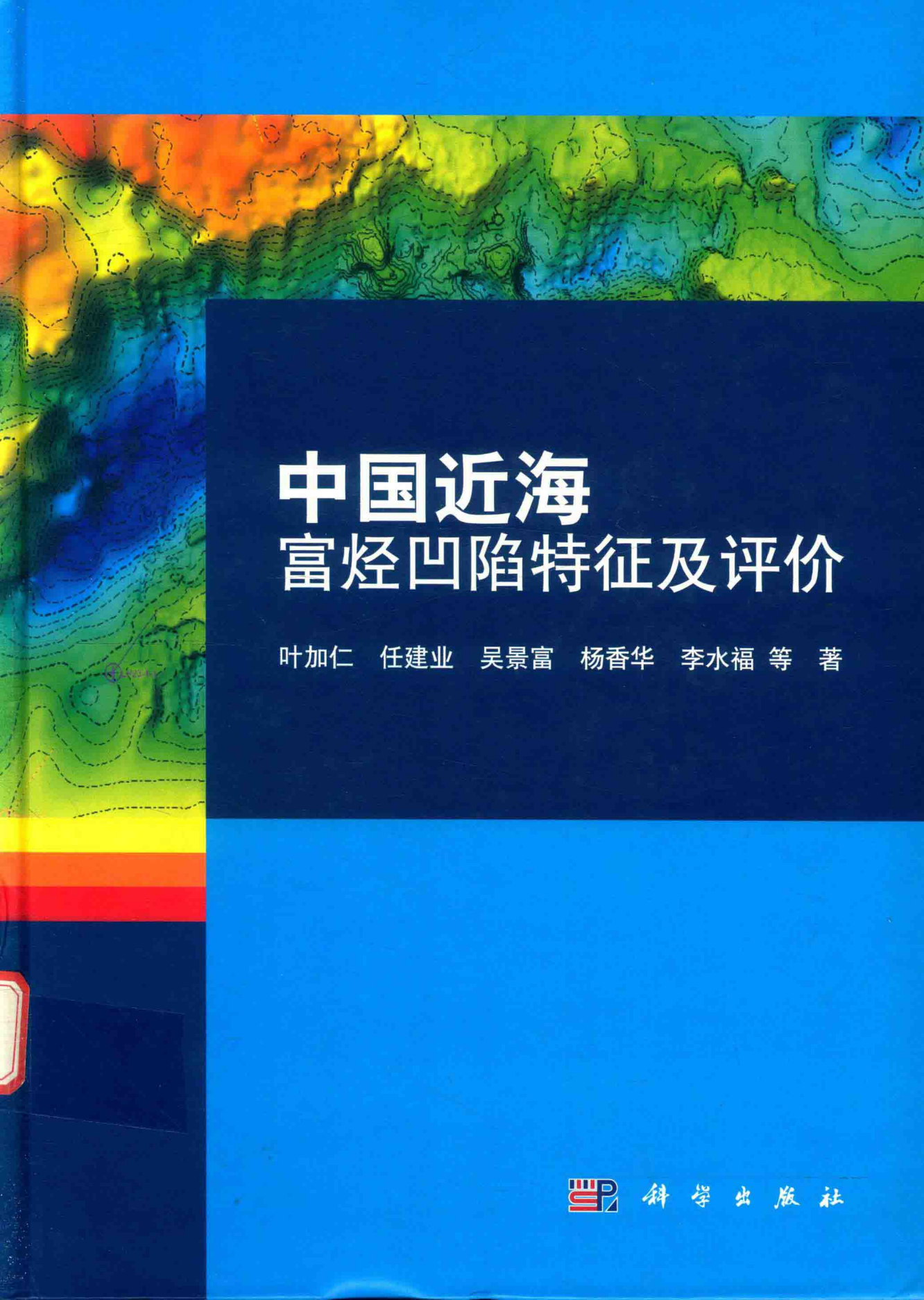




中国近海 富烃凹陷特征及评价

叶加仁 任建业 吴景富 杨香华 李水福 等 著



科学出版社

中国近海富烃凹陷特征及评价

叶加仁 任建业 吴景富 杨香华 李水福 等 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书系统介绍中国近海代表性已证实富烃凹陷的结构构造、层序与沉积充填、烃源岩、油气成藏等特征,对比分析中国东部陆上典型富烃凹陷的基本特征;论述富烃凹陷的研究历史及其内涵,提出中国近海富烃凹陷的判别指标与标准,总结、凝练适用于中国近海富烃凹陷评价的主要指标及若干方法技术。

本书可作为广大油气地质工作者、基础地质工作者参考用书,也可供高等院校有关专业硕士、博士研究生及高年级本科生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国近海富烃凹陷特征及评价/叶加仁等著. —北京:科学出版社,2016.11
ISBN 978-7-03-050506-4

I. ①中… II. ①叶… III. ①近海-海上油气田-拗陷-油气藏-研究-中国
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267811 号

责任编辑:杨光华 何 念/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街2号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016年11月第 一 版 印张:24 1/4

2016年11月第一次印刷 字数:571 000

定价:240.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

富烃凹陷的概念和理论是在我国东部裂陷盆地不断勘探实践和“源控论”“复式油气聚集带”等理论的基础上而提出的,并经历了从“富生烃凹陷”到“富烃凹陷”的发展历程。富烃凹陷是当今油气勘探的主战场,对大型油气系统的形成具有重要的控制作用。中国东部新生代沉积盆地油气勘探实践证明,只要找到了富烃凹陷,就掌握了油气储量增长的主动权。

中国近海大陆架 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育 10 个中新生代盆地 91 个凹陷,其油气资源丰富,但已发现的油气储量主要分布于富烃凹陷之中,其中 11 个已证实的富油凹陷的石油储量占海域石油总储量的 90% 以上,3 个富气凹陷的烃类气储量占海域天然气总储量的 75% 左右。中国近海盆地的油气勘探程度和研究程度总体较低且不均一,目前油气勘探和发现主要集中在渤海湾盆地、东海盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地和北部湾盆地 6 个盆地中的 14 个已证实的富烃凹陷内,仍有多个潜在富烃凹陷待进一步勘探和评价。同时,近海盆地(凹陷)的油气探明程度远低于中国东部陆上盆地(凹陷),待发现的油气资源潜力巨大。

