

doi:10.3799/dqkx.2011.092

# 南海共轭大陆边缘地壳结构及其类型特征

夏少红, 丘学林, 赵明辉, 夏戡原

中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

**摘要:** 为了分析南海共轭大陆边缘的地壳结构, 在收集南海地区多次海底地震仪探测、海陆地震联测以及重、磁探测等成果资料的基础上, 首先构建了南海北部陆缘3条由东向西横贯海陆的深部地壳结构剖面图, 并以中地壳低速层和下地壳高速体的分布特征为基础, 推测滨海断裂带可能为华南正常陆壳与南海减薄陆壳的分界断裂; 以地壳减薄程度和下地壳高速层的尖灭为标志, 圈定了洋陆壳转换带, 发现南海北部陆缘从东到西地壳拉张减薄的程度和模式具有较大差异性. 然后以南沙地块水深、磁力和重力异常数据为基础, 揭示了礼乐滩洋陆壳转换带表现为水深、磁力和重力异常变化的陡峭梯度带, 莫霍面深度从礼乐滩的~24 km 急剧抬升至洋盆区的~11 km; 礼乐滩以西的洋陆壳转换带从东到西逐渐变得平缓; 南沙海槽两侧的水深和重力异常具有对称性, 为“U”形结构; 并将水深、莫霍面和重力急剧变化的梯度带拟定为南沙地块洋陆壳转换带的分界标志. 最后构建了穿越南海共轭陆缘的地壳结构剖面, 并将其划分为减薄陆壳、洋陆壳转换带、洋壳及拉张裂谷等类型.

**关键词:** 南海; 共轭大陆边缘; 构造地质; 洋陆壳转换带; 海洋地质.

**中图分类号:** P736.1

**文章编号:** 1000-2383(2011)05-0877-09

**收稿日期:** 2011-05-28

## Crustal Structure and Features in the Conjugate Margins of South China Sea

XIA Shao-hong, QIU Xue-lin, ZHAO Ming-hui, XIA Kan-yuan

CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

**Abstract:** In order to analyze crustal structures and features in the conjugate margins of South China Sea (SCS), we collected large numbers of studied results from the ocean bottom seismometers experiments, onshore-offshore seismic experiments, gravity and magnetism anomalies. This paper firstly constructs three land-sea super cross-sections from east to west in the northern margin of SCS. The results show the onshore-offshore transitional zone is a border separating the unstretched and the stretched continental crust. The low velocity layer (LVL) in the middle crust was widely imaged in the unstretched continental crust. However, the high velocity layer (HVL) in the lower crust was detected in the stretched continental crust. By analyzing the mechanisms of the LVL in the middle crust and HVL in the base of crust, we believe the crustal structures had distinctly different attributes in the continental South China and in the northern SCS, which indicates that the littoral fault zone (LFZ) could be the boundary fault between them. Then, we reveal the crustal features in the Liyue Bank based on water depth, gravity and magnetism anomalies. The Moho depth thins from about 24 km in the Liyue bank to 11 km in the oceanic basin. The ocean-continent transitional zone generally widens from east to west in the southern margin. Finally, we divide the crustal structure in the conjugated margin of SCS into four types, including the unstretched continental crust, the stretched continental crust, the ocean-continent transitional zone, and the ancient ocean crust.

**Key words:** South China Sea; conjugate margins; structural geology; ocean-continent transitional zone; marine geology.

南海是西太平洋最大的边缘海, 受欧亚板块、太平洋板块和印度—澳大利亚板块复杂动力学作用的影响, 经历了多期复杂的地壳构造演化运动, 引起了

丰富多彩的地质构造现象, 形成了陆壳、过渡地壳和洋壳等多种构造单元并存的局面. 南海南、北两侧大陆边缘, 是由新生代南海海盆海底扩张形成的一对

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目(No. KZCX2-YW-Q05-04); 国家自然科学基金(Nos. U0933006, 41006028); 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(No. SQ200911); 中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504-3-1).

