

莺琼盆地 高温超压天然气 成藏理论与勘探实践

谢玉洪 李绪深 童传新 王 华 著



石油工业出版社

莺琼盆地高温超压 天然气成藏理论与勘探实践

谢玉洪 李绪深 童传新 王 华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统总结了莺琼盆地高温超压领域天然气勘探研究的成果,主要分析了莺琼盆地高温超压领域天然气成藏要素;并对获取高精度地震勘探资料的采集处理技术、储层预测和烃类检测进行了详细介绍,包括地层压力预测、钻井结构优化、钻井液性能、测试方案等方面的经验和做法;最后通过勘探实例分析,进一步就高温超压条件下天然气的成藏机理进行了论述,分析了高温超压领域天然气的勘探潜力。

本书可为从事油气勘探的研究人员和生产人员以及高等院校石油地质或勘探专业学生提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

莺琼盆地高温超压天然气成藏理论与勘探实践/谢玉洪等著.
北京:石油工业出版社,2015.10

ISBN 978-7-5021-8448-3

I. 莺…

II. 谢…

III. ①南海-构造盆地-天然气-成藏条件-研究

②南海-构造盆地-天然气-油气勘探-研究

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 175527 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523595

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 19

字数: 480 千字 印数: 1—1000 册

定价: 120.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

序

位于南海西北部的莺歌海盆地和琼东南盆地由于其特殊的大地构造位置和深部构造背景，新生代晚期快速沉降并形成高地温和异常高压地层环境，由此导致其成藏条件的特殊性，并给油气勘探工作带来巨大的挑战。早期的勘探主要瞄准中深层中新统和渐新统的构造圈闭开展工作，但 1978 年南海西部公司在莺歌海盆地钻第一口深井——莺 2 井时，即在 2000 多米钻遇异常高压地层被迫提前完钻，异常高压开始进入了人们的视野。20 世纪 80 年代以来，相继在东方、崖城、乐东地区也都发现了异常高压地层，同时伴随高地温和超压热流体穿层活动，揭示了高温和异常高压是南海西部海域盆地最具特征的地质现象，成为墨西哥湾、北海盆地之后的又一典型的异常高压、高温盆地区。

在早期勘探工作遇到挫折之后，勘探重点转向热流体底辟区的浅层，相继发现了东方 1-1 等一系列大气田，并得出了压力过渡带和邻近超压区的常压地带是天然气成藏有利地区的认识。然而，盆地中深部异常超压区还有更为巨大的油气成藏空间有待于揭示和探明，进军该领域对勘探工作提出了严峻挑战。

我曾在“九五”国家科技攻关时，有幸参与了南海西部海域盆地演化与天然气成藏研究，十分理解勘探部门所经历的艰辛，从 1984 年至 2004 年历时 20 年间，ARCO、BP、雪佛龙等国际著名石油公司作为作业者钻探 9 口、中国海洋石油总公司钻探 11 口高温超压井，均未发现有经济价值的商业气藏，此后外国公司纷纷撤走，后面几轮招标也无人问津。究其原因，首先是许多勘探家认为在高温超压条件下天然气以水溶气为主，形成大规模气藏的可能性很小；此外，浅层气田中 CO_2 含量较高，也预示着深部具有 CO_2 的风险较大；同时还存在是否有良好储层的风险。致使许多中外专家对中深部异常高压和高温环境下的勘探持悲观态度。

经历了多年的深入研究和探索，中海石油（中国）有限公司湛江分公司迎难而上，改进和创新关键性勘探技术，如高压地层完井技术、识别深埋储集体的高精度三维成像技术等，发现了 DF13-1、DF13-2 等高温超压气田，展示了

更大突破的前景。为此，开展了更为系统的科学研究和部署。

谢玉洪与他率领的产学研结合的研究团队，近 10 年来，依托国家重大攻关专项（编号：2008ZX05023-004），攻坚克难，走自主创新、引进、集成、再创新相结合的道路，开展盆地动力学、沉积充填、温压场演化、生烃动力学及高温超压天然气成藏主控因素 5 个方面攻关研究，对莺歌海盆地和琼东南盆地的构造演化过程与走滑—伸展的成盆机制进行了重塑，进一步精细重建了沉积充填序列，编制了各期沉积体系的配置样式，为烃源岩、储层和盖层等成藏诸要素研究提供了扎实基础。通过高温超压天然气在地层水中的溶解析出实验模拟，建立了临界温压条件下水溶相天然气级差出溶成藏的理论模型，突破了地层压力系数大于 1.96、温度大于 138℃ 时主要以水溶气存在难以形成大规模游离气藏的传统认识局限，提出了高温超压环境下水溶相天然气级差出溶成藏模式。在技术方法上，研究并改进了在高温超压环境下储层预测和烃类检测的地球物理方法，经实践检验，取得了良好效果。可以预期上述科研成果在今后油气勘探中将发挥重要作用。

本书反映了莺歌海盆地和琼东南盆地高温超压天然气勘探多年来积累的宝贵资料和认识，并通过国家级重大项目的系统研究取得了创新性和总结性成果。我由衷地祝贺本书的完成和出版！



2012 年 11 月 30 日

前言

高温超压领域的天然气勘探开发一直是国际研究的难点和热点问题，备受业界关注。莺琼盆地高温超压领域天然气的勘探工作长期停滞不前，一直是亟待解决的重大技术难题。国内外已发现油气田的统计资料表明，有利区域是压力过渡带及超压带相邻的常压带。莺琼盆地地层普遍存在高温超压，成藏理论研究和钻探实践一直未取得显著进展。经过 10 余年攻关，以盆地动力学分析为基础，以地震沉积学、层序地层学、油气成藏动力学等理论方法为指导，利用地球物理、区域地质、井筒岩—电资料等，采用多学科、多技术手段相结合的研究方法，从宏观到微观、从理论到实践，在理论研究和实际应用方面都取得了重大进展，特别对莺琼盆地高温超压天然气成藏理论研究取得了更深入的认识，指导了勘探实践，于 2010 年首次钻遇高产能高温超压探井，其后相继发现并成功评价东方大气田，莺琼盆地高温超压领域天然气研究成果得到实践检验。

《莺琼盆地高温超压天然气成藏理论与勘探实践》一书综合了 10 余年来对高温超压天然气成藏的相关理论、方法以及以莺琼盆地为研究背景的实践成果，是研究—实践—再研究—再实践的成功典范。主要阐述了以下内容。