我们在国家科技重大专项子课题“富烃凹陷特征及类比研究”(2008ZX05023-001-001、2011ZX05023-001-001)的持续支持下,通过综合剖析中国近海已证实富烃(油)凹陷的结构构造、层序与沉积充填、烃源岩及油气成藏等特征,类比中国东部陆上已证实典型富烃凹陷的特征,以及富烃凹陷与贫烃凹陷的对比分析,总结富烃(油)凹陷的主要特征,建立具有中国近海特色的富烃凹陷评价体系,并探索富烃凹陷的评价方法技术,以推进富烃凹陷的研究,同时为中国近海潜在富烃凹陷的评价优选及低勘探程度地区的油气勘探提供指导。

基于中国近海含油气凹陷的实际地质特点和资料状况,本书主要采用了如下方法:

(1) 地质类比的方法。在重点、系统解剖中国近海已证实富烃(油)凹陷的结构构造、沉积充填、烃源岩发育及油气成藏等特征的基础上,基于类比分析的思想,类比分析中国东部陆上勘探和研究程度较高、资料较为丰富的东营、辽西西部、大民屯等典型富烃凹陷,同时还对已证实的富烃凹陷与非富烃凹陷(如辽东凹陷、阳江凹陷、阳春凹陷、江陵凹陷)进行了对比分析,力求相关认识更加科学、可靠和可信。

(2) 动、静态相结合的方法。不仅对各富烃凹陷的静态地质要素进行精细描述,同时还采用含油气盆地动态数值模拟的方法,重建富烃凹陷的地质作用过程(如构造演化历史、控凹断裂活动历史、古地温和古热流演化历史、异常压力演化历史、流体势能演化历史、烃源岩热成熟演化历史和生排烃历史、储层流体充注历史等)。

(3) 定性与定量相结合的方法。在详尽定性分析的基础上,力求量化,并做到定性、定量的紧密结合。如在对富烃凹陷结构构造特征分析时,既包括富烃凹陷形成的动力

学背景与机制、构造演化历史、变形机制等的定性分析,也包括对地层埋深与厚度、断层古落差与活动速率、沉降速率、伸展率等参数的定量刻画,使所建立的评价指标体系兼备定性指标、半定量指标和定量指标。

(4)“点-线-面”相结合的方法。在对某一富烃凹陷的解剖中,首先从典型实际钻井入手,精细解剖其地层发育和烃源岩、储集层、盖层及储盖组合等特征;其次,综合钻井与地震资料,对代表性骨干剖面进行井-震结合的构造演化历史、层序格架及烃源岩热成熟演化史、异常压力演化史、流体势能演化史等重建与分析,建立油气成藏模式;接着,在平面上分析沉积-沉降中心的迁移规律、富生烃洼陷的发育特征、不同生储组合的流体势能场演化历史、油气运移路径及油气分布规律等;最后,完成富烃凹陷的特征总结及其评价指标体系的凝练与建立。

(5)综合分析的方法。研究区域范围广,涵盖中国近海和东部陆上的多个已证实的富烃凹陷;涉及内容多,既包括中国近海已证实富烃凹陷的解剖,也包括东部陆上已证实富烃凹陷的类比分析,还涉及非富烃凹陷的对比验证,影响富烃凹陷形成与发育的因素众多,且各因素之间又往往相互联系、彼此制约。因此,在结构构造、沉积层序与充填、烃源岩发育及油气成藏等专题研究的基础之上,综合归纳、总结提炼了富烃凹陷的特征及其评价指标。

本书是在“富烃凹陷特征及类比研究”项目报告的基础上进一步加工凝练而成的,凝聚着项目全体研究人员的心血和智慧。全书共分六章,第1章富烃凹陷结构构造特征及对比由任建业、李祥权执笔;第2章富烃凹陷层序与沉积充填特征及对比由杨香华、朱红涛执笔;第3章富烃凹陷烃源岩特征及对比由李水福、胡守志执笔;第4章富烃凹陷成藏特征及对比由叶加仁、曹强执笔;第5章富烃凹陷评价体系由吴景富、叶加仁、任建业、杨香华、李水福等执笔;第6章富烃凹陷评价技术由叶加仁、任建业、杨香华、李水福执笔。全书由叶加仁和吴景富统一定稿。

在项目研究和本书完成过程中,得到了中海油研究总院、中海油深圳分公司、中海油天津分公司,以及中国地质大学(武汉)等单位的领导、专家、同行的关心、指导、支持和帮助,在此一并致以深切的谢意!本书参考和引用了大量的文献资料,在书中所附的主要参考文献中未能全部列出,在此特向文献作者及相关单位表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请各位同仁批评指正。

作 者

2016年8月

目 录

第 1 章 富烃凹陷结构构造特征及对比	1
1.1 区域动力学背景及机制	1
1.1.1 新生代以来区域板块主要运动学特征	1
1.1.2 渤海湾盆地的形成演化	4
1.1.3 南海北部大陆边缘盆地的形成演化	5
1.1.4 中国近海盆地形成机制及其动力学类型	9
1.2 中国近海已证实富烃凹陷结构构造特征	11
1.2.1 辽中凹陷	11
1.2.2 辽西凹陷	18
1.2.3 渤中凹陷	21
1.2.4 黄河口凹陷	26
1.2.5 莱州湾凹陷	34
1.2.6 惠州凹陷	38
1.2.7 番禺 4 洼	47
1.2.8 恩平凹陷	50
1.2.9 文昌 A 凹陷	53
1.2.10 涠西南凹陷	56
1.3 中国东部陆上富烃凹陷结构构造特征对比	60
1.3.1 东营凹陷	60
1.3.2 沾化凹陷	68
1.3.3 辽河西部凹陷	73
1.3.4 大民屯凹陷	80
1.4 中国近海贫烃凹陷结构构造特征对比	84
1.4.1 辽东凹陷	84
1.4.2 阳江凹陷	85
1.4.3 阳春凹陷	86
第 2 章 富烃凹陷层序与沉积充填特征及对比	91
2.1 中国近海富烃凹陷层序地层格架	91
2.1.1 辽中凹陷	91
2.1.2 辽西凹陷	95
2.1.3 渤中凹陷	96

