形成于白垩纪。其中 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。圈闭的类型多种多样,其主要的圈闭类型的是浊流发育的圈闭^[4]。最常见的为构造圈闭和地层圈闭以及构造—地层圈闭,在墨西哥湾中央微型岩盐成藏组合带中构造—地层圈闭是最常见的,而在褶皱带中构造圈闭占主导地位。

Weimer 等^[4]将被动陆缘盆地分为四种类型以指导盆地的评价:①发育大型河流且塑性地层发育的深水盆地;②发育小型河流且塑性地层发育的深水盆地;③发育小型河流但塑性地层不发育的盆地;④以非深水储层为主的盆地。四类当中,前三类盆地的储量占全球深水油气储量的 90%,其共同特点是都以漂移晚期层序中的深水重力流储层为主要目的层。

3. 被动陆缘盆地沉降的机制

Bott^[16]总结了被动大陆边缘盆地沉降的机制,主要包括沉积物重力负荷、板块减薄、裂后热沉降以及断裂形成的裂谷带四种机制。根据海底扩张学理论,大洋中脊是地幔物

质热对流上升的地区,向两侧后移为老的洋壳,离洋中脊越远,洋壳越老,热流值越低,热冷即易引起洋壳下沉^[17]。

综合各类沉降机制可知,大陆裂谷和被动大陆边缘盆地的下沉不是单一因素造成的,而是由许多因素产生的^[17]:①开始为热成因,由于较深的软流圈上涌(主动)或开始区域伸展引起软流圈上涌(被动);②进一步伸展作用,在上部脆性层产生犁式正断层,在下部沿着韧性层滑脱;③基性物质侵入,使得地壳密度增大,加剧了盆地下沉;④沉积物负荷加强了这种沉降;⑤如果是大陆内裂谷、内拗陷,其下沉与热冷却、榴辉石岩化等因素有关;如果是被动大陆边缘,其下沉与海底扩张、热沉降、大陆中下地壳向大陆边缘的蠕散作用有关。

4. 陆坡的类型及其调整模式

陆坡^[18]是指向海一侧,从陆架外缘较陡地下降到深海底的斜坡。其上界水深多在100~200m;下界往往是渐变的,约在1500~3500m水深处。大陆坡坡度多为3°~6°,1800m深度以上的平均坡度为4°17′。在大西洋型大陆边缘,陆坡常随水深增大而变缓,但是珊瑚礁岛外缘的陆坡最陡,最大坡度可达45°。大陆坡既可是单一斜坡,也可呈台阶状,形成深海平坦面或边缘海台。陆坡容易被沟谷刻蚀,加上断层崖壁,滑塌作用形成的陡坎及底辟隆起等,地形十分崎岖。

板块的分裂和聚合运动奠定了陆坡形态和构造的基本格架。根据控制因素的不同,陆坡又可进一步发育为多种不同的类型^[18]:

(1)断裂型或陡崖型陆坡,主要受断裂作用控制,而侵蚀堆积的改造作用较弱,多见于岩阶、陡崖,如伊比利亚半岛西北侧陆坡。

(2)前展堆积型陆坡,陆源物质供应充分,陆坡在强烈沉积作用下逐渐向洋推进,有的陆坡下部沉积层厚达10km左右,美国大西洋一侧陆坡多属这种类型。

(3)侵蚀型陆坡,沉积作用较弱,浊流和滑塌等侵蚀作用导致基岩裸露,地形复杂,如在海底峡谷和滑坡发育的地区。

(4)礁型陆坡,与珊瑚礁生长有关,陆坡陡峭,如尤卡坦半岛的陆坡。

(5)底辟型陆坡,低密度的蒸发岩或泥在深埋后形成底辟,陆坡沉积层因而变形,海底呈不规则形态,如墨西哥湾一带。

陆坡还可分为前积(进积)或匀变(递变)陆坡和侵蚀或“非匀变”陆坡^[19]:

(1)前积(进积)或匀变(递变)陆坡,其沉积剖面向盆地方向推进,而这种剖面则是在沉积重力流和沉积供应、盆地沉降、盆地地形处于均衡状态的情况下形成的;

(2)侵蚀或“非匀变”陆坡,其陆坡过于陡峭且沉积物发生过路直至坡麓位置。侵蚀型边缘在上陆坡梯度超过均衡梯度时形成,以侵蚀、滑塌以及沉积物重力流形式向下陆坡环境的沉积过路为特征。

