

南海北部深水盆地特征及其动力学背景

Characteristics and geodynamic setting of the basins in deep-water area of the Northern South China Sea Margin

袁玉松¹, 丁玫瑰²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 江汉石油管理局地球物理勘探公司, 湖北 潜江 433100)

中图分类号: P5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)12-0102-09

南海北部陆缘深水盆地指水深 > 300 m 的陆缘盆地, 包括琼东南盆地中央坳陷带及其南部隆起区、神狐隆起南侧、珠江口盆地珠二坳陷及其南部的西

沙—中沙隆起和一统暗沙隆起区(图 1), 总面积超过 120 000 km²[1]。2006 年, 从南海北部陆缘珠江口盆地白云凹陷水深 1 480 m 的荔湾构造上钻探的 LW3-1-1

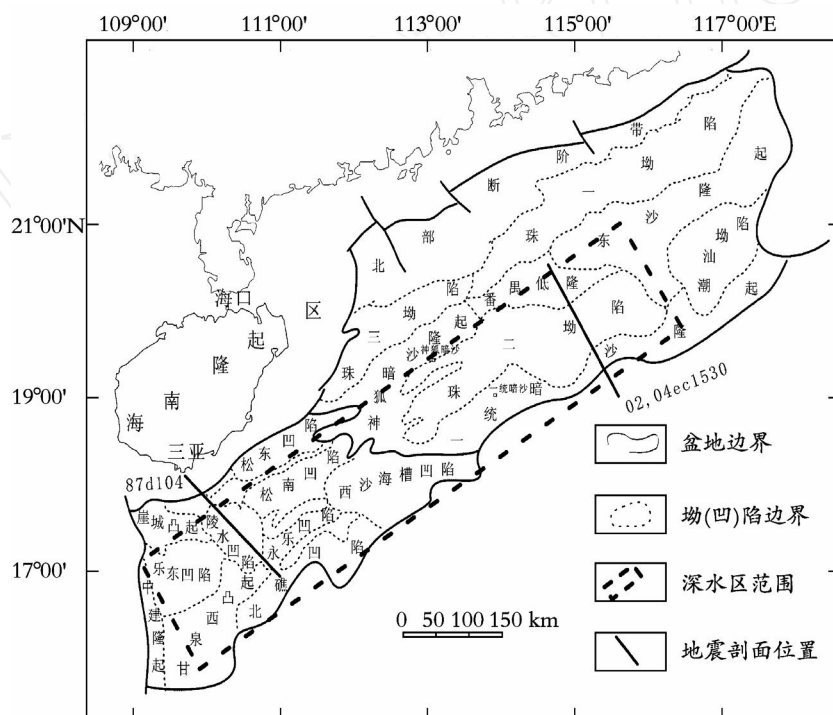


图 1 南海北部深水盆地位置

井获得天然气重大发现, 钻孔揭示天然气层厚 56 m, 含气构造面积 60 km², 预计可采储量 1 133 × 10⁸ ~ 1 699 × 10⁸ m³[2], 有望成为中国海域目前最大的天然气产地, 表明南海北部陆缘深水盆地具有广阔的油气勘探前景。

作者在前人研究成果基础上, 进一步总结、归纳南海北部陆缘深水盆地的基本地质特征, 依据南海的形成、演化历史, 分析南海北部陆缘深水盆地形成的地球动力学背景, 以最新的地震资料解释成

果为依据, 恢复深水盆地构造沉降史, 研究盆地发育、演化特征, 以期在一定程度上对中国目前油气勘探重要战略选区——南海北部深水盆地的油气勘探提供决策依据。

收稿日期: 2007-11-06; 修订日期: 2008-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672197); 国土资源部项目(XQ-2004-05)

作者简介: 袁玉松(1967-), 男, 湖南邵阳人, 博士后, 主要从事沉积盆地构造热演化研究, E-mail: ysyuan@126.com

1 地壳与基底结构特征

1.1 地壳结构特征

南海北部地壳结构研究经历了声纳浮标、双船扩展排列地震(EPS)和海底地震仪探测(OBS或OBH)几个阶段^[3]。中美南海海洋地质科学联合调查项目的声纳浮标、双船扩展排列地震通过南海北部陆缘东部、中部和西部的3条EPS断面、中日合作和中德合作的海底地震仪探测(OBS/OBH)为研究南海北部陆缘的地壳结构提供了宝贵资料。

声纳浮标和双船扩展排列探测资料揭示南海北部陆缘地壳结构具如下特征:(1)南海北部陆缘区地壳厚度横向变化显著。在东部断面,由东沙隆起至洋陆边界,上地幔逐渐抬升,下地壳逐渐减薄,地壳厚度由32 km减薄到12 km;在中部断面,由珠二坳陷到洋陆边界地壳快速减薄,地壳由27 km减薄到18 km;在西部断面,珠三坳陷和西沙海槽地壳显著减薄,地壳厚度分别为23 km和14 km^[4];(2)EPS资料揭示南海北部陆缘地壳结构的另一显著特征是上地壳远比下地壳薄,上地壳厚度仅3~10 km,而下地壳厚度为10~25 km,下地壳是上地壳的3~5倍^[4];(3)下地壳的下部普遍存在高速层,尤其是北部陆缘的中、东部地区。南海北部大陆边缘地壳厚度、地壳结构横向变化特征和华南大陆沿海地区不同。沿海地区地壳厚度在28~30 km左右^[5-7],横向上没有明显变化,且上地壳与下地壳厚度基本相等。