**作者简介:** 夏少红(1981—), 男, 汉族, 助理研究员, 主要从事地震学及大陆边缘深部结构研究. E-mail: shxia@scsio.ac.cn

共轭张裂型大陆边缘. 磁测数据显示, 南海张裂期间华南地块在新生代相对于欧亚大陆未发生明显的位移(Yang and Besse, 1993; 孙珍等, 2009; 佟殿君等, 2009), 华南地块向南海延伸的陆缘发生了裂解, 由北向南发育了 3 条北东—南西走向的断陷带(Zhou *et al.*, 1995); 南海南部边缘发育了一系列北东向的新生代盆地, 如南薇盆地、礼乐盆地和安渡盆地(姚伯初等, 2004). 南沙地块与婆罗洲地块之间为南沙海槽, 海槽南侧新生代以来发育了一条向西北仰冲的逆掩推覆体, 地壳被压下沉, 推测是古南海洋壳向婆罗洲俯冲造成的(Hazebroek and Tan, 1993; Hutchison, 1996).

南海南、北共轭大陆边缘的深部地壳结构及构造特征包含着南海形成演化过程的重要信息, 是探讨南海形成演化骨架及深部动力学的重要基础, 也是国内外地球科学家关注的热点. 由于南海地区缺乏天然地震资料, 因此在众多的深部地壳结构研究方法中, 人工深地震探测以高分辨率、应用广泛的优势始终占据着南海深部地壳结构研究的主导地位. 过去几十年南海海域的研究经历了声纳浮标探测、双船扩展剖面(ESP)及先进的海底地震仪(OBS)探

测 3 个阶段(丘学林等, 2003), 获得多条深地震探测剖面(图 1)(姚伯初等, 1994; Nissen *et al.*, 1995; Qiu *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006; 吴振利等, 2008; 阮爱国等, 2009; Zhao *et al.*, 2010). 这些探测取得了大量的研究成果, 如识别出了华南滨海断裂带(赵明辉等, 2004; 徐辉龙等, 2006; Xia *et al.*, 2010), 推测出了琼南缝合带的存在(姚伯初等, 1994), 确认了潮汕坳陷巨厚的中生代地层(阮爱国等, 2009), 还识别出了高速层(Nissen *et al.*, 1995; Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010)、低速层(赵明辉等, 2004)等具有特殊构造意义的速度异常层, 极大地丰富了南海共轭大陆边缘深部地壳结构的认识.

为了系统地对南海共轭大陆边缘的地壳结构进行对比分析研究, 在深部地震探测获得的成果资料以及水深、磁力和重力异常数据的基础上, 本文构建了南海北部陆缘由东到西 3 条贯穿海陆的水深、磁力和重力异常以及深部地壳结构剖面图, 以及多条贯穿南、北陆缘的水深、磁力和重力异常剖面, 并以此为基础分析了南海共轭大陆边缘洋陆壳转换带特征及地壳结构类型.

## 1 南海北部陆缘地壳结构

南海北部陆缘发生过大规模的地壳拉张、减薄作用, 是拉张型或离散型边缘, 发育了一系列 NE 走向的阶梯状正断层和张性盆地. 从晚白垩世到新生代, 南海北部陆缘在伸展背景下发生整个岩石圈拉伸、减薄和裂陷, 地壳厚度逐渐减薄直到出现洋壳(Taylor and Hayes, 1983). 根据南海北部陆缘海陆地震联测(赵明辉等, 2004; Xia *et al.*, 2010)、海底地震仪探测(Qiu *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006)以及全球水深、磁力和重力异常等数据资料, 在南海北部大陆边缘构建了从东到西穿越海陆的水深、磁力和重力异常及其地壳结构剖面图(图 2). 结果显示, 南海北部大陆边缘地壳结构从陆到海、从西到东均有较大差异, 非均质性强烈, 莫霍面深度逐渐减小, 属于典型的拉张型地壳结构.