侵蚀型削截、沉积过路、水下扇—裾复合体的海洋上超是响应于变化的盆地地貌而形成。当海床陡坎(如过陡边缘)为上超型和加积型扇—裾复合体沉积所埋藏时,侵蚀型边缘则可以转化为前积型边缘。而作为对相对海平面迅速上升、盆地剖面的构造变形(如断裂作用)和(或)自碳酸盐向硅质碎屑沉积的转变的响应,前积型边缘可以转变为侵蚀型边缘。海平面的相对下降在将物质带至陆架前缘方面起了主要作用,陆坡不整合和上超型水下

扇—裾复合体的发育则受控于陆坡再调整机制,而这种调整则为变化中的盆地地形所触发。

以硅酸盐沉积为主的陆坡可分为两类^[19]:正常陆坡和断裂陆坡,前者又可细分为以建设作用为主的平滑陆坡和以削蚀作用为主的不规则陆坡两类。Ross等^[20]提出了陆坡再调整模式:在认可海平面控制了沉积物向深水背景输送作用的同时,强调盆地地形的变化在控制深水沉积物的上超型形态方面的作用。陆坡梯度(即盆地地形)的重大陡峭化触发长期的陆坡匀变化进程,包括侵蚀型的块体滑塌和沉积机制,结果形成了水下峡谷和上超型水下扇和裾。最终,这些陆坡再调整机制促使体系重新匀变化。

1.2.3 南海研究现状

20世纪20年代初以来,先后有美国、日本、德国和法国等国家和ASCOPE、CCOP等国际组织在南海地区开展了地质和地球物理方面的调查,取得了丰富的地质和地球物理资料。我国到20世纪60年代初开始对南海着手调查,主要以重、磁、测深和单道地震勘探为主;70年代后期至80年代开始,先后开展了大规模的、以石油普查为目标的多道地震勘探、声纳浮标折射地震探测和双船扩展剖面探测;而自90年代起,随着地球物理勘探技术的提高和日益广泛的应用,则进一步获取了大量的深部地质信息。

20世纪70年代初,美国拉蒙特—多尔蒂地球科学观测所的Ludwig^[21]发表了他在南海东部马尼拉海沟及其东侧的双船折射深地震及随航的重、磁、测深研究成果,这是南海开展最早的地壳结构的研究。此后,CCOP和IOC等组织联合主持了“东亚构造和资源研究”;1979年开始,中美两次合作进行南海基础地质研究;1987~1988年,中德合作在南海中部偏西海区进行综合地球物理测量;1993~1994年中日两次合作进行南海重、磁场特征和地壳结构以及三分量磁测,获得了较详细的有关磁性边界等方面的调查。1999年大洋钻探184航次在南海成功实施了6个站位、17口井的钻探(1143、1144、1145、1146、1147、1148站),取心总长达5500m,其中1148站的地层覆盖了几近南海海盆扩张的全部历史,第一次为盆地的演化提供了沉积学证据。经过多年研究,在盆地性质^[22-29]、扩张模式^[30-32]等方面都取得了相当大的进展。

1. 南海扩张的动力学模式

根据动力学模式所侧重的区域构造动力源的不同,南海扩张的动力学模式可以分为以下几类。

1) 弧后扩张模式

Karig^[33]、Hilde等^[34]和郭令智等^[35]提出南海是菲律宾弧的弧后扩张盆地,其形成时代为晚白垩世—古近纪。根据该模式,南海实质上是由于前期消减相关的弧后拉张产生的弧后盆地,后期由于俯冲消减而关闭。这种模式提出较早,其中一些观点与事实不符,因此现今已经很少提及。

2) 碰撞挤出一逃逸模式

Tapponnier等^[36-38]和Briais等^[39]等利用南海新生代构造演化及其成因数值模拟、物理模拟实验提出南海形成的一系列过程。Tapponnier等^[36]用物理模拟实验方法,得到了

古近纪以来亚洲大陆的演变模式。主要包括两个阶段,即早期(50~40Ma)印度板块与欧亚板块碰撞,使得印支半岛沿原先扬子地块与印支半岛间缝合带向东南逃逸而出,并造成数百千米的左旋滑动,形成红河断裂带,同时,印支半岛顺时针旋转 25° ,并形成今天的南海;第二阶段是当印度继续向亚洲大陆挤入时,包含华南与西藏的陆块整体向东逃逸,使得阿尔金断裂带产生大量的左旋走滑。然而,这种模式也遭到了许多学者的质疑,Morley^[40]和孙珍等^[41]认为,南海的发育演化与印支地块挤出作用为两个不同的应力和变形系统;吴世敏等^[42]分析了南海西缘盆地与走滑断裂的关系,结果显示这些盆地与逃逸构造在时间配套、运动学特征上都不一致,说明南海西缘这些盆地与逃逸构造在动力学成因上并不存在成因关联。另外,南海中央海盆洋壳区的形态为喇叭形,“开口”在东侧,意味着东部边缘有更大的扩张量,这表明与红河断裂带的影响无关。Wang等^[43]对越南北部哀牢山—红河巨型剪切带延伸部分进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素测定,结果显示剪切带发生的时间为25~17Ma,这一年龄值晚于南海洋壳形成的时间,更晚于南海开始伸展的时间,因此南海的成因难以用挤出模式来解释。