根据OBS/OBH资料解释的地壳结构与上述结论有差别。赵岩等^[8]根据OBS93测线资料,将中部断面(OBS93)地壳分上地壳、中地壳和下地壳3层,无下地壳高速层,大陆架和上陆坡地壳厚度为26~30 km,下陆坡为13~22 km,深海盆为8 km。邱学林等^[3]则将此断面只划分为上、下地壳两层,且下地壳底部存在高速层,上下地壳厚度基本相等。施小斌等^[9]研究西沙海槽岩石圈热流变结构时,认为西部OBH96-4断面地壳以西沙海槽为中心呈对称结构,海槽南北地壳厚度大,中心地壳厚度薄,且上地壳反而比下地壳厚,无下地壳高速层。

不同资料揭示的地壳结构特征有一定差别,其主要区别在于上、下地壳厚度的大小和下地壳有无高速层存在这两个方面。EPS资料揭示上地壳薄,下地壳厚,下地壳普遍存在高速层。OBS/OBH资料揭示上、下地壳厚度基本一致,下地壳高速层仅在

局部地区存在。但是,两者揭示的地壳总厚度、莫霍面形态以及新生代沉积层的基底埋深等方面都很吻合,它们一致揭示南海北部大陆架和上陆坡的地壳厚度为30~26 km,下陆坡的地壳厚度为22~13 km,洋壳的厚度约为8 km。

南海北部陆缘岩石圈厚度与地壳厚度变化趋势一致。热岩石圈厚度在大陆架大约90 km,往陆坡方向减薄,在下陆坡、西沙海槽和洋壳区热岩石圈厚度减薄至60~65 km^[10]。

1.2 基底结构特征

钻井揭示南海北部陆缘新生代盆地基底以燕山期花岗岩为主,同位素年龄为70.5~130 Ma^[11],也存在更古老的前寒武纪、加里东期、海西期变质岩系和沉积岩以及中生代沉积岩基底。如西永1井钻遇同位素年龄为1450 Ma的前寒武纪花岗片麻岩;莺1井钻遇中寒武统变质砂岩;莺-琼盆地和北部湾盆地钻遇泥盆-石炭纪灰岩^[11]。变质岩基底主要分布于中沙-西沙、南沙和东沙等长期隆起的古老地块上,古生代沉积岩基底主要分布于西区,中生代沉积岩基底主要分布于东区,地震资料解释认为珠江口盆地东部中生代沉积岩广泛分布,潮汕坳陷是中生代集中分布区^[12]。中生代花岗岩则是南海北部陆缘分布最广泛的前新生代基底岩系。

从基底岩性及其分布看,南海北部陆缘盆地基底可能是由不同的碎块在加里东期、海西期、印支期不同阶段拼合而成^[13],并经历了燕山期岩浆活动的频繁作用与改造。南海北部陆缘盆地基底与中国华南大陆具有相同的演化历史和岩性特征,是华南大陆向海域的延伸。

2 盆地构造演化特征

2.1 区域性构造运动

南海处于太平洋、欧亚、菲律宾3大板块交汇处,中生代以来构造活动性强。黄慈流等^[14]认为南海东北部及其邻区中生代晚期以来构造运动频繁,并归纳为5次构造运动:神狐运动、西布运动、南海运动、东沙运动和蓬莱运动。李平鲁等^[15]、陈长民等^[16]认为珠江口盆地自形成以来至少发生了5次构造运动,即神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动和东沙运动。姚伯初^[17]认为南海北部陆缘新生代发生过3次区域性构造运动:神狐运动、南海运动和东沙运动。

2.1.1 神狐运动

发生于白垩纪晚期-古新世早期,在地震剖面上表现为区域性角度不整合(T_g),上白垩统-中、下古新统地层缺失,地壳迅速减薄,南海北部陆缘的前新生代褶皱基底进入裂陷早期,形成 NNE-NE 向断陷,珠江口盆地北部断陷带开始发育,盆地范围内形成了神狐组冲积扇和扇三角洲为底的一套粗碎屑岩。

2.1.2 南海运动

发生于始新统晚期-早渐新世,南海海底扩展形成破裂不整合面(Break-up Unconformity)。珠江口盆地形成区域不整合 T₇₀,恩平组顶部与珠海组底部地层缺失,琼东南盆地形成区域不整合 T₆₀,陵水组顶部和三亚组底部地层缺失。南海运动是最为强烈的一次构造运动,延续时间长,海水从南向北大规模入侵,盆地由裂陷向拗陷转化,开始进入盆地的热沉降阶段,沉积环境由海湾逐渐向浅海、开阔海演化。

2.1.3 东沙运动

发生于中中新世晚末,相当于台湾的海岸山脉运动,台东地体与东南沿海陆缘拼贴。珠江口盆地表现为区域性不整合 T₂₀,韩江组顶部-粤海组底部地层缺失,琼东南盆地形成区域不整合 T₄₀。东沙运动使盆地在沉降过程中发生断块升降,隆起剥蚀,并伴有挤压褶皱、断裂和频繁的基性岩浆喷发,产生了一系列以 NWW 向张扭性为主的断裂,它对

圈闭的形成、油气的运移、聚集产生了极为重要的影响。

三大区域性构造运动控制南海北部陆缘盆地的沉降、沉积充填历史。神狐运动产生一系列北东向断裂和地堑-半地堑,形成古新世至早渐新世陆相沉积;南海运动将原来的地堑-半地堑进一步拉开,使盆地进入断拗转换阶段,沉积环境由陆相转为海陆过渡相至海相;中中新世末的东沙运动使北部陆缘地貌发生显著改变,导致现今陆坡的形成。