2.1.4	黄河口凹陷	99
2.1.5	莱州湾凹陷	101
2.1.6	惠州凹陷及番禺 4 洼	104
2.1.7	恩平凹陷	106
2.1.8	文昌 A 凹陷	108
2.1.9	涠西南凹陷	111
2.2	中国近海富烃凹陷层序发育特征	113
2.2.1	多幕裂陷旋回的层序地层格架	113
2.2.2	层序发育模式	118
2.2.3	层序构型特征	122
2.3	中国近海富烃凹陷沉积充填特征	130
2.3.1	多幕裂陷的构造沉积响应模式	130
2.3.2	中国近海多幕裂陷的物源体系转换	136
2.3.3	控洼断裂关联下的沉积中心迁移规律	144
2.4	大型砂体发育的沉积控制因素	147
2.4.1	母岩风化剥蚀强度	147
2.4.2	物源供给方式	148
2.4.3	有效物源供给方向	150
第 3 章	富烃凹陷烃源岩特征及对比	152
3.1	中国近海富烃凹陷烃源岩数量特征	152
3.1.1	辽中凹陷	152
3.1.2	辽西凹陷	152
3.1.3	渤中凹陷	154
3.1.4	黄河口凹陷	155
3.1.5	莱州湾凹陷	156
3.1.6	惠州凹陷	157
3.1.7	恩平凹陷	157
3.1.8	文昌 A 凹陷	158
3.1.9	涠西南凹陷	158
3.2	中国近海富烃凹陷烃源岩质量特征	159
3.2.1	辽中凹陷	159
3.2.2	辽西凹陷	164
3.2.3	渤中凹陷	168
3.2.4	黄河口凹陷	174
3.2.5	莱州湾凹陷	178
3.2.6	惠州凹陷	181

3.2.7 恩平凹陷	183
3.2.8 文昌 A 凹陷	190
3.2.9 涠西南凹陷	193
3.3 中国东部陆上富烃凹陷烃源岩特征对比	195
3.3.1 东营凹陷	195
3.3.2 泌阳凹陷	197
3.3.3 辽河西部凹陷	199
3.3.4 大民屯凹陷	201
3.3.5 潜江凹陷	202
3.4 中国东部贫烃凹陷烃源岩特征对比	204
3.4.1 阳江-阳春凹陷	204
3.4.2 南阳凹陷	207
3.4.3 江陵凹陷	209
第 4 章 富烃凹陷油气成藏特征及对比	212
4.1 流体动力场特征	212
4.1.1 压力发育特征	212
4.1.2 温压系统特征	234
4.2 储层-盖层特征	240
4.2.1 储层特征	240
4.2.2 盖层发育特征	244
4.2.3 储盖组合特征	246
4.3 热流体活动特征	250
4.3.1 流体包裹体显微岩相学特征	250
4.3.2 流体包裹体显微荧光光谱特征	252
4.3.3 流体包裹体激光拉曼光谱特征	253
4.3.4 流体包裹体均一温度分布	254
4.3.5 流体充注历史	256
4.4 输导-聚集特征	260
4.4.1 输导体系	260
4.4.2 圈闭及油气藏类型	265
4.4.3 聚集特征及模式	269
第 5 章 富烃凹陷评价体系	276
5.1 富烃凹陷判别指标体系	276
5.1.1 富烃凹陷的内涵	276
5.1.2 富烃凹陷的判别指标及标准	278

5.2 富烃凹陷结构构造评价指标	280
5.2.1 盆地演化的动力学过程和结构样式评价指标	281
5.2.2 沉降速率和主控断层活动速率评价指标	281
5.2.3 沉降速率/沉积速率评价指标	284
5.2.4 后期断层活动及其与排烃时间匹配评价指标	284
5.2.5 构造转换带和反向调节断层评价指标	286
5.3 富烃凹陷层序与沉积充填评价指标	286
5.3.1 层序构型评价指标	286
5.3.2 快速沉降-封闭型湖泊评价指标	287
5.3.3 火成岩母岩的富营养水系评价指标	290
5.4 富烃凹陷烃源岩评价指标	298
5.4.1 主力烃源岩的埋深下限和厚度评价指标	298
5.4.2 烃源岩数量评价指标	299
5.4.3 烃源岩质量评价指标	302
5.4.4 烃源岩特征综合评价指标探索	304
5.5 富烃凹陷油气成藏评价指标	309
5.5.1 成藏动力评价指标	309
5.5.2 成藏组合评价指标	311
5.5.3 热流体活动评价指标	313
5.5.4 输导-聚集条件评价指标	319
第6章 富烃凹陷评价技术	326
6.1 富烃凹陷结构构造评价技术	326
6.1.1 断层生长指数评价技术	327
6.1.2 断层古落差和活动速率评价技术	328
6.1.3 沉降史模拟的反演法——回剥法	330
6.1.4 水平伸展量和伸展率评价技术	334
6.2 富烃凹陷层序与沉积充填评价技术	336
6.2.1 无井/少井条件下砂体预测技术	336
6.2.2 沉积充填评价技术	342
6.3 富烃凹陷油源对比全二维色谱-飞行时间质谱分析技术	344
6.4 富烃凹陷油气成藏评价技术	348
6.4.1 油气成藏年代学分析技术	348
6.4.2 油气成藏主控因素定量分析技术	360
参考文献	369

作为一种特殊的沉积盆地,富烃凹陷形成发育于特定的构造背景之下。本章从富烃凹陷形成的区域动力学背景及机制分析出发,在分析中国近海及东部陆上已证实的代表性富烃凹陷结构与地层格架、构造演化历史的基础上,重点刻画表征富烃凹陷结构构造特征的动态和静态参数,为确定中国近海富烃凹陷评价指标体系提供构造依据。

1.1 区域动力学背景及机制

中国近海盆地分布区属于环太平洋带的重要组成部分。中生代西太平洋边缘发育了超巨型俯冲带及相伴生的深海沟和岛弧,弧后扩张则形成了一系列边缘海,如南海、东海和日本海,但南海的形成除受太平洋板块俯冲的影响外,还受控于印度洋板块的向北俯冲以及古南海的向南俯冲拖曳,甚至一些学者认为后者对南海形成演化的影响可能更为重要。在中国近海范围的含油气盆地除渤海湾盆地、北部湾盆地和北黄海盆地等属于陆内海和海湾外,其余大部分位于弧后边缘海范围。中国东部陆上及海域新生代盆地具有一些共同的地质、地球物理特征(李思田,2004)。