3) 地幔上涌模式^[44-48]

黄福林^[46]从南海基底和地壳结构特征两方面讨论了南海成因,认为南海海盆形成过程为地幔上拱,地台裂陷,陆壳下沉到热的上地幔中,地幔岩取代原有的陆壳而形成新的洋壳。Fukao和Maruyama等^[49]用天然地震层析成像发现南海南部存在地幔热柱,Flower等^[44]提出深部软流层向东挤出为主导并带动了岩石圈块体向西太平洋方向的运动。Tamaki^[45]进一步认为侧向挤出的软流层可推动俯冲板片后退导致边缘海的扩张。龚再升^[48]、李思田等^[50]根据南海北部大陆边缘的盆地及深部构造发育特征推测南海及其边缘盆地的形成可能与地幔柱及侧向地幔流有关。但是鄢全树等^[47]指出南海海盆玄武质岩石的全岩K-Ar年龄为7.9~3.8Ma,为南海扩张停止(15.5Ma)后,晚中新世以来的板内火山作用的产物,可与其周边地区(如雷琼半岛、南海北缘及中南半岛等)同期火山作用的岩石成因和源区性质进行对比研究。因此海南地幔柱与南海的扩张无关。南海南部的地幔柱因为地震层析的分辨率值得怀疑,其具体位置、发育时间也有待进一步研究。

4) 陆缘伸展扩张模式

刘昭蜀等^[51,52]认为,自新生代以来南海区域应力场从挤压转为松弛,导致陆缘解体,并向大洋扩散,形成南海北部陆缘地堑系。

5) 大西洋型海底扩张模式

Taylor等^[30]在南海东部次海盆鉴别出11~5d磁异常条带,后来他们认为南海是通过海底扩张作用形成的“大西洋型”边缘海盆地^[53]。姚伯初等^[54,55]研究对比了南海海盆中磁异常条带,结合南北陆缘的地质构造、沉积构造特征和断裂性质等,认为在新生代南海海盆经历了大西洋型海底扩张的演化历史。

除此之外,还有古南海俯冲拖曳和/或地幔侧向流动模式^[41]、古南海俯冲与印—藏碰撞复合模式^[40]、古南海俯冲拖曳模式^[53,56,57]、古太平洋俯冲后撤与印—藏碰撞挤出综合模式^[58]、地幔上涌与俯冲后撤综合作用模式^[59,60]等等。

2. 油气勘探的研究

近年来,我国对南海地区的深水油气勘探投入了大量科技力量进行研究。2001年,

国家高技术研究发展计划(863 计划)设立了“深水油气地球物理勘探技术”课题,科技部设立“南沙群岛及其邻近海区综合调查”专项;2003 年由国家自然科学基金委和中海油总公司联合启动了第一个深水研究的重大课题“南海深水扇系统及油气资源”^[61,62]。

朱伟林等^[63]总结了琼东南盆地形成大中型气田的地质条件,得出了该盆地“近岸带控藏”的天然气富集理论,具体条件包括:①发育早渐新世崖城组煤系气源灶,具备形成大中型气田的物质条件;②崖城组煤系地层本身有利于形成以“自生自储”为特征的隐蔽油气藏;③岸带内侧长期“泥包砂”海相沉积环境;④叠合界面+古构造联合控砂;⑤发育分布稳定、塑性较强的梅山组沉积期以来的大海侵背景形成的近岸气藏封盖层;⑥煤成气富集规律。

刘铁树等^[64]、张功成等^[6]总结了南海北部深水区的成藏条件,认为南海北部大陆边缘深水区生烃凹陷是裂谷背景,主力烃源岩是渐新统下部中深湖相泥岩、海陆过渡相泥岩、海相泥岩与煤系地层;可能的烃源岩是始新统中深湖相泥岩;潜在的烃源岩是渐新统上部和中新统海相泥岩。深水区至少有 3 套储层,即渐新统海陆过渡相砂岩、新近系海相砂岩及生物礁、始新统陆相砂岩。盖层发育广泛,区域性盖层是新近系海相泥岩和渐新统泥岩。南海北部大陆边缘圈闭类型主要有披覆背斜、断层圈闭和深水扇体等。