2.2 构造演化阶段划分

中生代时期,在太平洋板块的俯冲作用下,中国东部发育巨大裂谷系统。裂谷系统的波及范围在东西向达 600~1 000 km,南北向达 4 000 km,南海北部陆缘亦属于此裂谷系统^[18]。南海北部陆缘新生代盆地与中国东部大陆裂谷盆地相似,具有双层结构特征,即早期(古近纪)为断陷,晚期(新近纪)为拗陷。在珠江口盆地和琼东南盆地,古新世(初始裂谷期)和始新世(早裂谷期)为陆内裂谷阶段;渐新世(晚裂谷期)为陆间裂谷阶段;中新世以来为被动大陆边缘阶段^[19],其中,中新世为热沉降期,上新世以来为构造活动明显增强的新构造期(图 2),珠江口盆地表现为 10~5.3 Ma 以来断裂、岩浆活动增强,琼东南盆地则表现为 5.3 Ma 以来的晚期快速沉降。

系	统	珠江口盆地		琼东南盆地		构造演化阶段		绝对年龄 (Ma)		
		组	地震界面	组	地震界面					
Q				乐东组		新构造期	被动大陆边缘	2.6		
N	N ₂	万山组		莺歌海组	T ₂₀			热沉降期		5.3
	N ₁	粤海组		黄流组	T ₃₀	陆间裂谷	10.5			
		韩江组	T ₂₀	梅山组	T ₄₀		陆内裂谷			16
		珠江组	T ₄₀	三亚组	T ₅₀					23.3
E	E ₃	珠海组	T ₆₀	陵水组	T ₆₀	晚裂谷期	陆间裂谷	28		
		恩平组	T ₇₀	崖城组	T ₇₀			早裂谷期	32	
	E ₂	文昌组	T ₈₀		T ₈₀	初始裂谷期	陆内裂谷		56.5	
	E ₁	神狐组	T ₉₀		T ₉₀			前裂谷期	65	
AnR			T _g		T ₁₀₀					

图 2 珠江口盆地、琼东南盆地发育演化图(据林荣根^[19],有修改)

3 断裂与岩浆活动特征

3.1 断裂活动特征

断裂是构造活动性最为直接的表现形式之一。饶春涛等^[20]对珠江口盆地的 1 818 条断裂(生长指数 1.05 ~ 1.10, 两盘落差 > 10 ~ 15 m) 进行统计分析发现断裂的发育时间主要集中在 3 个阶段, 即晚白垩世-早渐新世(833 条)、中新世早期-中新世中期(321 条)、中新世晚期至今(1 479 条)。陈长民等^[16] 统计研究, 珠江口盆地 1 818 条断裂可以分为 3 类: 中新世以前形成的断裂有 339 条; 中中新世以后形成的断裂有 985 条; 长期继承性活动或间歇性活动的断层 494 条。李平鲁^[21] 研究统计, 珠江口盆地第三系底有各类断裂 900 条, 早中新世末, 断裂数量增至 1 766 条; 中中新世, 断裂减少至 1 479 条; 到晚中新世末期, 新构造运动比较活跃, 新产生的断裂约 1 147 条。吴世敏等^[22] 进一步分析认为断裂活动主要集中在 56.5、23.3、8 Ma 左右 3 个时间段。断层的性质早期表现为张性为主, 晚期以张扭为主。按断裂走向可分为 3 组, 晚白垩世的 NNE-NE 向, 始新世的 NE-NEE 向, 始新世末到渐新世初的 EW^[23], 这 3 组断裂分别代表即神弧、南海和东沙 3 次区域性构造运动^[17]。无论从哪个角度统计, 在中、晚中新世以后断裂活动十分活跃, 这些断裂主要发育在隆凹交界继承性发育的大断裂附近, 如珠一、珠三拗陷边界断裂带。但总体上看, 珠江口盆地东部晚期断裂比西部更活跃, 特别是东沙隆起、番禺低隆起、白云凹陷北坡、潮汕拗陷等处于陆架陆坡转折带的区域, 晚期断裂尤其发育。

3.2 岩浆活动特征

南海北部陆缘新生代构造-岩浆活动频繁。珠江口盆地自形成以来至少发生了 5 次构造运动^[15, 16], 与之相对应, 至少存在规模不等的 5 期岩浆活动^[15]。Li 等^[24] 进一步认为它们可以分 3 期, 即 57.1 ~ 27.17 Ma(古新世至早渐新世)的中酸性岩浆岩、24.3 ~ 17.1 Ma(晚渐新世至中中新世)的玄武岩及 10 ~ 5 Ma(晚中新世至上新世)的玄武岩。断陷发育期, 岩浆活动从早期的中酸性裂隙式喷发逐渐向晚期的中心式基性喷发转变; 晚渐新世至中中新世海底扩张期间南海陆缘仅有少量岩浆活动^[25], 处于火山活动的相对宁静期, 而且此时华南大规模的岩浆活动突然停止^[15]。晚中新世开始岩浆活动逐渐活

跃, 晚上新世到更新世达到高峰, 以大规模的中基性火山喷发为特征^[26]。南海扩张停止以后, 尤其是上新世以来, 陆缘岩浆活动频繁^[23], 形成了 1 条 NEE 方向的断续的火山岩带, 岩性主要为玄武岩。