一是盆地地质特征：发育于南海北部前新生代基底上的莺琼盆地，位于古特提斯和环太平洋两大构造域的转换地带，新生代以来其发育演化过程受欧亚、印度—澳大利亚和太平洋三大板块的联合约束，构建了其大地构造背景。受大型走滑断裂的夹持，构造区内形成了类型多样、形态复杂的走滑伸展盆地。以区域构造事件为背景，分析并讨论了莺琼盆地的构造演化过程和沉积特征，构建了莺琼盆地温压场形成的基础。独特的区域构造背景、复杂的盆地形成演化历史和多样的地层沉积特征，演绎出特色鲜明的温压场。

二是莺琼盆地温压场特征：盆地不同区位发育不同类型的温压场，盆地高地温场特征受岩石圈深部动力作用及盆地构造演化、岩石热导率等因素控制，对油气生成、运移和聚集等过程具有重要作用。盆地内存在常压、单层超压和双层超压 3 种压力流体压力结构，引起超压的原因有自源超压和传导型（他源）超压系统两种。自源超压系统自 5Ma 以来地层古压力经历了超压积累—破裂泄压—超压再积累的过程；传导型压力系统自 2Ma 之后压力一直处于积累状态。双层超压结构系统自 10Ma 以来地层古压力演化经历了 3 个超压积累期和两个泄

压频繁期：超压积累—破裂泄压—超压再积累—再破裂泄压—超压再积累的过程。常压—过渡压力系统受到热流体穿层运移的影响，有弱增压发育，主要分布在盆地浅层和边缘。地温场和压力场的相互作用、相互影响和耦合效应对盆地天然气的生、排、聚有重要影响。

三是莺琼盆地生烃动力学及天然气成藏特征：莺琼盆地温压演化史有利于烃源岩的生烃演化，拥有早期抑制、晚期促进及持续动态生烃特征，具有充足的烃源、高强度的晚期充注的特点；高温超压条件下高流体孔隙压力及底辟活动在盆地中新统产生大量裂隙簇，为水溶相天然气从深部向浅部运移提供了垂向输导通道，运移过程中天然气因温压下降逐步析离，进入重力流大型储集体后进一步析离，在高质量的封盖下聚集成藏，构建了“充足烃源—裂隙簇—重力流大型储集体—封盖能力”四元耦合成藏模式。

依据莺琼盆地的温压条件，建立了临界温压条件下水溶相天然气级差出溶模型，根据实验结果，建立了高温超压条件下天然气在地层水中的溶解度图版，认为莺琼盆地天然气成藏主因取决于压力、温度和天然气溶解气量。

本书依托“十一五”国家重大科技攻关项目“莺琼盆地高温超压天然气成藏主控因素”课题研究成果，是全体研究人员善于开拓、勤于实践的集体成果。本书前言由谢玉洪执笔，第一章由任建业、李绪深、童传新执笔，第二章由王振峰、王华、解习农、黄传炎执笔，第三章由陈红汉、谢玉洪、石万忠执笔，第四章由黄保家、谢玉洪执笔，第五章由孟元林、肖军、童传新执笔，第六章由谢玉洪、李绪深、童传新、廖远涛执笔。全书由谢玉洪、李绪深、童传新、王华统稿，最后由谢玉洪审定。

在本书编写过程中，中国海洋石油总公司朱伟林总地质师、蔡东升主任等专家和领导给予了充分的重视和指导；中海石油（中国）有限公司湛江分公司杨计海、张迎朝、陈志宏、刘景环、朱建成、钟泽红、于俊峰、刘平等专家也给予了大力支持和帮助；中国地质大学（武汉）赵淑娥博士完成了大量图文的编排工作，在此一并感谢！

由于本书涉及领域广、内容新、现场实施环节多且复杂，加上资料所限，难免存在疏漏，望读者、专家和同仁不吝赐教。

目 录

第一章 莺琼盆地构造演化与成盆机制	(1)
第一节 区域构造背景	(1)
第二节 莺琼盆地区域充填序列及构造单元划分	(4)
第三节 深部构造特征	(9)
第四节 莺琼盆地构造样式及其成因类型	(16)
第五节 琼东南盆地构造转换带	(23)
第六节 新生代构造演化与成盆动力学机制	(25)
第七节 小结	(34)
第二章 莺琼盆地沉积充填特征与有利储盖分布	(35)
第一节 莺琼盆地层序地层格架	(35)
第二节 莺琼盆地沉积充填演化特征	(41)
第三节 莺琼盆地有利储盖分布	(58)
第三章 莺琼盆地现今温压场特征及演化	(74)
第一节 盆地温度场特征	(74)
第二节 盆地现今地层压力特征	(102)
第三节 莺琼盆地古压力场演化特征	(121)
第四章 莺琼盆地主要凹陷天然气生成	(147)
第一节 烃源岩的分布及地震相特征	(147)
第二节 烃源岩的地球化学特征	(149)
第三节 崖城组海陆过渡相含煤烃源岩识别及其控制因素	(152)
第四节 高温高压环境烃源岩有机质生烃演化	(156)
第五节 凹陷生气潜力评价	(169)
第五章 莺琼盆地高温超压条件下储层质量研究	(179)
第一节 高温超压对储层成岩作用的影响	(179)
第二节 成岩阶段划分与成岩相分布	(189)
第三节 高温超压条件下储层孔隙演化模式及优质储层和有利储层研究	(200)
第四节 主要认识与思考	(212)
第六章 高温超压条件下天然气成藏机理、主控因素及勘探实例	(214)
第一节 莺琼盆地天然气分布特征	(214)
第二节 高温超压盆地天然气成藏机理	(228)
第三节 高温超压条件下天然气成藏条件及主控因素	(250)
第四节 高温超压条件下天然气成藏规律	(256)
第五节 东方区天然气成藏实例	(262)
参考文献	(288)

第一章 莺琼盆地构造演化与成盆机制

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印澳板块的交会地带，是全球构造运动最为活跃的地带之一，也是地球动力学研究的前缘与热点地区。南海洋盆演化过程中由于其边界条件差异，形成了北部离散型边缘、西部转换—伸展型边缘、南部挠曲—伸展复合型边缘及东部海沟挤压型边缘，相应地在南海大陆边缘形成了不同类型的新生代盆地（龚再升等，1997；金庆焕，1989；C. F. Li 等，2007）。这些陆缘盆地构造演化及其沉积充填蕴含着丰富的岩石圈动力学演化研究不可缺少的资料和信息，它既是岩石圈结构、物质组成以及壳—幔、岩石圈—软流圈两级圈层相互作用的结果，即深部地幔动力过程的浅部表现形式（McKenzie，1978），也是区域板块运动在不同陆缘和边界条件下的表现样式。