陈国威^[65]总结了南海生物礁及礁油气藏形成的基本特征,指出生物礁储层以次生储集条件为主,且与礁岩结构和成岩作用密切相关;盖层主要为浅海相的泥岩、半深海相的页岩或深海相碳酸盐岩,这些岩层是在生物礁阶段性生长结束后,海侵或区域性的沉降阶段沉积的;生物礁油气藏受构造运动影响强烈。

高红芳等^[66]总结中建南盆地成藏条件,认为该盆地发育古新统一始新统(浅湖—沼泽相和浅湖—半深湖相泥岩)、上始新统一渐新统(泻湖相和浅海、半深海相泥岩)、下中新统一中新统(浅海相和浅海—半深海相泥岩及礁灰岩)三大套烃源岩。

在油气运移方面,陶维祥等^[67]总结了超压—常压突变模式、超压—常压过渡模式和强超压区的构造与岩性圈闭成藏模式。许多学者研究表明,深水区也存在类似莺歌海盆地的底辟带^[68-70],深水区部分凹陷中心曾经发育超压系统,与之伴生的大量亮点表明该区存在沿底辟构造的垂向天然气输导。

1.2.4 研究区存在的主要科学问题

南海西北部科学问题众多,涉及面宽,本书拟主要讨论以下科学问题:

1. 南海北部边缘的类型及西北部陆坡的地质结构

南海北部陆缘的成因和类型一直存在争议。宋海斌等^[23]认为其东部是火山型被动大陆边缘,西部是非火山型的被动大陆边缘。吴世敏等^[22]则认为南海北部陆缘属于非火山型被动陆缘。这些观点隐含了对南海扩张模式的认识,也影响着对边缘地质结构的认识。横向分段性是被动陆缘盆地的普遍特征,南海北部陆缘从西到东特征差异巨大,但目前还没见到明确的分段性研究。不同段中,往往表现出各自的纵向分带性。各带的地质特征及各带之间的异同尚需进一步研究。

南海北部边缘属于被动大陆边缘,从裂陷到缓慢拗陷再到快速拗陷,各个构造演化阶段在断裂活动、岩浆活动和沉积充填等方面差异巨大。目前,国内对被动陆缘盆地多按照断陷期构造特征进行构造区划,这种做法不能体现不同构造时期的具体特征。因而有必要依据不同构造层分别进行构造区划的研究,探讨不同阶段的构造及地貌分区特征,总结各个阶段的继承性与差异性对研究区的动力机制的研究有着重要意义。

2. 南海西北部陆坡构造特征及演化

南海西北部陆坡的形成演化经历了哪些过程,其动力学机制如何,这都是本书要重点探讨的问题。另外,南海形成演化的控制因素有哪些,对盆地的构造格局、断裂系统会产生什么样的影响,这些问题都需要深入讨论。

3. 南海西北部沉积演化规律

南海西北陆坡形成演化过程中经历了哪些沉积演化过程,各个阶段有什么样的典型沉积,这些问题目前还没有得到很好的解答。与典型的被动陆缘盆地相比,南海西北部陆坡区地质情况复杂,分带性明显,各个构造层序特征差异大。而反映在沉积上,又经历了什么样的沉积演化过程,这也是一个重要问题。

4. 南海西北部陆坡各带成藏条件

南海西北部陆坡的各个单元地质差异较大,从而其成藏条件也各有不同,前人曾对陆坡隆起斜坡带进行了分析研究,但对其他单元并没有深入研究。通过成藏条件的对比分析,优选有利的勘探方向是十分必要的。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

1. 南海西北部陆坡地质结构、构造层序框架及分层序构造区划

分析南海西北部横向分段性和纵向分带性。在此基础上,对南海北部陆缘盆地的不整合面进行识别和分析,划分构造层序,研究其特征、演化及横向变化规律,并在构造层序框架内进行合理的地貌单元和构造单元划分。

2. 构造特征、演化及动力学机制

分析南海西北部陆坡区在断裂、构造样式、沉降史、岩浆活动特点等方面的特征。重点讨论从北到南,由陆架外缘斜坡到陆坡拗陷带、隆内斜坡带、陆坡隆起带一直到隆外斜坡带在断裂分布、构造样式、沉降历史以及岩浆活动等方面的规律。在此基础上讨论西北部陆坡构造演化史,探讨其动力学机制。