(1) 除莺歌海盆地受走滑带的控制而呈 NW 向展布外,其他盆地均呈 NNE、NE 向展布,总体与西太平洋俯冲带和岛弧带平行。

(2) 盆地皆形成于裂陷作用背景之下,且裂陷期有大致的同步性(图 1.1),盆地的裂陷阶段皆形成复式的地堑、半地堑构造,盆地深部常由地堑、半地堑群及其间的断隆构成。

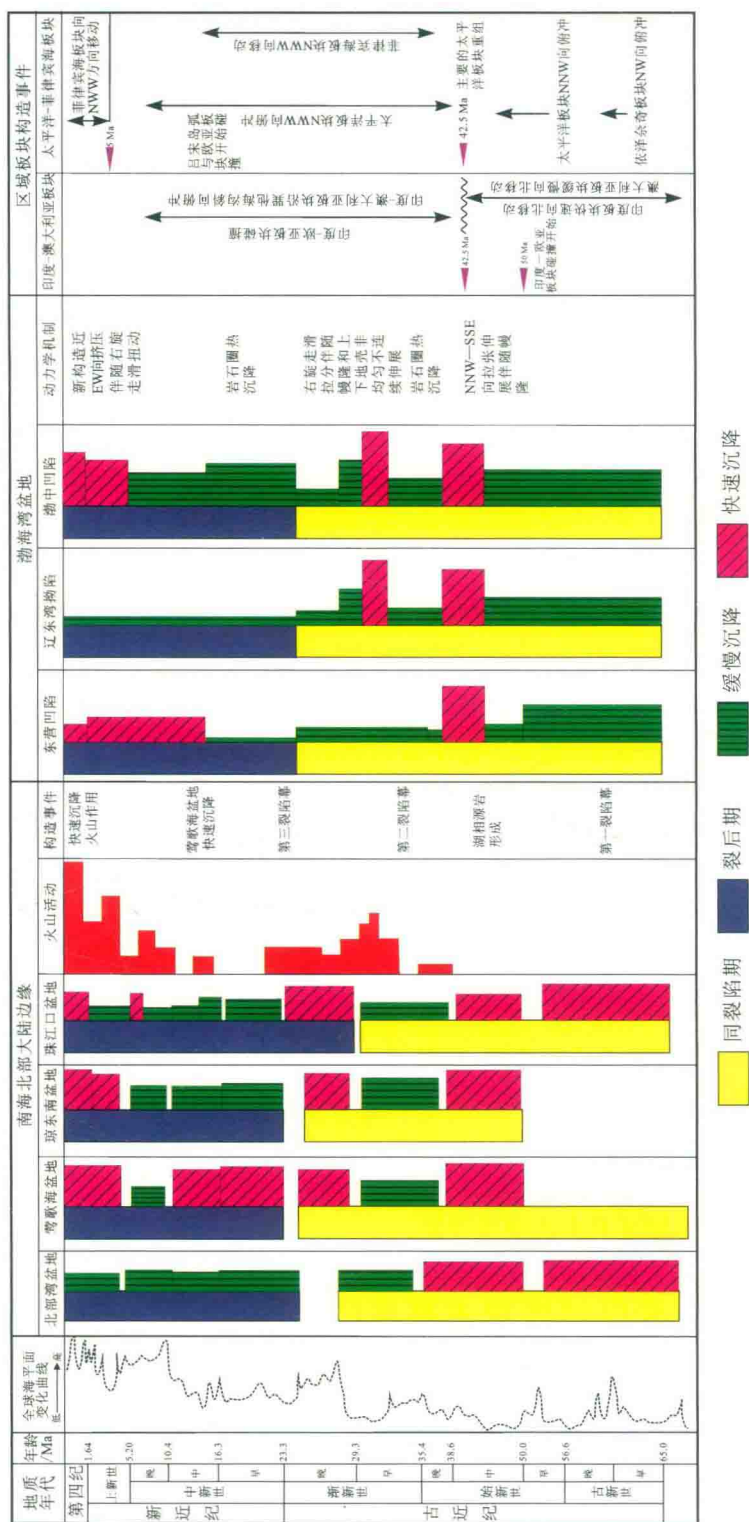
(3) 盆地发育区岩石圈减薄程度和深部结构是盆地成因和动力学研究的关键问题。

(4) 简单的由单一正向拉伸机制形成的伸展盆地少见,大多数盆地在伸展的同时都有不同程度的走滑活动与之联合,这样就造成了张扭性的斜向拉伸效应。

(5) 裂陷期与裂后期常有火山喷发活动。

1.1.1 新生代以来区域板块主要运动学特征

中国大陆位于欧亚板块的东部,处于印度-澳大利亚板块、西伯利亚板块、太平洋板块和菲律宾板块的夹持之中(图 1.2),这些板块之间的相对运动控制了中国大陆东部盆地的板块构造动力学环境,同时控制了中国东部新生代盆地的形成和演化。