吴世敏等^[22] 统计分析发现: 南海北部陆缘岩浆活动集中在 57 ~ 40 Ma、27 ~ 17 Ma 及 8 Ma 以后 3 个阶段, 并与断裂活动时期有很好的对应关系。

Yan 等^[27] 也认为, 珠江口盆地的岩浆活动可以分为 3 期, 即古新世-始新世, 渐新世-中中新世和晚中新世-第四纪, 并分析认为, 南海北部陆缘与裂谷和海底扩张同期的岩浆活动微弱, 岩浆活动主要发生于海底扩张停止之后, 南海北部陆缘为非火山型被动大陆边缘。

珠江口盆地新生代火山岩以玄武岩为主, 存在多期喷发。古新世-始新世在珠江口盆地内隆起部位形成了中酸性火山岩, 包括安山岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩, K-Ar 测年为 57 ~ 49 Ma; 始新世-渐新世以中性喷出岩为主, 主要见于裂谷盆地内; 新近纪主要为碱性玄武岩和拉斑玄武岩。地震剖面揭示这些火山岩一般都沿裂隙或断裂交叉带发育, 受到断裂控制。古近纪的火山岩非常分散, 规模也很小, 跨度仅数公里; 而新近纪-第四纪火山岩集中在珠三拗陷北部、珠二拗陷东部的隆起带和东沙隆起的南缘, 规模相对较大, 跨度达数十公里。珠江口盆地的火山岩表现为从含较多中酸性岩石的钙碱性系列向碱性和拉斑玄武岩发展、岩浆中深源物质逐渐增多的趋势。

4 深水盆地构造沉降特征

选取穿过珠江口盆地和琼东南盆地深水区的代表性地震剖面 ec 1530 和 87 d104(图 1), 依据最新解释成果资料, 进行构造沉降史恢复。

珠江口盆地白云凹陷 ec1530 地震剖面构造沉降史恢复结果表明: 珠江口盆地深水区始新世以来存在两期相对快速的沉降过程, 即始新世和渐新世, 对应的最大构造沉降速率分别为: 74, 307 m/Ma。渐新世以后, 盆地进入缓慢沉降阶段(图 3 a)。

琼东南盆地 87 d104 地震剖面构造沉降史恢复结果揭示: 琼东南盆地深水区始新世以来存在 3 期快速沉降过程, 即始新世、渐新世-早中新世以及上新世以来(图 3 b), 对应的最大构造沉降速率分别为: 41, 231, 179 m/Ma。中-晚中新世为缓慢沉降过程。可见琼东南盆地除在裂谷阶段存在幕式快速沉降过

程外,裂后热衰减阶段又发生晚期加速沉降过程。

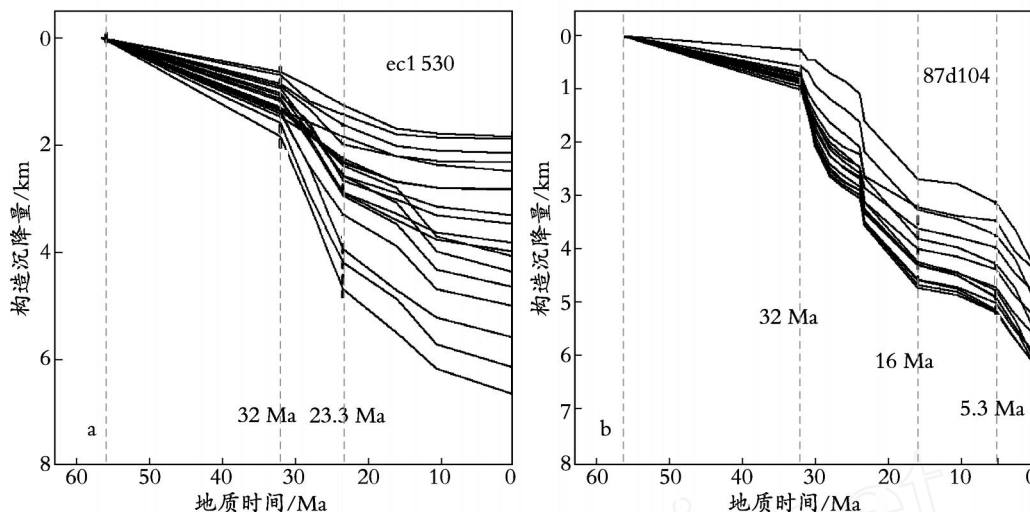


图3 南海北部深水区盆地构造沉降史

5 盆地形成的动力学背景

南海北部陆缘深水区盆地形成的地球动力学背景与南海的形成演化密切相关,并决定深水区盆地的大地构造属性和盆地类型。

5.1 南海的形成

新生代前,南海属于欧亚板块的一部分,其主体位于华南亚板块上,东临菲律宾板块和东南亚板块,西、南部隔印支、缅甸亚板块与印度-澳大利亚板块相接^[28]。

Ludwig^[29]首次提出南海中央海盆的地壳为洋壳以来,南海的形成和演化机制一直为国内外地质学家所关注。关于南海的成因有很多观点,其中最具代表性的有3种:(1)南海是与印度-欧亚板块碰撞挤出构造有关的走滑拉分盆地——走滑拉分说^[30,31];(2)南海是与太平洋俯冲有关的弧后盆地——弧后盆地说^[32~35];(3)南海盆地的形成与地幔柱或地幔物质侧向流动有关——地幔柱说^[11,36~39]。此外还有,南海是在多种动力学机制共同作用下形成的——联合机制说^[40~43]。