位于印支和华南地块之间的哀牢山—红河断裂带在南海西北大陆边缘穿过，形成 NW 向走滑构造带并沿走滑断裂带形成菱形、巨厚的莺歌海盆地，同时该区又存在与南海扩张相关的 NE 向构造带，即 NE 向展布的北部湾盆地和琼东南盆地，从而构成了 NW 向和 NE 向构造体制的交结区。该构造交结区处于印澳—欧亚板块碰撞所产生的“挤出—逃逸构造区”和“古南海俯冲拖曳构造区”这两大区域构造变形区的结合部（Clift，2008；任建业和雷超，2011），具有独特的构造环境和丰富的地质记录，以及海量的地质和地球物理资料，是研究南海演变和南海大陆边缘动力过程的最佳场所。

处于南海西北大陆边缘的莺歌海盆地（NW 向）和琼东南盆地（NE 向）（以下简称“莺琼盆地”）长期以来一直是国内外学者所关注的研究地域，盆地内巨厚的沉积充填记录了陆缘岩石圈演化的完整信息，各种构造事件乃至深部过程均可通过盆地中沉积间断、构造反转、火山岩和热历史等方面的响应加以认识。多年来国内外学者在盆地构造特征和充填演化、盆地发育的动力学机制和定量动力学模拟等方面取得了很大的进展，对盆地油气勘探起到了重要的推动作用（Ziegler 和 Cloetingh，2004；Allen 等，2005）。莺琼盆地也是我国海上油气的主力探区，30 多年的油气勘探和以南海形成演化及资源环境为主题的国家基础研究项目的实施，积累了大量的地质和地球物理资料。随着我国国力的不断上升和对能源的迫切需要，现今南海的油气勘探已向深水区推进，与油气勘探密切相关的盆地构造—地层和沉积等基础性研究成为目前亟待解决的重要的基础地质科学问题。因此，在新资料的基础上，深入开展南海北部大陆边缘 NW 向和 NE 向构造交结区盆地动力学研究，不仅有助于理解盆地形成演化规律性，了解能源资源形成与聚集的基础理论问题，而且有助于深化大陆边缘动力学过程，深化南海洋盆演变规律性的认识，为南海北部大中型油气田形成规律以及寻找新的油气勘探领域提供理论支持。

第一节 区域构造背景

莺琼盆地位于古特提斯和环太平洋两大构造域的转换地带，是发育于南海北部前新生代基底上的含油气盆地，新生代以来其发育演化过程受欧亚、印度—澳大利亚和太平洋三大板

块的联合约束（图 1-1），具有极其独特的大地构造背景。

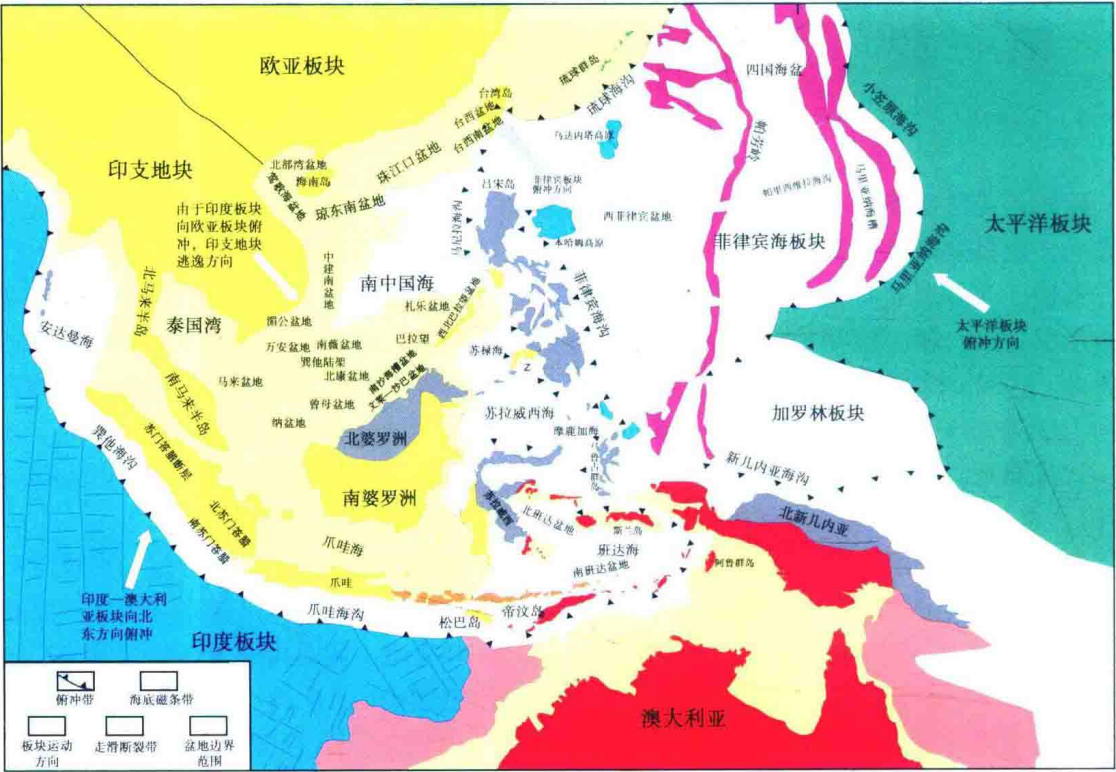


图 1-1 莺琼盆地区域构造位置图

新生代以来，莺琼盆地周围发生了 4 次板块重组事件，对盆地的形成、演化产生了深远的影响，如印度—欧亚板块碰撞导致印支地块的挤出逃逸，澳大利亚板块向北快速漂移和古南海俯冲带的形成，太平洋板块—菲律宾海板块新生代构造运动，南海海盆的扩张、洋脊的跃迁和扩张的停止。

一、印度—欧亚板块碰撞及印支地块的挤出逃逸

印度板块对欧亚板块的构造演化影响最大的地质过程是印度板块在青藏地区与欧亚板块的碰撞活动。56Ma（晚古新世）前，印度板块向欧亚大陆漂移，43.5Ma 时和欧亚板块全面碰撞并逐渐楔入（Lee, 1995）。这种大规模的陆—陆碰撞一方面导致了喜马拉雅碰撞带内发生大陆地壳的相互冲断叠置和加厚作用，另一方面引起当时欧亚板块南缘的印支半岛发生挤出运动，形成东南亚地区大规模的逃逸构造。