### 1.1 东部剖面

基于 2001 年海底地震仪探测和海陆地震联测的成果资料(赵明辉等, 2004; Wang *et al.*, 2006), 构建了南海北部大陆边缘东部由陆到海的地壳结构剖面(图 2a, 2b). 该剖面显示, 莫霍面深度从陆区约 30 km 向海区逐渐减薄至 16 km 左右, 且在陆架及陆坡处减

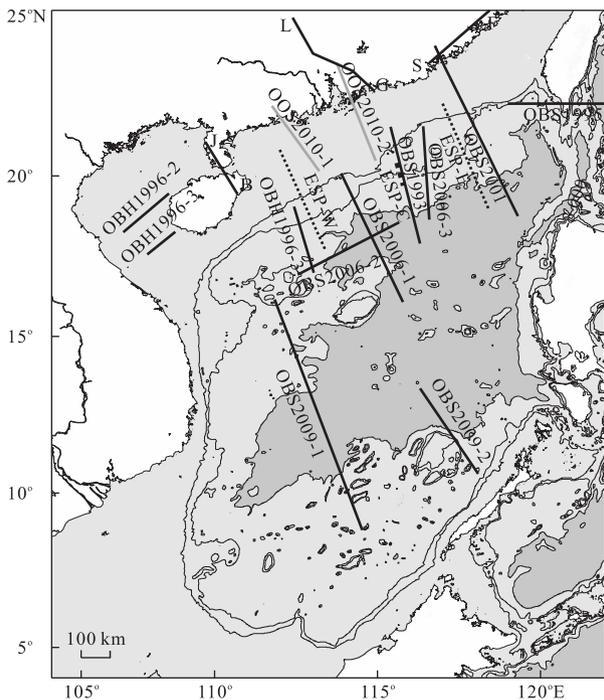


图 1 南海共轭陆缘深地震探测测线分布

Fig. 1 Distribution of deep seismic sections in the conjugated margin of SCS

黑实线为海底地震仪探测测线(OBS、OBH); 灰实线为海陆地震联测测线(OOS); 黑色点线为双船扩展剖面(ESP)

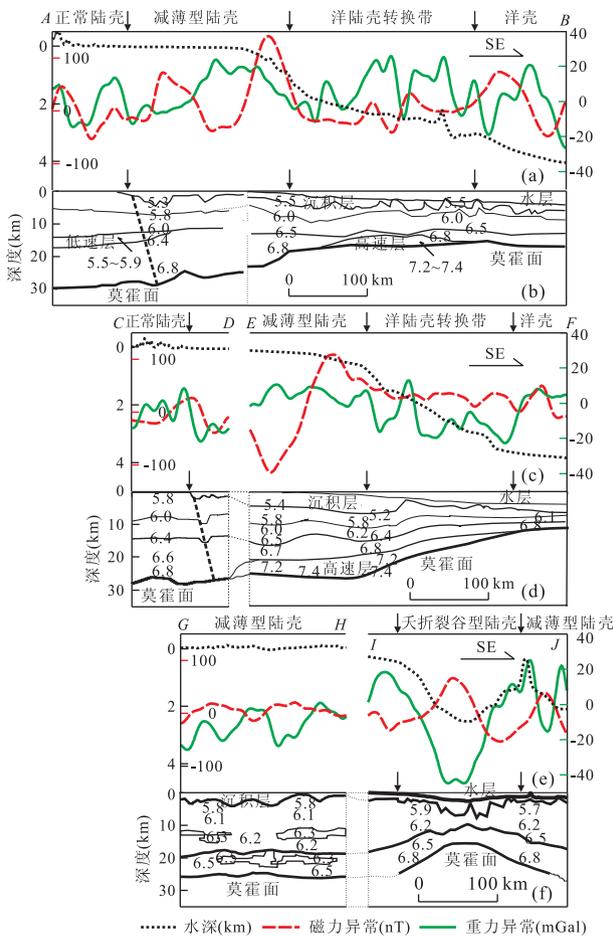


图 2 南海北部陆缘从东到西 3 条贯穿海陆的水深、磁力和重力异常及地壳结构剖面

Fig. 2 Three crustal sections from east to west in the northern margin of SCS, together with water depth, gravity and magnetism anomalies

3 个剖面对应的位置如图 4 所示;图 2a, 2c, 2e 中黑色点线和黑色坐标为水深, 红色虚线和红色坐标为磁力异常, 绿色线和绿色坐标为自由空间重力异常;图 2b, 2d 中的虚线为滨海断裂带