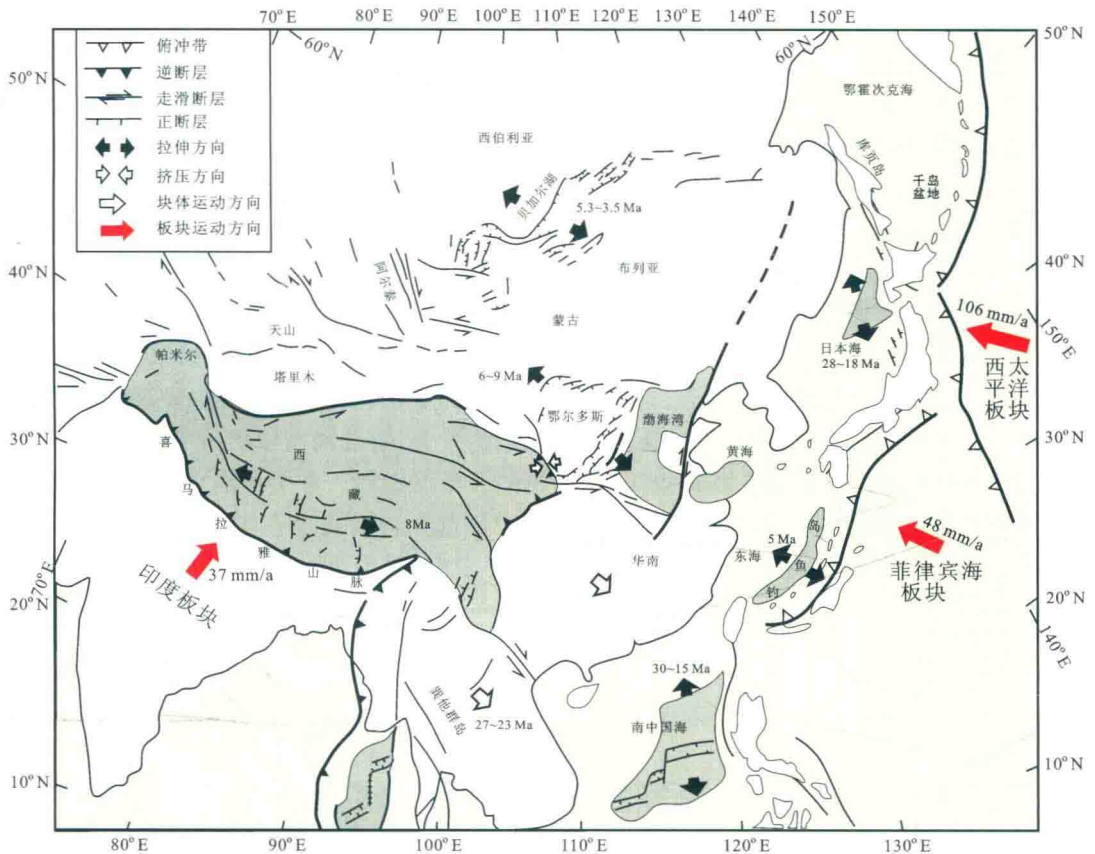


图 1.2 中国大陆周缘板块构造格局(据 Zhang et al., 2003; Maruyama et al., 1997; Lee 和 Lawver, 1995; Northrup et al., 1995 等修编)

自 65 Ma 开始,印度板块开始与欧亚板块发生板块边缘的接触碰撞,到 43 Ma 时,两大板块进入全面碰撞阶段,汇聚速率和汇聚方向随之发生了改变。碰撞引起了亚洲板块的东部向 ES 方向运动,致使区域板块位置发生调整。与此同时,在 43 Ma 前后,东亚大陆边缘也发生了重大的板块构造运动重组事件,太平洋板块的绝对运动方向由向 NNW 运移转向向 NWW 运移,向欧亚板块的俯冲方式亦由之前的斜向俯冲转变为正向俯冲。上述重大的板块运动重组事件引起了包括渤海湾盆地在内的中国大陆东部盆地在构造和沉积上的响应,导致盆地内部重要构造变革界面的形成(任建业, 2004)。

在 25 Ma 时,逆时针方向旋转的菲律宾海板块南端俯冲带和澳大利亚板块北端发生了弧陆碰撞事件,澳大利亚板块持续推动着菲律宾海板块向北移动,并楔入到欧亚板块和太平洋板块之间,期间,菲律宾海板块运动方向发生了逆时针旋转,旋转角度达到了 40° (Hall et al., 1995)。在 5 Ma 时,向北运动的菲律宾海板块转向 NWW 方向运动,运动速率达到了 48 mm/a (Maruyama et al., 1997),其前锋吕宋岛弧与欧亚板块在台湾地区发生弧陆碰撞造山运动,台湾岛开始出现并逐渐形成。上述一系列板块运动重组事件,对中国东部盆地在裂后期的发展和演化产生了重要影响,并由此导致了断陷盆地裂后期幕式加速沉降过程。

1.1.2 渤海湾盆地的形成演化

渤海湾盆地位于华北板块内部,其东西两侧分别是呈 NNE 向展布的郯庐断裂带和太行山山前深大断裂带,南北两侧分别是近 EW 向展布的齐河—广饶弧形断裂带和昌黎断裂带。盆地南北两端较窄,中间较宽,总体上呈菱形(图 1.3)。盆地具有很厚的充填地层,一般为 10~14 km,显示了基底的快速沉降和盆地的快速充填。盆地具有典型的裂谷盆地的双层结构,即古近纪的裂陷和新近纪的裂后热沉降形成的拗陷。盆地内部发育两组基底断裂,一组为 NNE 向,另一组为近 EW 向。前一组主要发育于盆地的南北两端及西部,后一组发育于盆地的中东部,而且它们所代表的 EW 向伸展和 NS 向伸展作用是同时发生的。上述断裂系统控制了盆地内 7 个拗陷的发育,自北向南依次为下辽河拗陷、冀中拗陷、黄骅拗陷、渤中拗陷、临清拗陷、济阳拗陷及昌潍拗陷。各个拗陷之间由 4 个隆起间隔,自北而南依次为:沧县隆起、邢衡隆起、呈宁隆起和内黄隆起。渤中拗陷、济阳拗陷及昌潍拗陷呈 NEE 向,下辽河拗陷、黄骅拗陷呈 NE 向,冀中拗陷、临清拗陷呈 NNE 向。