走滑拉分说认为,印度-欧亚板块碰撞,导致向东的构造逃逸,构造逃逸引起哀牢山-红河走滑断裂产生左旋走滑,并最终导致南海打开,形成走滑-拉分盆地。

弧后盆地说认为,太平洋板块沿欧亚板块东边缘俯冲,形成沟-弧-盆体系,南海是菲律宾岛弧的弧后扩张盆地,其形成时代为晚白垩世-早第三纪^[44,45]。

地幔柱说认为,东南沿海的新生代玄武岩和地幔捕虏体以及南海海底玄武岩的岩石地球化学特征表明新生代时期南海地区存在地幔柱,南海中央海盆及其次海盆的形成与地幔柱有关。

联合机制说中又有多种观点,有的认为南海的形成与印度-欧亚板块碰撞和地幔柱的共同作用有关,一方面,受印度-欧亚板块碰撞产生的向东的构造逃逸作用影响,红河走滑断裂的左旋走滑作用提供水平拉张力,同时,地幔柱和软流圈上涌导致岩石圈地幔和地壳减薄,两者共同作用形成南海海盆^[41];有的认为南海扩张是岩石圈伸展裂陷、太平洋板块斜向俯冲及印-藏板块碰撞挤出多因素相互叠加、制约的产物^[42,46],并认为始新世中、晚期太平洋板块俯冲方向改变导致裂陷中心南移,印度-欧亚板块碰撞效应是南海中央海盆扩张方向顺时针旋转的主要原因^[42];还有的认为,晚中生代以来,西太平洋构造域、特提斯构造域西段(印度)及东段(澳大利亚)先后以不同方向和速度向欧亚大陆汇聚,在这三大作用复合与竞争的动力学背景下,于特提斯构造域西段汇聚起主导作用期间,东亚陆缘发生了有地幔参与的“超级剪切”,在右行张引力场作用下发生裂解,形成了南海^[40]。

在不考虑动力来源的情况下,“海底扩张学”^[47~50]是关于南海成因的主要观点。将南海的磁异常条带与全球地磁反转时间表进行系统对比,Taylor等^[47]认为南海形成于晚渐新世-早中新世海底扩张。目前,仅有极少数学者对海底扩张成因提出质疑^[51]。

考虑到南海海盆及其陆缘盆地的规模远比大西

洋被动大陆边缘盆地小,再考虑到南海海盆及其陆缘盆地形成时间比大西洋型被动边缘盆地晚,大西洋型被动边缘始于三叠纪,即劳亚大陆和冈瓦纳大陆破裂解体之时,是全球事件的产物,南海及其陆缘盆地的形成与全球大陆裂解事件无关,再联系到南海西北部陆缘的莺歌海盆地的成因演化明显与红河走滑断裂有关,作者认为南海及其陆缘盆地形成的地球动力学机制为红河走滑断裂作用提供拉张应力来源,地幔物质上涌和侧向流动提供岩石圈减薄机制,二者联合作用导致南海及其陆缘盆地形成。

5.2 南海的构造演化

海底磁异常条带提供了南海的演化历史。Ben 等^[52]首先在南海中央海盆中对比出东西向的磁异常条带,但未鉴别出其时代。Taylor 等^[47]分析了中央海盆的磁异常,并首次对比出 5d-11 号东西向磁异常条带,年龄 32 ~ 17 Ma,相当于晚渐新世到早中新世,并提出南海在 32 ~ 17 Ma 期间发生南北向海底扩张。

何廉声^[53]提出南海发生过两次海底扩张,第一次海底扩张发生在晚白垩世早期,其依据是由南海西南海盆采集的地磁资料鉴别出 M7-M11 (126 ~ 119 Ma) 磁异常条带。

吕文正^[54]在西南海盆对比出 20 ~ 27 号磁异常条带,由此认为南海第一次海底扩张发生在晚白垩世至早古新世 (70 ~ 63 Ma)。

姚伯初等^[55]利用中美联合调查南海海洋地质第二阶段所采集的综合地球物理资料,在西南海盆中鉴别出 18 ~ 13 号磁异常条带,认为其形成时代是晚始新世至早渐新世 (42 ~ 35 Ma)。姚伯初^[46]认为南海在新生代经历了大西洋型海底扩张的演化历史,海盆中有 3 个残留的海底扩张中心,并发生过两次海底扩张。第一次海底扩张发生在晚始新世—早渐新世,扩张方向为北西—南东向,产生了南海西北海盆和西南海盆。第二次海底扩张是在晚渐新世—早中新世进行的,形成了南海中央海盆。

在晚渐新世—早中新世初,南海发生了几次较大规模的构造运动,28.5 Ma 时南海西北次海盆停止扩张,扩张轴仅在中央海盆发生张裂,到 25 Ma 南海扩张轴发生跳跃,由原来 EW 向转为 NEE-SWW 向,使南海西南次海盆打开^[47,50]。ODP1148 站深海沉积物记录了这些构造事件,在 28.5, 25, 23.5 Ma 时,ODP1148 站深海沉积物的矿物成分及地球化学成分发生了跳跃及突变^[56],23.5 Ma 更有较大规模的滑塌层出现,几乎所有的录井曲线在此发生转折,短时间内连续几次沉积间断共计失去了近 3 Ma 左

右的记录^[47,50]。Li 等^[57]对 ODP1148 站深海沉积物分析认为,自 33 Ma 以来,南海经历了裂谷阶段 (33 ~ 28.5 Ma),向南迁移的海底扩张阶段 (28.5 ~ 23 Ma),稳定扩张至扩张结束阶段 (23 ~ 15 Ma),扩张停止后的均衡调整阶段 (15 ~ 9 Ma),进一步调整与潮汐影响阶段 (9 ~ 5 Ma) 以及冰川盛行阶段 (5 ~ 0 Ma)。