薄程度最强烈, 对应位置的水深急剧增加, 存在陡峭的重力异常和磁力异常梯度带, 在海盆处基本趋于平缓;在海陆过渡地区探测到一个上下连续的低速破碎带, 其对应着负磁异常带和重力高带, 走向为 NEE, 推断为滨海断裂带, 以此断裂带为基准, 向海方向沉积层逐渐发育, 且存在 1 个 3~5 km 厚的下地壳高速层, 该高速层在靠近洋盆处逐渐尖灭, 对应的重力异常和磁力异常起伏较为强烈;而往陆地方向基本无沉积层发育, 同时华南沿海地区普遍发育的中地壳低速层在该断裂带向海方向逐渐尖灭。

### 1.2 中部剖面

根据 2004 年南海北部海陆地地震联测和 1993 年海上 OBS 探测所获得的结构资料 (Yan *et al.*,

2001; Xia *et al.*, 2010), 构建了南海北部大陆边缘中部从陆地到海洋的地壳结构剖面图 (图 2c, 2d). 从中发现莫霍面深度从海陆过渡带至洋盆处减薄较为强烈, 陆上的 29 km 减薄至洋壳处的 13 km 左右, 属于典型的拉张型地壳结构特征. 在海陆过渡区发现滨海断裂带的存在, 对应着重、磁异常陡峭梯度带, 以该断裂带为界向海沉积层较为发育, 而向陆仅有少量发育. 中地壳低速层在华南大陆较为发育, 其速度为 5.5~6.0 km/s, 厚度为 3~6 km, 该低速层在滨海断裂带处逐渐尖灭. 而滨海断裂带向海地区逐渐开始发育有下地壳高速层, 其速度值为 7.1~7.3 km 左右, 厚度为 5~8 km, 比东部剖面的下地壳高速层明显要厚, 但对应的重力异常和磁力异常的起伏要明显弱于东北剖面, 该高速层向海尖灭点对应陡峭的重力异常梯度带。

### 1.3 西部剖面

根据雷琼拗陷深地震探测及西沙海槽 OBH 探测结果 (Qiu *et al.*, 2001; 嘉世旭等, 2006), 构建了南海北部大陆边缘西部从陆到海的地壳结构剖面 (图 2e, 2f). 从中发现雷琼地区的莫霍面深度比中、东部的华南沿海地区要稍浅一些, 只有 25 km 左右, 但变化较为平缓, 反映地壳已被拉伸. 该剖面陆上地区没有发现中地壳低速层, 反而在中地壳有些高速异常体出现, 在下地壳却有低速异常结构显示, 表明雷琼陆上地区的地壳结构比中、东部华南沿海地区要复杂. 在西沙海槽海区地壳拉张具有明显的对称结构, 在海槽中部莫霍面深度仅有 15 km 左右, 水深超过 2 000 m, 强负重力异常和高正磁异常, 其南北两侧水深、磁力和重力异常以及莫霍面深度具有对称性, 为典型裂谷特征. 雷琼地区和西沙海槽两侧的莫霍面深度一致, 地壳结构也较为相似, 推测西沙地块在裂谷拉张形成之前与华南大陆属于同一块体。

从以上 3 条剖面的分析结果可知, 南海北部陆缘的中、东部均探测到了海陆过渡地区的滨海断裂带, 且以该断裂带为界, 其陆侧发育的中地壳低速层向该断裂带逐渐尖灭, 而海侧发育的下地壳高速体从该断裂带开始逐渐发育; 同时该断裂带陆侧的莫霍面深度在 30 km 左右, 表现为华南正常陆壳属性, 而该断裂带向海地壳逐渐减薄, 为拉张型大陆地壳属性, 因此, 推测滨海断裂带可能为正常陆壳与减薄陆壳的分界断裂. 而南海北部陆缘西部剖面由于缺乏海陆地震联测, 对于其滨海断裂带是否存在这一问题还没有直接的证据, 但从地壳结构的变化特征和中地壳低速层、下地壳高速体的缺失可以推测出