挤出逃逸构造在印支地块内部形成多条巨型走滑断裂。如该地块的东北侧为 NW 向哀牢山—红河断裂、西缅甸地块与印支地块之间 Sagaing 断裂、泰国西部 Three Pagodas 断裂和 Mae Ping 断裂等（图 1-2）。受大型走滑断裂的夹持，构造区内形成了类型多样、形态复杂的走滑伸展盆地。

二、澳大利亚板块向北快速漂移和古南海俯冲带的形成

海底磁异常年龄表明，在晚白垩纪—早新生代期间，澳大利亚板块与南极洲板块已经开

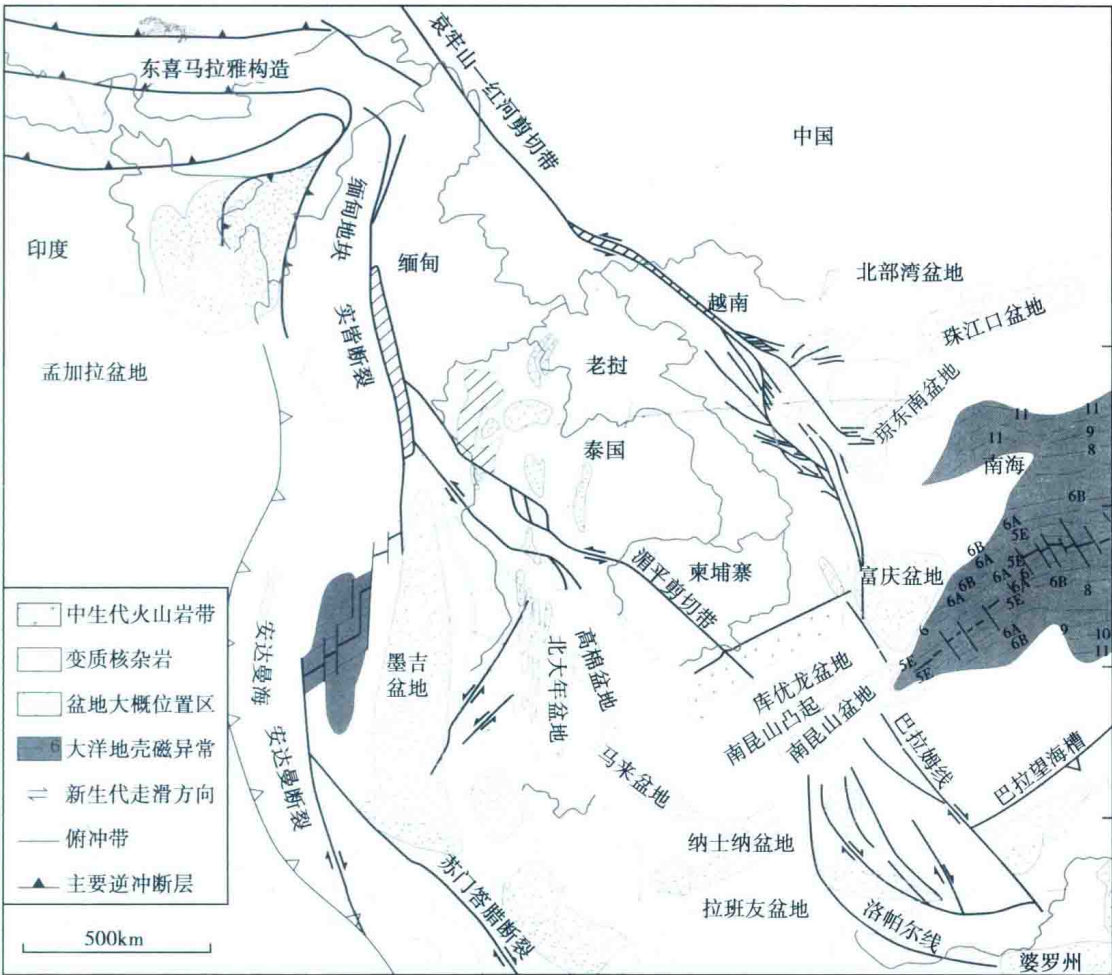


图 1-2 东南亚区域构造格架图（据 Fyhn 等，2009）

始分离，但分离的速度很小。大约从 45Ma 开始，澳大利亚板块向北的漂移速度突然增大，由此导致强大的挤压应力致使 Sumatra 和 Java 南侧北倾的俯冲带开始发育。

重构古地理发现，该时期的 Sundaland 南部与华南地块之间被古南海（Proto-South China Sea）分隔（Morley 等，2001）。通过对 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成像的研究显示，在晚白垩世—中始新世之间，古南海为一个被动大陆边缘，而从中始新世开始向南俯冲到 Borneo 之下。这一过程对南海扩张产生极大影响。

三、太平洋板块—菲律宾海板块新生代构造运动

42Ma 时，全球发生重大的板块构造运动学事件，太平洋板块开始 NWW 向俯冲。沿转换断层的俯冲带捕获一部分太平洋—新几内亚（New Guinea）扩张中心，形成西菲律宾海盆地，Celebes 海盆俯冲到欧亚板块之下；32Ma 开始，主要的西北太平洋弧后盆地开始发育；25Ma 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；20Ma 时，随着澳大利亚板块与新几内亚北部岛弧碰撞，推动着菲律宾海板块向北移动；15Ma 左右，澳大利亚板块与印度尼西亚岛弧碰撞，菲律宾岛弧与南沙地块碰撞，南

海边缘海盆扩张逐渐停止；5Ma 时，向北运动的菲律宾海板块转向 NWW 向运动，运动速率达到了 48mm/a，其前锋吕宋岛弧与欧亚板块在台湾地区发生碰撞，台湾岛开始出现并逐渐形成。

太平洋板块与欧亚板块的碰撞，对欧亚大陆向东和向东南的地幔流动产生阻挡作用，促使其向南运动，从而在南海地区产生 NS 向的拉张应力场，形成对南海海盆的张应力。这些已被 GPS 观测到，并被现代地震勘探实测数据揭示。

四、南海海盆的扩张

现今的南海海盆可以划分为西北、东部和西南 3 个次海盆，其间分布着洋壳，是整个海盆区地壳及岩石圈最薄的部分。其初始扩张约在 34—32Ma，大约在 15.5Ma 基本停止扩张 (Briais 等, 1993)。