5.3 南海北部大陆边缘的构造属性

与南海成因演化密切相关的北部大陆边缘的构造属性长期以来为众多学者所关注,如南海扩张成因已经被广泛接受一样,普遍认为南海北部陆缘盆地属于被动大陆边缘盆地^[22,27,58-61],同时又认识到南海北部的大陆边缘与典型的被动大陆边缘有别,带有活动边缘的烙印^[62],晚期构造运动和岩浆活动较强烈,与典型的被动大陆边缘稳定性的特征不同,从而称其为“准被动大陆边缘”^[63]。

岩浆岩的时空分布特征表明南海北部陆缘属于非火山型的大陆边缘,陆缘裂谷和海底扩张阶段岩浆活动非常微弱,有限的岩浆活动主要发生于海底扩张停止之后^[27]。因此,南海北部陆缘属于被动大陆边缘。之所以说它与典型的被动大陆边缘(如大西洋大陆边缘)有别,其差别是表现在南海北部大陆边缘晚期构造活动性较强。南海北部大陆边缘在 10 ~ 5 Ma 时发生了一次构造热事件,对应于珠江口盆地的东沙运动,东海盆地的龙井运动或台湾的海岸山脉运动。这次构造事件是珠江口盆地东部发生块断升降,隆起区遭受剥蚀,导致部分生物(有孔虫和钙质超微)化石带缺失,断裂和岩浆活动增强,产生了一系列现今仍在活动的 NWW 向断裂,沿构造隆起边缘发育强烈的地震活动带。

大家还一致认为南海北部大陆边缘新生代以来一直处于伸展拉张的大地构造背景之下。南海南部的礼乐滩、东巴拉望和西南民都洛组成的微陆块是从中国大陆分裂出去的^[58];南海北部大陆边缘是在经历加里东运动微板块间的拼贴、印支运动的缝合及燕山运动活动大陆边缘等多个构造演化阶段基础上,又经过两次不同方向海底扩张短期改造而形成的^[42];南海属于燕山期东亚安第斯型陆缘地堑系的一个构造单元^[45];南海海盆是陆缘扩张的结果^[64];晚白垩世末,长期处于挤压状态下的岩石圈因应力松弛产生弹性回跳导致地幔向洋蠕散,陆缘断裂解体,陆块向洋扩散^[65]。“陆缘扩张”是中国新生代以来东部陆壳拉伸过程中主要的构造作用,整个亚洲东部大陆边缘的形成都是由于陆缘扩张所致^[66];太平洋板块晚白垩世沿 NWW 相对欧亚板块以 130 mm/a

的速度运动,至古新世降到 78 mm/a,到始新世再降到 38 mm/a,汇聚速度减小导致板块后退,引发东亚大陆边缘出现初始伸展作用^[67]。

通过以上分析,作者认为南海北部大陆边缘是在新生代以来长期拉张引力场背景下,由东亚陆缘扩张到陆缘裂谷到海底扩张逐渐向南推进的演化过程中形成被动大陆边缘,它与大西洋型典型被动大陆边缘的区别在于晚期(10~5 Ma)存在“再活动阶段”。

5.4 南海北部陆缘深水区“非典型性”裂谷盆地

南海北部深水区盆地既具有被动大陆边缘裂谷盆地的一般性特征,又具有其自身独特的演化特征,是非典型被动大陆边缘裂谷盆地。

南海北部陆缘分布着许多具有相似成因的新生代沉积盆地,各沉积盆地的主要成盆期是古近纪和新近纪。古新世、始新世及早渐新世时主要为陆相沉积。晚渐新世时开始出现海侵,至新近纪形成海相沉积^[42]。北部浅水区断陷的主要形式是半地堑,横剖面上,表现为一侧是正断层,另一侧是超覆的半地堑,其发育要比一般的半地堑复杂得多。南部深水区盆地具有对称性地堑结构特征(如白云凹陷),新生界具有明显的双构造层特点,古近系与新近系和第四系的构造特征迥然不同。古近系构造层形成一系列地堑、半地堑或箕状断陷,新近系和第四系披覆于古近系之上,表现出裂谷盆地的一般性特征——下断上拗的双层结构。

南海北部深水区被动大陆边缘裂谷盆地的非典型性主要体现在两个方面:一是裂谷作用的多幕性,二是裂后阶段发生了新构造运动,晚期地壳活动性增强。南海北部陆缘地壳的减薄方式、断裂样式及盆地充填序列与经典的大西洋型被动大陆边缘略有差异,即经历了多期裂陷过程^[11]。盆地中还可见到的一种特殊的构造样式——伪地堑和另一种典型的构造形态——盆地反转,证明南海北部确实经历了多次张裂和成盆过程^[68]。根据盆地构造沉降的周期性加速,不同裂陷幕之间的不连续面及断陷方向、沉降中心的改变分析,南海新生代裂陷过程在从北向南逐渐迁移的趋势下,东西段也具有一定的差异性,反映了裂陷过程多幕性和旋转性的特点^[62],表现出与典型裂谷盆地有别的“非典型性”特征。另一重要差别是:南海北部深水区裂后阶段并非完全处于热衰减期,而是表现出晚期活动型增强的特点。晚中新世菲律宾板块与欧亚板块碰撞,在南海北部产生 NWW 向左旋走滑断裂活动,导致珠江口盆地晚期