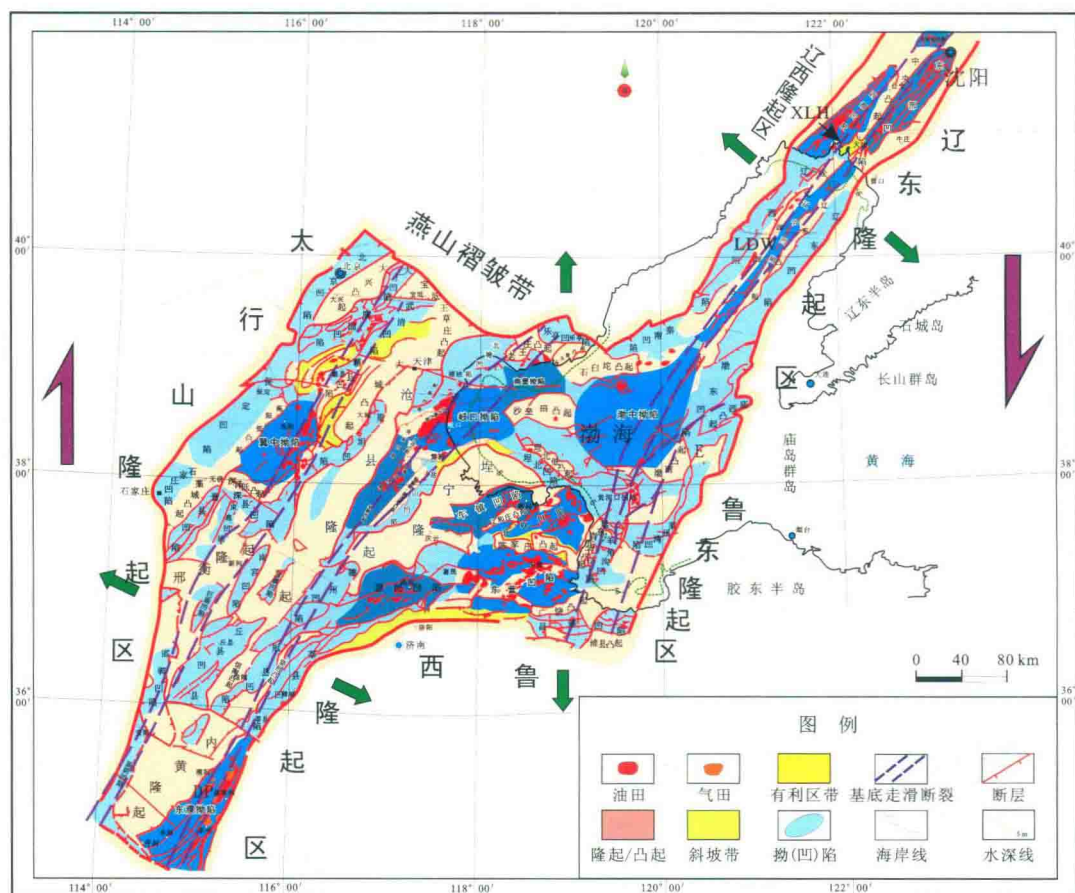


图 1.3 渤海湾盆地区域构造图(李国玉等,2002;陆克政等,1997)

一般认为,渤海湾断拗盆地的发育与新生代期间构造应力场由左旋压扭向右旋张扭的转化直接相关,其区域构造应力场转化的背景为欧亚板块周缘三大板块构造系统之间的相互不平衡作用。穿过渤海湾盆地东侧基底的郯庐断裂系左、右旋剪切活动的变化,对渤海湾盆地的局部应力场分布与变形的持续发展有重要影响。但从根本上讲,它也是区域构造演化转折的一个主要产物。因此,渤海湾盆地裂陷活动的一个重要前提是中国东部区域构造应力场的反转。

渤海湾盆地基底上的以 NNE 向为主的先存大型走滑断裂在成盆期表现为右旋扭动,并控制了盆地的基本形态和构造格架。盆地西南端为 NNE 向,中部为近 EW 向,总体上,渤海湾盆地向两侧的伸展与盆地中部呈 SN 向的伸展是同时的。这种双向伸展只有在 NNE 向先存走滑断裂系发生右旋扭动,软流圈上隆并在岩石圈底部产生平流时才能发生(李思田,2004)。所以,渤海湾盆地的演化受控于伸展与沿基底断裂的扭动双重机制。

新近纪以来,由于印度板块与欧亚板块发生了大面积碰撞,其碰撞角度由古近纪 $N10^{\circ}E$ 转为约 $N30^{\circ}E$,板块的敛合速度由 60 mm/a 减为约 50 mm/a ,使该区 NE—SW 向区域压应力场增强,同时菲律宾板块开始由南向北楔入到太平洋板块和欧亚板块之间,双向的挤压使渤海湾盆地发生区域性抬升而遭受剥蚀,结束了盆地古近系的裂陷作用。

此后,随着印度板块对欧亚板块俯冲速度的减小,该区 NE—SW 向挤压应力减弱及地幔热回沉作用使渤海湾盆地整体下沉,发展为拗陷盆地。明化镇期以来,盆地的加速下沉可能与渤海地区地幔上涌有关,可能预示着下一个盆地裂陷旋回的到来。

1.1.3 南海北部大陆边缘盆地的形成演化

南海是东南亚陆缘最大的边缘海之一,也是中国大陆边缘唯一发育了洋壳的海盆。它靠近特提斯和环太平洋两大全球超级汇聚带的交会处,处于极其独特的大地构造部位,受欧亚、印度-澳大利亚和太平洋三大板块相互作用的控制,形成了复杂的构造,具有多期、多轴扩张的洋壳,宽阔的陆架和海底高原,其四周的大陆边缘包含了被动型、主动型、转换型和复合型等主要的大陆边缘类型,蕴含丰富的油气资源,是研究和认识东南亚的构造变动、资源聚集规律和环境变迁重要的天然实验室。南海北部大陆边缘裂谷型盆地,自北东向南西依次为台西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地和莺歌海盆地,都属于典型的大陆边缘盆地(图 1.4)。

这些盆地均位于减薄的陆壳之上,莫霍(Moho)面埋深最浅处仅 $20\sim 22\text{ km}$,岩石圈的变化趋势由陆地向南海中央海盆方向减薄(姚伯初,1998)。而从陆地经大陆边缘至海盆,地壳和岩石圈的速度结构发生变化,反映出岩石圈类型的变化(姚伯初等,2005)。南海是一个高热流地区,平均热流值高达 78.3 mW/m^2 ,并且整体趋势是热流值从北部陆缘向中央海盆逐渐升高。较高的热流背景,表明南海可能处在地幔上隆区(龚再升等,2004)。通过反映岩石圈流变学特征的有效黏滞系数 η 的计算(张健和汪集旻,2000),南海北部边缘沉积层和上地壳的有效黏滞系数背景较高, η 在 $10^{22}\sim 10^{25}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 之间变化;下地壳的有效黏滞系数在 $10^{21}\sim 10^{22}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 之间变化,上、下地壳 η 值的最大差值达 3 个数量级。南海北部大陆边缘在整个新生代期间始终保持较强的岩浆活动,在晚古新世至