南海海盆的扩张形成是新生代以来东南亚地区的重大构造事件之一。对于南海形成演化的动力学机制，许多学者提出了不同的模式。最经典的是 Taylor 等 (1983) 和 Holloway (1982) 提出与古南海洋壳向南俯冲拖曳有关的被动扩张模式，认为白垩纪末至古新世时，由于东亚陆缘俯冲带的后撤，婆罗洲发生逆时针旋转，古南海洋壳开始沿 Lupar 线向婆罗洲俯冲，在俯冲板块负浮力的拖曳下华南陆缘开始 NW—SE 向伸展，至中始新世时沿最薄弱的古火山弧位置拉开于南海。Hall (1996) 认为是古南海俯冲板块的拖曳导致了华南陆缘的伸展和南海的张开，但由于西菲律宾海、苏拉威西海的张开，使古南海向南俯冲于吕宋和苏禄弧之下。而 Morley (2001) 的研究则确定 Lupar 线和 Baram 线为代表的一系列右旋走滑断裂带限制了古南海向南俯冲的边界，该模式得到越来越多资料的证实 (Clift 等, 2008)。

此外，也有一些学者从地幔柱或地幔舌的角度提出一些模式，这些观点强调了南海的形成是一个三维过程，值得重视。从穿过印度尼西亚群岛的剖面图上可以清晰地看到，印度—澳大利亚板板从西、南面沿印度尼西亚群岛海沟向南海深部俯冲，俯冲深度达 1500 km。俯冲板块进入地幔后，部分熔融物质向上对流促使南海持续扩张。

第二节 莺琼盆地区域充填序列及构造单元划分

一、莺歌海盆地充填序列

由于钻探密度小和新近系厚度大等原因，莺歌海盆地目前较少钻井钻遇古近系。在盆地边缘斜坡带钻遇的基底主要由前古近纪的花岗岩、变质岩、凝灰质砂岩和石灰岩、白云岩组成。盆地充填序列主要由古近纪、新近纪和第四纪地层组成，从下向上依次为始新统、渐新世的崖城组和陵水组，中新世的三亚组、梅山组和黄流组，上新世的莺歌海组以及第四纪更新世—全新世乐东组。盆地充填序列特征可概括如下 (图 1-3)。

(1) 始新世岭头组 (T_{100} — T_{80})：在莺歌海盆地尚未钻遇。在北部湾盆地的钻井显示为河流—湖泊—扇三角洲环境沉积的白色砂岩、砂砾岩和深灰色、褐灰色泥岩。推测为盆地基底早期陆相充填沉积物。

(2) 早渐新世崖城组 (T_{80} — T_{70})：该组由上至下分为一段、二段、三段，其相应的地震分层界面为 T_{70} — T_{71} 、 T_{71} — T_{72} 、 T_{72} — T_{80} 。目前莺歌海盆地只有莺东斜坡带的两口钻井钻

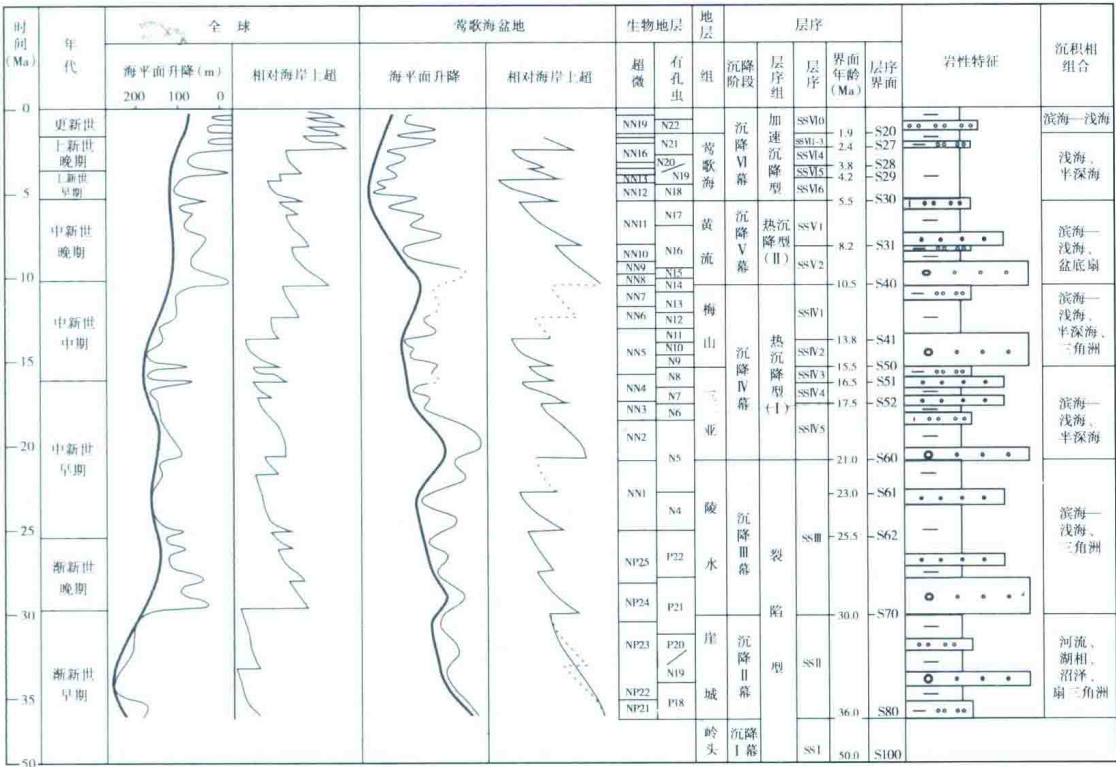


图 1-3 莺歌海盆地新生代海平面变化和综合地层柱状图

遇该套地层，但由于地层中缺乏标志性生物化石而不能确定地层的确切时代归属。相邻的琼东南盆地钻孔资料揭示为泥岩、粉砂质泥岩与粉砂岩、中砂岩呈不等厚互层的含煤地层；在部分钻井中可见多层煤层。这些特征表明崖城组沉积期的泥炭沼泽环境的存在和潮湿、温暖的气候条件。

(3) 晚渐新世—早中新世早期陵水组 (T_{70} — T_{60})：该组由上至下分为一段、二段、三段，其相应的地震分层界面为 T_{60} — T_{61} 、 T_{61} — T_{62} 、 T_{62} — T_{70} 。岩性为浅灰色砾状砂岩、中—粗砂岩与深灰色泥岩互层，局部可有石灰岩。该组下部为海陆过渡相沉积，中上部以海相沉积为主，局部出现了半深海相。