构造、岩浆活动增强,出现反转构造。同时,10~5 Ma 红河走滑断裂从左旋走滑转变为右旋正断活动,导致琼东南盆地存在 5.3 Ma 以来的晚期快速沉降和热流升高的加热事件。

6 结论

南海北部陆缘深水区盆地发育在减薄的洋-陆过渡壳之上,具有晚燕山期花岗岩为主的基底。在新生代东亚陆缘扩张的初始区域拉张构造环境下,发生了陆缘裂谷和南海海底扩张,经历了裂谷阶段的初始沉降、裂后阶段的热沉降和晚期再活动阶段的加速沉降过程(琼东南盆地深水区)。新生代发生了 3 次区域性构造运动、3 期较为强烈的岩浆活动和 3 期断裂作用。南海北部陆缘具有被动大陆边缘的构造属性,深水区盆地具有下断上拗的双层地质结构特征和被动大陆边缘裂谷盆地的一般特征,但与典型裂谷盆地又存在明显差异。南海北部陆缘深水区盆地具有多期拉张和晚期“再活动”演化特征,是“非典型性”被动大陆边缘裂谷盆地,这种“非典型性”在不同地区具有不同的表现形式,珠江口盆地深水区表现为晚中新世以来岩浆、断裂活动强烈,琼东南盆地表现为上新世以来存在加速沉降过程。

参考文献:

- [1] 杨川恒,杜栩,潘和顺,等. 国外深水领域油气勘探新进展及我国南海北部陆缘深水区油气勘探潜力[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 247-256.
- [2] 金庆焕. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点[J]. 科学中国人, 2006, 11: 18-20.
- [3] 丘学林,施小斌,阎贫,等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展[J]. 自然科学进展, 2003, 13(3): 231-236.
- [4] 姚伯初. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 1-16.
- [5] 滕吉文,王谦身,魏斯禹. 中国地壳构造的基本轮廓[J]. 石油物探, 1982, 2: 14-20.
- [6] 邵学钟,张家茹,李振豪,等. 广东大亚湾地区地壳和上地幔结构的初步研究[J]. 地震地质, 1983, 5(4): 39-50.
- [7] 廖其林,王振明,王屏路,等. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1986, 3: 270-280.
- [8] 赵岩,张毅祥,姜绍仁,等. 南海北部地球物理特征及地壳结构[J]. 热带海洋, 1996, 15(2): 37-44.
- [9] 施小斌,周蒂,张毅祥,等. 南海西沙海槽岩石圈的密度结构与热流变结构[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 23-31.
- [10] 施小斌,周蒂,张毅祥. 南海北部陆缘岩石圈热——流

研究综述 REVIEWS

- 变结构[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1 660-1 665.
- [11] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 9-15.
- [12] 黄梅英, 李舫志, 李平鲁. 珠江口盆地东部前第三纪-早第三纪洼陷特征及油气前景[J]. 中国海上油气(地质), 1993, 7(3): 1-9.
- [13] Yang Z, Courtillot V, Besse M, *et al.* Jurassic paleomagnetic constraints on the collision of the North and South China Blocks[J]. **Geophys Res Lett**, 1992, 19(6): 577-580.
- [14] 黄慈流, 钟建强. 南海东北部及其邻区新生代构造事件[J]. 热带海洋, 1994, 13(1): 55-62.
- [15] 李平鲁, 梁惠娴. 珠江口盆地新生代岩浆作用及其与盆地演化和油气聚集的关系[J]. 广东地质, 1994, 9(2): 23-34.
- [16] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)等三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 1-9.
- [17] 姚伯初. 南海北部陆缘新生代构造运动初探[J]. 南海地质研究, 1993, 5: 1-12.
- [18] Tian Z, Han P, Xu K, *et al.* The Mesozoic-Cenozoic East China rift system[J]. **Tectonophysics**, 1992, 208(1~3): 341-363.
- [19] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21.
- [20] 饶春涛, 李平鲁. 珠江口盆地断层特征及其封闭性研究. 珠江口盆地(东部)石油地质科技报告集(第6集)[R]. 深圳: 中国海洋石油南海东部公司科技研究中心, 1990. 100-243.
- [21] 李平鲁. 珠江口盆地新生代构造运动[J]. 中国海上油气(地质), 1993, 7(6): 11-17.
- [22] 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 420-426.
- [23] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. **AAPG Bulletin**, 1986, 70(9): 1 136-1 155.
- [24] Li P, Rao C. Tectonic characteristics and evolution history of the Pearl River Mouth basin[J]. **Tectonophysics**, 1994, 235: 13-25.
- [25] 庞雄. 对白云地区早中新岩隆的讨论. 珠江口盆地(东部)石油地质科技报告集, 第二集(下册)[R]. 深圳: 中国海洋石油研究中心南海东部研究院, 1988, 581-597.
- [26] 周蒂, 刘海龄, 陈汉宗. 南沙海区及其周缘中-新生代岩浆活动及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 354-363.
- [27] Yan P, Hui D, Liu H, *et al.* The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 2006, 27: 647-659.
- [28] Hutchison C S. Geological Evolution of Southeast Asia[M]. London: Oxford University Press, 1996. 102-116.
- [29] Ludwig W J. The Manila Trench and west Luson Trough - III. Seismic refraction measurements. [J]. **Deep Sea Research and Oceanography Abstracts**, 1970, 17(3): 553-562.
- [30] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics [J]. **Nature**, 1976, 264: 319-324.
- [31] Tapponnier P, Peltzer G, Le D A Y, *et al.* Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. **Geology**, 1982, 10: 611-616.
- [32] Aubouin J. Dynamic model of the western Pacific[J]. **Tectonophysics**, 1990, 183: 1-7.
- [33] Hawkins J W, Lonsdale P F, Macdougall J D, *et al.* Petrology of the axial ridge of Mariana Trough backarc spreading center [J]. **Earth Planet Sci Lett**, 1990, 100: 226-250.
- [34] Stern R J, Lin P N, Morris J D, *et al.* Enriched back-arc basin basalts from the northern Marianna Trough: implications for the magmatic evolution of back-arc basin[J]. **Earth Planet Sci Lett**, 1990, 100: 210-225.
- [35] Lan C Y, Chen C H, Chung S L, *et al.* The crustal evolution of continental Taiwan[J]. **J Geol Soc China**, 1996, 39: 337-353.
- [36] 解广轰. 中国东部新生代玄武岩铅同位素组成的地理分布特征和成因意义[J]. 科学通报, 1989, 34(10): 772-775.
- [37] 朱炳泉, 王慧芬. 雷琼地区 MORB—OIB 过渡型地幔源作用作用的 Nd-Sr-Pb 同位素证据[J]. 地球化学, 1989, 3: 193-201.
- [38] Wang C, Jianming Y, Weilin Z, *et al.* Some problems in understanding basin evolution [J]. **Earth Science Frontiers**, 1995, 2(3~4): 29-44.
- [39] Flower M F J, Tamaki K, Hoang N, *et al.* Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the western Pacific[A]. Flower M F J, Chun S L, Lo C H. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia[C]. Washington, DC, USA: AGU, 1998, 27: 67-88.
- [40] 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 180-190.
- [41] 谢建华, 夏斌, 张宴华, 等. 南海形成演化探究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 212-218.
- [42] 闫义, 夏斌, 林舸, 等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 53-61.
- [43] Xia B, Zhang Y, Cui X J, *et al.* Understanding of the geological and geodynamic controls on the formation of the South China Sea: A numerical modelling approach [J]. **Journal of Geodynamics**, 2006, 42: 63-84.