西部地壳结构与中、东部存在很大差异. 南海北部陆缘深地震探测到的地壳拉张减薄特征与水深、磁力和重力异常的变化特征具有较好的一致性, 莫霍面急剧抬升的转折区正好对应于水深、磁力和重力异常剖面的陡峭梯度带, 尤其是西沙海槽地壳减薄的对称性特征在对应的水深、磁力和重力异常剖面上也极为相似; 另外, 在中、东部剖面上的下地壳高速体对应的磁异常变化较为平缓, 且仅在零值附近波

动, 表现为磁静区特征, 将地壳急剧减薄的转折点定义为减薄陆壳与洋陆壳转换带的分界标志, 而下地壳高速体尖灭点定义为洋陆壳转换带与洋壳的分界标志, 那么对应的磁静区即为洋陆壳转换带.

## 2 南海南部陆缘地壳结构

南海南部陆缘的主体南沙地块是一个具有前中

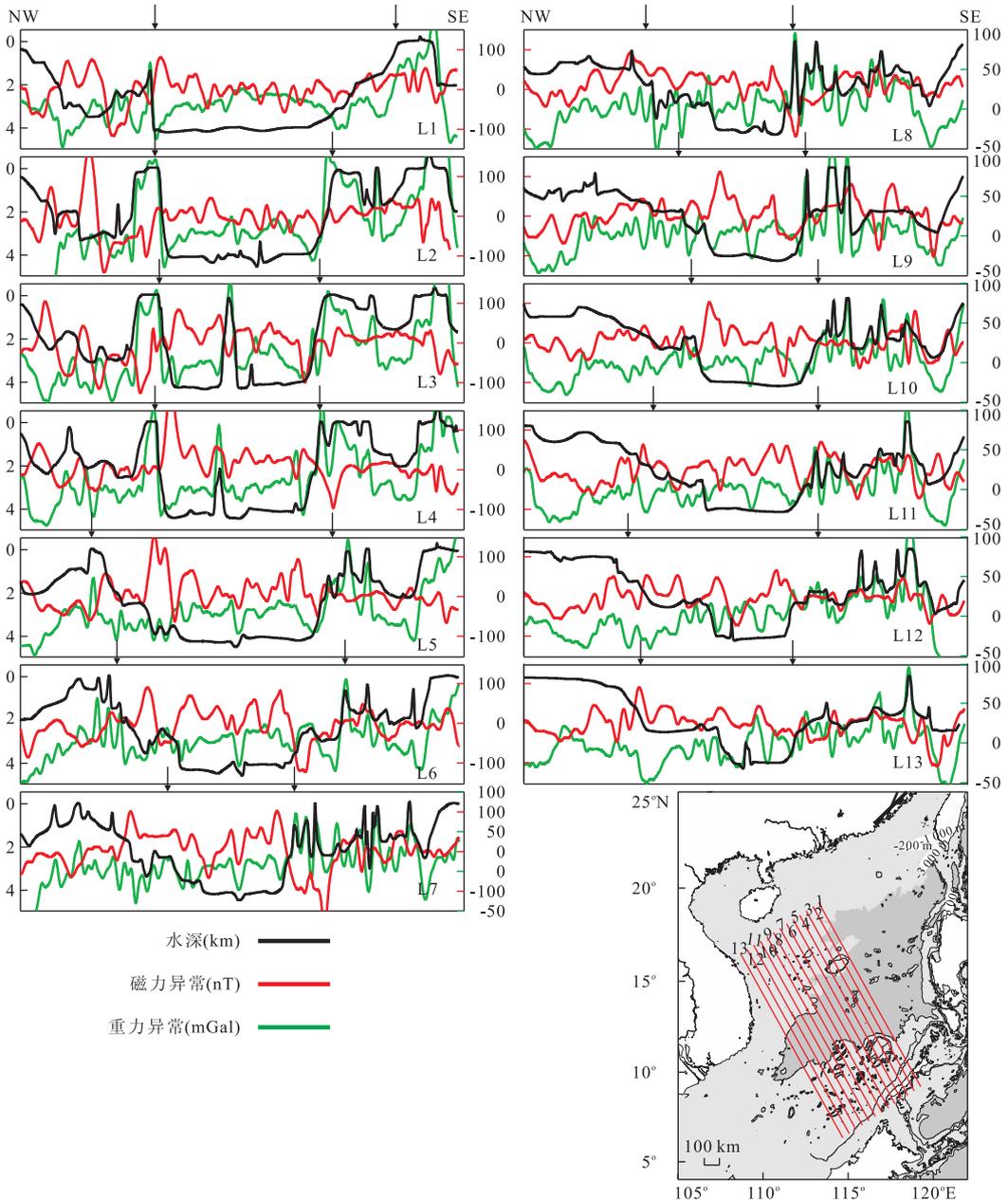


图 3 南海南、北陆缘水深、磁力和重力异常剖面

Fig. 3 Sections of water depth, gravity and magnetism anomalies in the conjugated margin of SCS

图中黑色箭头所示为推测的洋陆壳转折点; 图中黑线和黑色坐标值代表水深, 红线和红色坐标值代表磁异常, 绿线和绿色坐标值为自由空间重力异常; 在右下脚插图中从东到西依次为 L1-L13