(4) 早中新世三亚组 (T_{60} — T_{50})：其底界为 T_{60} 界面，地震响应为中—强振幅，相位连续—较连续，界面上的超覆和界面下的削截、侵蚀等现象十分明显。该组下部岩性为浅灰色中—粗砂岩、含砾砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与灰色—深灰色泥岩、粉砂岩泥岩互层，局部含钙或含煤；上部岩性为灰白、浅灰色中—细砂岩与灰色泥岩互层，顶部为块状泥岩。该组下部以灰色—深灰色泥岩、砂质泥岩与灰白色砂岩、砂砾岩互层沉积组成，以滨海和浅海沉积为主。上部沉积物进一步变细，颜色变深，以浅海—半深海沉积为主。

(5) 中中新世梅山组 (T_{50} — T_{40})：岩性以普含灰质为特征。分为上、下两段，梅二段为浅灰色厚层细砂岩夹深灰色泥岩、粉砂质泥岩；梅一段为浅灰色厚层泥岩、粉砂质泥岩夹薄层粉—细砂岩或与粉—细砂岩互层，可含钙质。总体上为浅海—半深海沉积体系，边缘发育三角洲沉积体系。总体上，梅山组在该区以细质、含钙多为特点。

(6) 晚中新世黄流组 (T_{40} — T_{30})： T_{40} 为区域性不整合界面，与 10.5Ma 的全球海面下降事件有关，形成区域性大海退的剥蚀面，界面之下的侵蚀、剥蚀和界面之上的上超现象非

常清晰。钻井揭露岩性多为粉砂岩、细砂岩与泥岩互层，细砂岩夹泥岩互层，或泥岩夹粉砂岩、细砂岩；平面上沿海南岛周缘地层厚度薄，岩性粗，向盆地中央厚度逐渐增大，岩性逐渐变细；主要为滨海—浅海环境的沉积物。其中，黄流组下部二段分布范围较小。平面上沿海南岛周缘地层厚度薄，岩性粗，向盆地中央厚度逐渐增大，岩性逐渐变细。

(7) 上新世莺歌海组 (T_{30} — T_{20})：主要由大套浅灰色、深灰色厚层泥岩或粉砂质泥岩组成，夹薄层浅灰色粉砂岩、泥质砂岩，在盆地中部见块状细砂岩。莺歌海组可分为上下两段，岩性向上有所变粗。该组以明显的陆架、陆坡沉积和“S”形前积层为特征。盆地总体具有北高、南低趋势，因而盆地西部、西北部陆坡推进较快，陆架宽广；东部推进缓慢，呈加积式，陆架较窄。

(8) 第四纪更新世—全新世乐东组 (T_{20} —海底)：主要由浅灰色、绿灰色黏土为主，夹薄层粉砂、细砂，富含生物碎屑。

二、琼东南盆地充填序列

琼东南盆地的基底由前新生代的火成岩、变质岩及沉积岩组成，包括花岗岩、混合岩、角岩、凝灰岩、集块岩、安山玢岩、英安流纹岩、白云岩等。盆地的充填序列则主要由新生代和第四纪地层组成，从下往上依次为始新统，渐新世的崖城组和陵水组三段、二段，中新世的陵水组一段、三亚组、梅山组和黄流组，上新世的莺歌海组以及第四纪更新世—全新世乐东组。盆地的地层单元具有如下特征：

(1) 始新世岭头组 (T_{100} — T_{80})：始新统属于非海相沉积，为断陷早期的产物。盆地受早期断裂格架控制而呈地层“多凹多凸”的特点，凹与凸之间相互独立，具有多物源的特征，隆起区物源均四处扩散。此时沉积面积较小，沉积中心多，岩性与岩相变化大，发育了多个断陷湖盆，每个湖盆中心有中—深湖相沉积，滨浅湖相在其外围呈环带状展布，沉积的最大厚度可达 2000m。该套地层在北部湾盆地已钻遇，其顶部、底部有白色砂岩、砂砾岩，其大部分为深灰色、褐灰色等泥岩。总体上为河流—湖泊—扇三角洲沉积体系的产物。地震勘探剖面解释结果与北部湾盆地及珠江口盆地始新统烃源岩相当，对莺 9 井钻获原油富含 C_{30-4} 甲基甾烷生物标志化合物特征也与这两个盆地相似，故推测盆地的早期断陷湖盆存在始新统，但分布局限。

(2) 早渐新世崖城组 (T_{80} — T_{70})：崖城组分为 3 段，其底界面为 T_{80} ，顶界面为 T_{70} ，属于断陷晚期的沉积，沉积早期为海陆过渡环境，中、晚期已完全变为海相环境，为滨浅海相沉积。崖三段底部为棕红色砂砾岩夹深灰色薄层泥岩；中上部为灰白色砂岩与深灰色泥岩的不等厚互层，且夹煤层和煤线。崖二段则以深灰色厚层泥岩为主，下部夹灰白色薄层砂岩。崖一段为灰白色砂岩、深灰色泥岩、砂质泥岩夹煤层和碳质泥岩。崖城组在盆地西部的最大厚度可达 2500m，且呈北厚南薄的格架样式。根据前人所作的沉积相和沉积体系图，该时期仍具有多水系、多凸起、多凹陷的特点，隆凹格局仍较明显，沉积体系丰富，多物源现象仍然存在，物质从隆起区多方扩散。该组为碎屑滨岸（含沼泽）沉积体系的产物，是盆地重要的烃源岩层段。

(3) 晚渐新世—早中新世早期陵水组 (T_{70} — T_{60})：陵水组亦分为 3 段，其底界面为 T_{70} ，顶界面为区域不整合面 T_{60} 界面，地层仍呈北厚南薄之势，属于断陷晚期的产物。陵三段主要由灰白色—浅灰色砾岩、砂岩组成，夹深灰色泥岩，局部见生物灰岩，是盆地的重要产气层；陵二段则以灰色—深灰色泥岩为主，夹浅色薄层砂岩；而陵一段为浅灰色砂砾、中

粗砂岩与灰色—深灰色泥岩呈不等厚互层状产出（其顶部的不整合面特征明显）。该组下部为海陆过渡相沉积，中上部以海相沉积为主（局部出现了半深海相），可以说，该组以滨岸碎屑沉积体系和半封闭浅海沉积体系为主体。