- [44] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. *J Geophys Res*, 1971, 76: 2 543-2 561.
- [45] 郭令智,施央申,马瑞士. 西太平洋中生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成和演化[J]. *地质学报*, 1983, 57(1): 11-12.
- [46] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2): 1-13.
- [47] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea [A]. Hayes D E. *Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asia Seas and Islands* [C]. Washington, D C, USA: AGU, 1980. 23: 89-104.
- [48] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[A]. Hayes D E. *Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asia Seas and Islands* [C]. Washington, DC, USA: AGU, 1983. 27: 23-56.
- [49] 姚伯初,王光宇. 南海海盆在新生代的构造演化[J]. *南海地质研究*, 1991, 3: 9-23.
- [50] Briais A, Patriat P, Tapponnier P, *et al.* Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia [J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(B4): 6 299-6 328.
- [51] 林长松,虞夏军,何拥华,等. 南海海盆扩张成因质疑[J]. *海洋学报*, 2006, 28(1): 67-76.
- [52] Ben Avraham Z, Uyeda S. The evolution of the China Basin and the Mesozoic Paleogeography of Borneo [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1973, 18: 365-375.
- [53] 何廉声. 南海的形成、演化与油气资源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 8(2): 15-28.
- [54] 吕文正. 南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化[J]. *海洋学报*, 1987, 9(1): 69-78.
- [55] 姚伯初,曾维军. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1994. 75-90.
- [56] 邵磊,李献华,汪品先,等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP 1148 站深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 539-544.
- [57] Li Q, Wang P, Zhao Q, *et al.* A 33 Ma lithostratigraphic record of tectonic and paleoceanographic evolution of the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2006, 230: 217-235.
- [58] Hamilton W. Tectonics of the Indonesian region [J]. *US Geol Survey Prof Paper*, 1979, 1 078: 345.
- [59] 姚伯初,万玲,刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, 29(5): 543-549.
- [60] 姚伯初,万玲,吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. *中国地质*, 2004, 31(2): 113-122.
- [61] 姚伯初,万玲,吴能友. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征[J]. *地质通报*, 2005, 24(1): 1-8.
- [62] 李思田,林畅松,张启明,等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10Ma 以来的构造事件[J]. *科学通报*, 1998, 43(8): 797-810.
- [63] Feng Z Q, Miao W C. Structure and hydrocarbon potential of the para-passive continental margin of the northern South China Sea. *Geology and Geophysics of Continental Margin*[J]. *AAPG Memoir*, 1992, 53: 27-41.
- [64] 刘昭蜀,杨树康,何尚谋,等. 南海陆缘地堑系及边缘海的演化旋回[J]. *热带海洋*, 1983, 2(4): 251-259.
- [65] 刘昭蜀,赵岩,李希宗,等. 珠江口盆地的扩张旋回及其与含油气性的关系[J]. *热带海洋*, 1995, 14(3): 8-15.
- [66] 陈国达. 东亚陆缘扩张带:一条离散式大陆边缘成因的探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 1997, 21(4): 285-293.
- [67] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C, *et al.* Motion of the Pacific plate relation to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology*, 1995, 23: 719-722.
- [68] 茹克. 南海北部陆缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义[J]. *石油与天然气地质*, 1988, 9(1): 22-30.

(本文编辑:谭雪静)