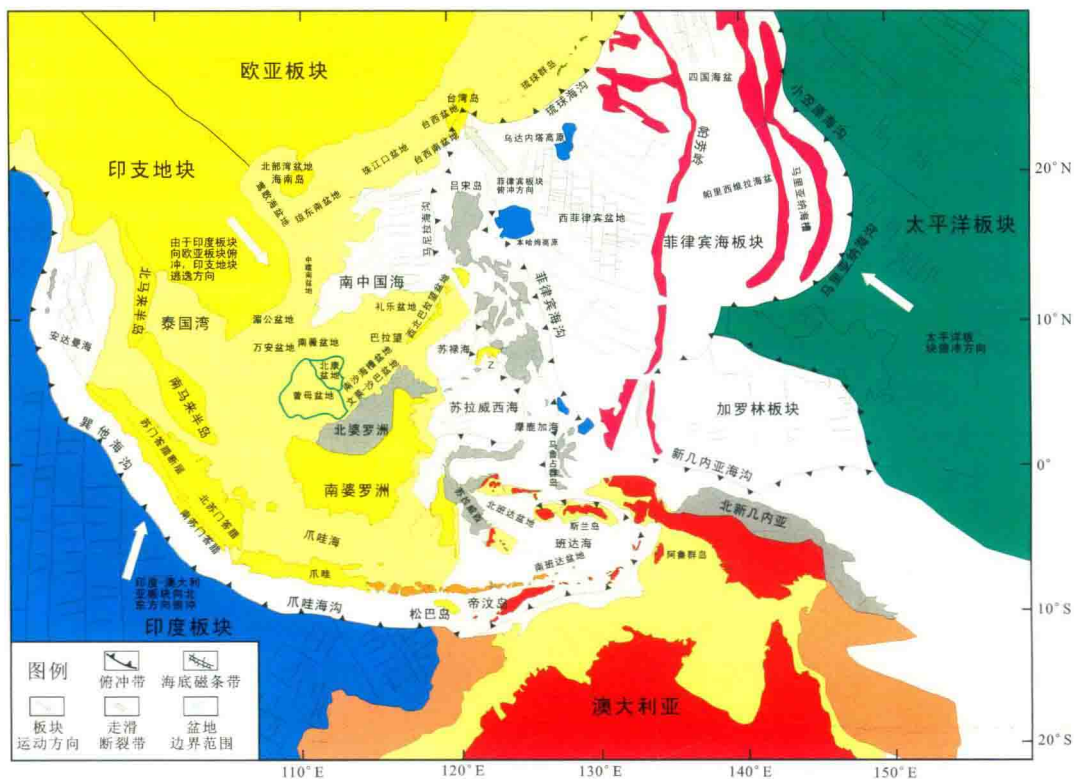


图 1.4 南海及边缘盆地地区构造背景和构造位置图

早始新世主要为中酸性火山岩；中始新世及渐新世兼有中性及基性喷发岩，至古近纪晚期逐渐转化为以碱性玄武岩和拉斑玄武岩为主的裂陷盆地火山序列(李思田等,1998)。

根据地震剖面的解释和分析,可以在南海北部边缘新生代盆地内确定出多个不同级别的不整合、假整合和微角度不整合等不连续面,这些界面反映了重要的构造和海平面变化事件,是划分、对比盆地演化阶段的基础。沉降速率是反映盆地动力学性质的重要标志,在裂陷期通常沉降速率较高,裂后热衰减期沉降速率较低。在裂陷期发生多幕伸展的条件下,沉降加速也出现多幕性。通常根据断陷转化为拗陷的界面,即 BUS(breakup unconformity surface),可将盆地分为裂陷期和裂后期。根据界面附近化石带的缺失和地震剖面的追踪对比,发现珠江口盆地裂陷阶段结束较早,断陷-拗陷转化界面在渐新统内部,即 T_7 反射界面。而琼东南盆地断陷-拗陷转化界面在渐新世与中新世之间,即 T_6 反射界面。南海北部 4 个主要含油气盆地自晚白垩世末期至古近纪的多幕伸展具普遍性(李思田等,1998),多幕裂陷活动的标志是:①构造沉降的周期性加速;②不同裂陷幕之间存在着反转和间断,因此有明显的不连续面;③构造方向和构造样式在少数情况下是继承的,多数则发生转化,如断陷方向的旋转和沉降中心的改变。

总体上,在南海北部地区可识别出 3 个裂陷幕(李思田等,1998),但各盆地间又有明显的差异。

(1) 第 I 裂陷幕:发育于晚白垩世末—始新世最早期,在南海北部广泛形成了小型陆

相半地堑和地堑群。其充填物以干旱、半干旱条件下的红色碎屑沉积为主,以珠江口盆地神狐组和北部湾盆地长流组为代表。莺歌海-琼东南盆地地震剖面上显示有较老的半地堑构造,推断为此期产物。第 I 裂陷幕形成的断陷盆地群与华南分布很广的小型红色盆地相似。

(2) 第 II 裂陷幕:主要发生时间为 50~29 Ma。这一裂陷幕内部又被不连续面划分为两个阶段。始新世中-晚期为快速沉降阶段,以珠江口盆地文昌组和北部湾盆地流沙港组为代表,形成了优质的湖相烃源岩,是南海北部的主力油源岩。第二阶段为相对稳定的沉降期,时代为始新世末-渐新世,以恩平组、崖城组和涠洲组为代表,系含煤地层,主要为浅水沉积环境,通常后期开始海侵,形成海陆交替环境,此种含煤岩系常成为气源岩。

(3) 第 III 裂陷幕:主要发育于晚渐新世,这一幕的普遍性尚待进一步研究。总体上,珠江口盆地自早渐新世末(约 29 Ma)即已进入拗陷阶段,在局部地区,如珠三拗陷,渐新世晚期仍有裂陷活动。但在莺歌海-琼东南盆地,此阶段继续受裂陷作用的控制,并在陵水期再次发生沉降加速。就莺歌海-琼东南盆地来看,断拗转化界面为渐新世末的 T_6 界面,但在莺歌海盆地东部靠近基底活动断裂部位,裂陷活动对盆地沉降的影响持续到了新近纪早期。

典型裂谷盆地的特征是,裂陷期形成深断陷,裂后期由于热衰减沉降形成相对较浅的拗陷,拗陷期沉降速度相对缓慢,因此拗陷期和断陷期充填厚度的比值一般小于 0.5。北部湾盆地就具有此种特征,古近纪断陷最深处可达 6 000 m,覆盖于其上的新近纪拗陷则一般为 500~2 500 m。在中国陆上地区(如渤海湾盆地辽河断陷)也具有这种特征。