（4）早中新世三亚组（ T_{60} — T_{50} ）：三亚组是断拗或拗陷早期（盆地裂后充填初期）的产物，分为上、下两段，其底界面为 T_{60} 。下部由灰色—深灰色泥岩、砂质泥岩与灰白色砂岩、砂砾岩互层沉积组成，顶部为块状泥岩。上部沉积物进一步变细，颜色变深。该组是浅海—深海沉积体系的产物（早期发育有滨岸碎屑沉积体系）。物源具有海相单方向的特征，“多凸多凹”的占地理背景已经消失，但是陆架坡折不甚明显，盆地性质可能与末端陡倾的缓坡类似，该期物源方向主要为北西向。三亚组一段物源方向明显变为北西向，水体较三亚组早期深，深海、半深海面积扩大，其余特征与三亚组二段相似。

（5）中中新世梅山组（ T_{50} — T_{40} ）：梅山组分为上、下两段，其底界面为 T_{50} ，顶界面为 T_{40} 。梅二段为褐色、灰白色砂岩、钙质砂岩及钙质、白垩质砂岩与石灰岩及深灰泥岩不等厚互层状产出，梅一段为浅灰色泥岩，夹薄层粉砂岩、细砂岩。总体上为浅海—半深海沉积体系。

（6）中中新世黄流组（ T_{40} — T_{30} ）：黄流组分为上、下两段，底界面为 T_{40} ，顶界面为 T_{30} ，为拗陷阶段的产物，在琼东南盆地该组地层部分缺失。黄二段主要为浅灰色、灰白色细砂岩、泥质粉砂岩夹薄层灰色、深灰色泥岩；黄一段主要为浅灰色、灰色砂质灰岩，灰黄色生物灰岩与灰色、深灰色泥岩及浅灰色粉砂岩、细砂岩不等厚互层。主要为滨海—浅海沉积体系的沉积物。

（7）上新世莺歌海组（ T_{30} — T_{20} ）：莺歌海组由大套浅灰色、深灰色厚层块状泥岩组成，夹薄层浅灰色粉砂岩、泥质砂岩，中部夹厚层块状细砂岩。整体上该组以浅海—半深海沉积体系为主，高频层序样式非常典型，其重要特征是前积楔—斜坡扇非常发育。

（8）第四纪更新世—全新世乐东组（ T_{20} —海底）：主要由浅灰色、绿灰色黏土岩为主，夹薄层粉砂、细砂，富含生物碎屑，未成岩。

三、盆地构造单元划分

根据盆地的构造地层分析，把莺歌海盆地划分为4个构造单元，琼东南盆地划分为3个一级构造单元和19个二级构造单元。

莺歌海盆地的4个构造单元包括莺东斜坡带、莺西斜坡带、中央拗陷带和临高低凸起（图1-4）。

莺东斜坡带是指盆地东部边缘的单斜带，由莺东斜坡和河内斜坡组成。其中，莺东斜坡包括莺东断裂和1号断裂上升盘和下降盘局部；河内斜坡主要指泸江断裂上升盘。平面上为NW向延

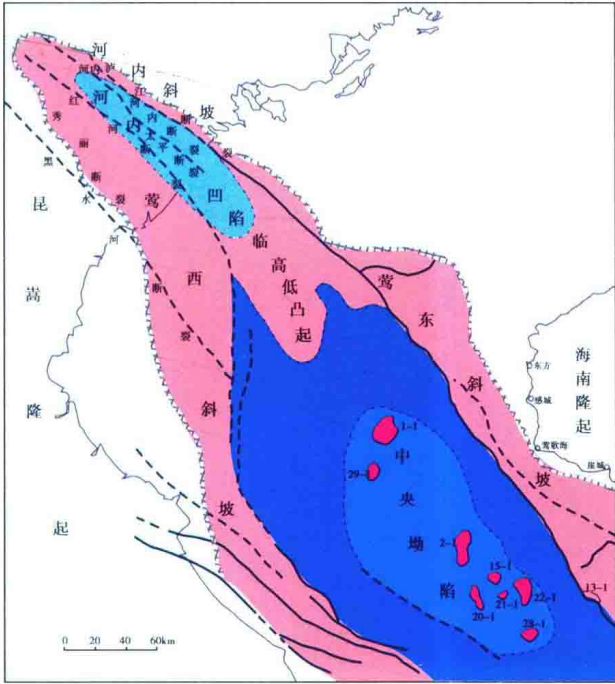


图1-4 莺歌海盆地构造单元划分图

伸，为宽展的“S”形形态。

莺东斜坡带在莺东断裂和1号断裂上升盘比较宽缓，埋藏浅，发育岩性圈闭；下降盘埋藏深，表现为1号断裂面轨迹模糊，断裂下降盘基底和沉积层界限不清楚，甚至深部地层反射界面难以追踪。

莺西斜坡带位于莺歌海盆地中央坳陷带和昆崙隆起之间，进一步可分为北部的莺西断裂带和中南部的蓝江—马江断裂带。

由于资料限制，蓝江—马江断裂带的具体构造形态尚不清楚。从现有资料看，断裂带走向北西，主要由一系列断面倾向北东方向的断裂组成。莺西断裂带呈近南北方向延伸，倾向为东，局部出现西倾的小型断裂，从地震勘探剖面上可以看出，断裂带的主要活动期在 T_{70} (30Ma) 以前，断裂面控制了 T_{70} 界面以下的地层，渐新统陵水组 (T_{70} — T_{60}) 覆盖在断裂带之上。因此，莺西断裂带构成了 30Ma 以前的盆地边界。

中央坳陷带包括莺歌海盆地北部的河内凹陷和中南部的中央坳陷 (图 1-5)。中央坳陷总体为长椭圆形，呈 NW 向沿盆地的轴心线分布，盆地沉降幅度大，一些学者认为其新生代的基底超过 17km 。中央坳陷带是盆地的生烃凹陷区，具有沉降深、埋藏厚的特点，目前以浅海—半深海为沉积环境的中新统三亚组、梅山组海相泥岩均成熟，并处于生烃高峰。