珠江口盆地、琼东南盆地和莺歌海盆地自中新世末以来,普遍出现沉降加速和地温增高现象,盆地或相邻隆起区出现大规模碱性或拉斑玄武岩浆活动,表明有新的裂陷作用发生。莺歌海盆地西北侧边缘 YX32-1-1 井钻遇拉斑玄武岩,厚达 115 m,代表了新裂陷作用的产物。涠洲岛作为北部湾盆地的一个次级隆起出露了第四纪早期的玄武岩。穿过西沙北海槽的地震剖面揭示了现今仍在活动的年轻地堑。莺歌海盆地以极强的裂后沉降而有别于一般裂谷和大陆边缘盆地,在 T_4 界面形成之后,裂后沉降形成的新近系及第四系厚度可达 10 000 m。在沉降中心部位,仅 T_6 与 T_4 界面之间的中新统三亚组和梅山组厚度即可达 5 000 m 以上,明显不同于一般的裂后热衰减沉降模式。

南海是西太平洋最重要的边缘海盆之一,特别是中央海盆洋壳的存在,可以精确研究其扩张史。对南海海盆的形成机制曾有多种见解,这些见解迄今仍属于假说和推断性质,此种情况表明了南海地质条件的复杂性。南海周缘含油气盆地的成因只有置于整个大背景中,即从全球构造的角度进行研究,才有可能取得较为完整的认识。

对南海成因研究影响最大的是 Tapponnier 等(1986)的解释模式。根据区域大地构造和物理模拟,该模式提出者认为:由于印度地块向欧亚大陆的碰撞和碰撞后的楔入,导致印支地块向南东方向的长距离滑移(700 km 或更大),这样红河断裂必然是左旋走滑,在印支地块向南东滑移的同时,促使加里曼丹地块的南移,同时使南海扩张。根据这一模式,南海是被动成因的,深部地幔的隆起则是区域构造因素引起岩石圈减薄、海底扩张过程中发生的,即后于区域构造变形。

Tapponnier 等的观点曾对东南亚构造研究产生了重要的影响,特别是强调了大陆碰

撞后效应的重要作用。但是这一模式引起了剧烈的争论。Dewey 等(1989)认为,印支地块只有较短距离的走滑,因为印度次大陆向欧亚大陆楔入的效应主要被大陆隆升,特别是青藏高原的隆升所调整,而这一点在 Tapponnier 等的模拟实验中并没有考虑,其模拟实验是二维的,人为地限制了垂向隆升,并假定欧亚大陆东缘是自由边界。近年来对红河断裂带哀牢山段的研究也表明,其走滑距离远不如 Tapponnier 等设想的那样大。在云南省内不同地段,由两侧地质体推算的断距为 100~300 km。另一重要矛盾是对古近纪伸展盆地的成因解释,在莺歌海盆地开展大规模油气勘探之前,已揭示红河三角洲平原的延伸部分属于伸展性盆地。为此,Briaies 等(1993)试图用印支地块的顺时针旋转机制来解释拉伸盆地的成因,但基本上仍坚持红河断裂左旋和印支地块长距离滑移的观点。

近年来,在油气勘探所获取的大量新资料的基础上,通过研究发现一系列与“挤出模式”相抵触的事实。

(1) 莺歌海盆地的演化历史表明,其在古近纪即处于右旋走滑和伸展的构造体制,其中岩石圈伸展是控制盆地演化的主要机制。

(2) 印支地块东侧的归仁-万安北盆地、位于印支地块东南的湄公盆地及万安盆地,在古近纪均以伸展性裂陷为主,并伴随有右旋扭动。如果印支地块向东南方向滑移数百千米至上千千米的话,其前锋应该是挤压背景,而事实却相反,湄公盆地也以伸展构造为主。

(3) 南海北部边缘盆地研究证实,古近纪不同方向、不同构造部位的盆地均以伸展为主,如 NW 向的珠江口盆地、琼东南盆地,以及 NW 向的莺歌海盆地、SN 向的归仁-万安北盆地。此种现象无法用平面应力场的大型走滑活动来解释,而必须考虑深部因素。

(4) 迄今尚未发现红河断裂带向南海中部延伸的证据,更像与 SN 向的越东断裂斜接。南海洋壳区西窄东宽的形态也与渐进挤出模式相矛盾,南海中央裂出洋壳很可能是自东向西发展的。

此外,古地理重建表明,在 45 Ma 之前,巽他古陆(Sundaland)南部与华南地块之间被古南海(Proto-South China Sea)分隔。沙捞越(Sarawak)造山带广泛的增生楔、蛇绿岩、火山活动、收缩变形构造和上隆及地壳加厚作用的研究以及高精度地震层析的研究(Hutchison, 2004; Hutchison et al., 2000),显示在晚白垩纪—始新世期间,古南海为一个被动边缘,而从中始新世开始向南俯冲到婆罗洲(Borneo)陆块之下。显然,该俯冲带的发育与澳洲大陆快速向北的运移有密切关系。在始新世时,卢卡尼亚(Luconia)微陆块和婆罗洲陆块碰撞以后,婆罗洲陆块北侧的俯冲带向东持续延伸,古南海和南沙地块向东呈剪刀形俯冲到婆罗洲地块之下,卢卡尼亚微陆块的西侧为一系列右旋走滑断裂带,控制了古南海的西部边界。因此,古南海向南俯冲导致北部的拖拽也是南海北部及西部盆地伸展的因素之一。

上述事实对“挤出模式”具有挑战性。一些学者认为对南海及其边缘盆地的成因需要更多地从深部背景来探求答案。一种以地幔柱活动为主导控制因素的假说和区域构造变形相结合可能会得到更合理的解释。这一模式的基本点是,认为地幔柱引起的局部对流,加之与岩石圈底部的摩擦力导致大面积的伸展。此种机制可以解释南海不同方向、不同构造部位的盆地得以在古近纪同期伸展。南海地幔柱的形成尚需进一步研究,特别是找到幔源火山岩的更多证据。一个值得注意的事实是,印度-澳大利亚板块向北的俯冲,地