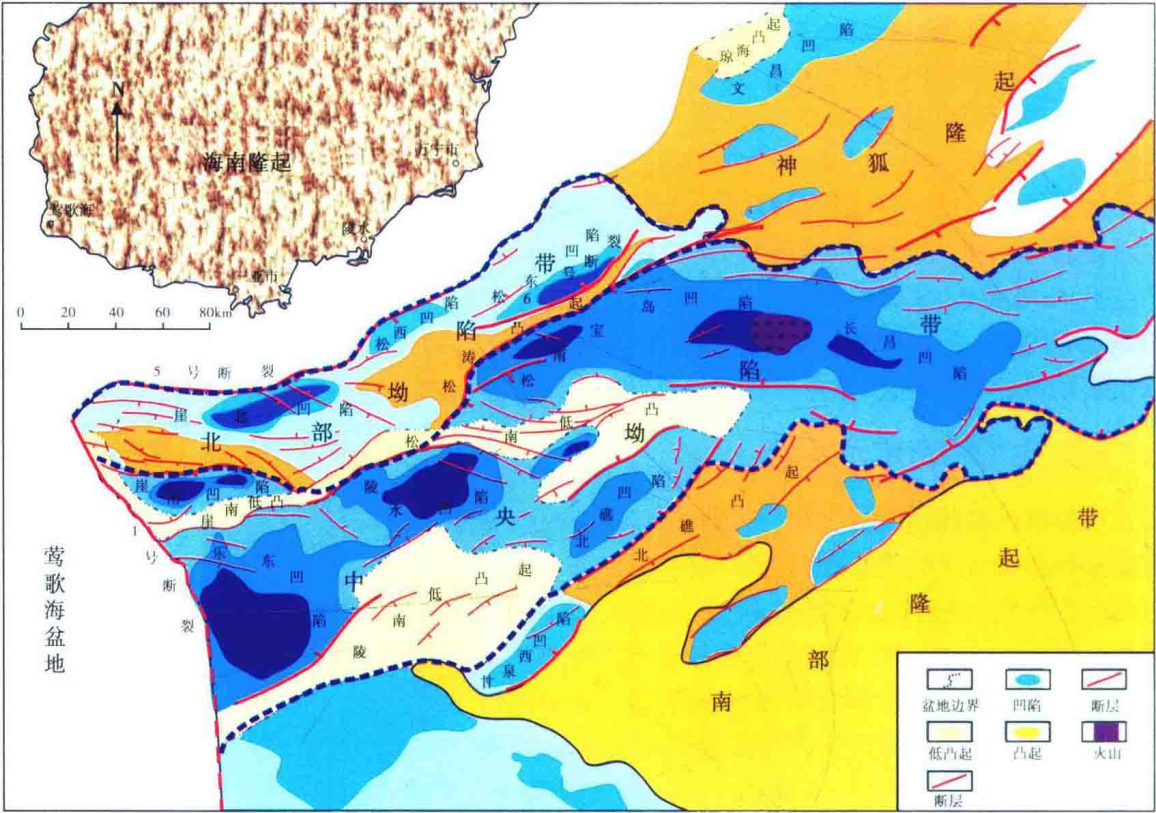


图 1-5 琼东南盆地构造单元划分图

底辟构造是中央坳陷最典型的构造类型之一，面积大，分布广，为目前莺歌海盆地油气勘探的主力战场，先后发现了东方气田和乐东气田等，形成了莺歌海盆地油气田群带分布的格局。一般认为，底辟构造最早可能从中中新世梅山期和黄流末期开始发育，高峰期为晚中

新世莺歌海期—第四纪。其发育机制为盆地快速、大幅度沉降,巨厚的欠压实泥岩和泥岩排出的高热流体的底辟刺穿作用,红河断裂右旋走滑也是重要的诱发机制。

临高低凸起是河内凹陷反转构造带向南的延伸,其中发育了一些短轴状背斜构造。凸起两翼为凹陷区,其构造形态表现得比较完整和典型,是一个顶平、翼陡的宽缓背斜。 T_{60} (新近纪—古近纪分界面、三亚组底界面)、 T_{50} (早—中中新世分界面、梅山组底界面)和 T_{40} (中—晚中新世分界面、黄流组底界面)界面显著“上超下削”,表明这些界面的形成是由于临高地区在该时期经历了强烈的构造抬升运动。

反转开始的时间应该在 T_{60} 之后, T_{50} — T_{40} 时期比较强烈,可以一直持续到 T_{30} (莺歌海组底界面)界面发育时期。因此,在临高低凸起区, T_{60} — T_{40} (也可能持续到 T_{30})之间为盆地裂后期演化阶段发育的“反转构造层”,晚中新世莺歌海期至今,临高低凸起区处于构造活动平静期。

琼东南盆地构造单元分北部坳陷带、中央坳陷带和南部隆起带4个一级构造单元 (“南北分带”),并可进一步细分出崖北、松西、松东、崖南、乐东—陵水、松南—宝岛、北礁、北礁西、甘泉西和长昌12个凹陷以及崖南低凸起、松涛凸起、陵南低凸起、松南低凸起和北礁凸起等盆内二级构造单元 (图1-5)。

北部坳陷带以5号断裂与海南隆起为界,南面以3号、6号断裂与崖南低凸起和松涛凸起为界。主要的凹陷包括崖北凹陷、崖南凹陷、松西凹陷、松东凹陷4个凹陷。

中央坳陷带以2号断裂为界,北部为北部坳陷带,南部为中央坳陷带。包括乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、北礁凹陷、宝岛凹陷和长昌凹陷,以及凹陷南部的低凸起带,结构比较复杂,整个琼东南盆地总体表现为一个大型的、不对称的、以中央坳陷带为核心的复式地堑盆地。

在中央坳陷带,陵水凹陷与松南凹陷过渡位置发育一条NW向构造脊,地球物理资料揭示该构造脊为典型的重力高,表明该构造的形成具有深刻的地球物理动力学背景,且古近系厚度在该区带显著变薄。同时,在西部伸展区控凹断裂为SE方向,而在东部伸展区为NW,即盆地的极性由西向东发生改变,因此,该构造脊将盆地分为西部伸展区和东部伸展区。

南部隆起带为中央坳陷带以南的大面积区,不发育较大规模的凹陷结构。主要发育一系列北东向规模较小的断陷盆地,从凹陷形态、规模及控凹断裂展布方向三方面来看,南部隆起发育凹陷与神狐隆起上发育的凹陷具有相似性。

总之,琼东南盆地总体构造格局是“南北分带,东西分块”,北部坳陷带主要发育崖北凹陷、崖南凹陷、松东凹陷、松西凹陷4个凹陷;中央坳陷带主要由乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷、北礁凹陷等凹陷组成;南部隆起带主要由一系列NE向小型断陷组成。

第三节 深部构造特征

一、南海地区层析成像及壳幔结构

层析成像技术是观测地球内部壳幔结构的有效手段。从穿过印尼群岛的剖面图上可以