生代基底、中生代和新生代海相沉积盖层的小型岩石圈板块(刘海龄等,1998),自晚白垩世以来,在伸展、裂离和扩张构造体制下,郑和一礼乐地块逐步从华南陆缘向南分离出来,并于晚渐新世导致了现代南海的海底扩张并形成了南沙地块.由于以往技术条件和各种因素的阻碍,南海南部陆缘的深地震探测极为缺乏,对深部地壳结构的分析研究仅仅是依靠重、磁等综合地球物理调查方法.

通过下载全球1分精度的水深、重力异常数据和2分精度的磁力异常数据,抽取了穿越南北陆缘的13条水深、磁力和重力异常剖面(图3),揭示出南沙地块重力异常的优势方向是以北东向为主,且与地形变化有着紧密关系;礼乐滩主体是重力异常高值区,其最高值达到100 mGal以上,该高异常值是南部陆缘中重力异常最高值地区.靠近滩体北东向的重力异常值呈现一条非常陡峭的重力梯度带,这种陡峭的重力梯度带不仅反映该地区陡峭的地形起伏(图3),还表示其与地壳内部的深大断裂和地

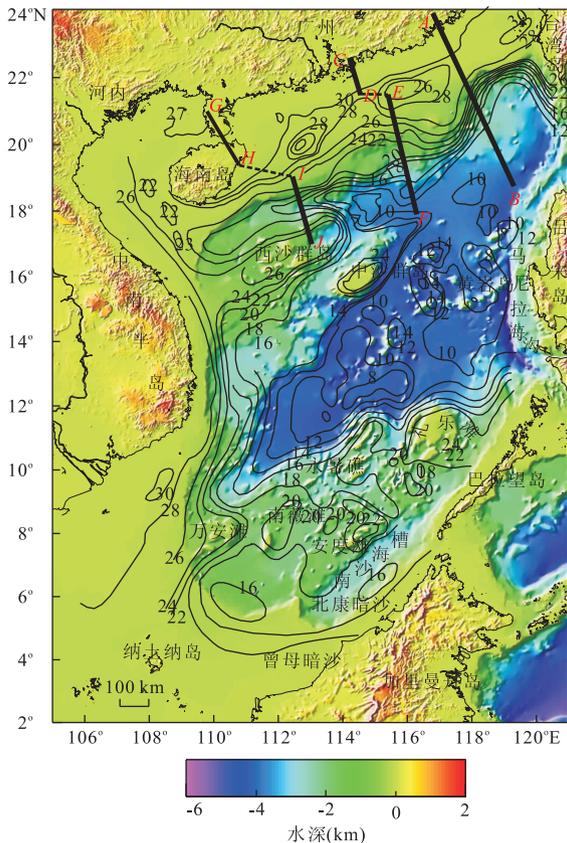


图4 南海水深地形与莫霍面深度分布(莫霍面深度据苏达权等,2004修改)

Fig. 4 Distribution of water depth and moho in the SCS 彩色为水深图;等值线为莫霍面深度图(m)

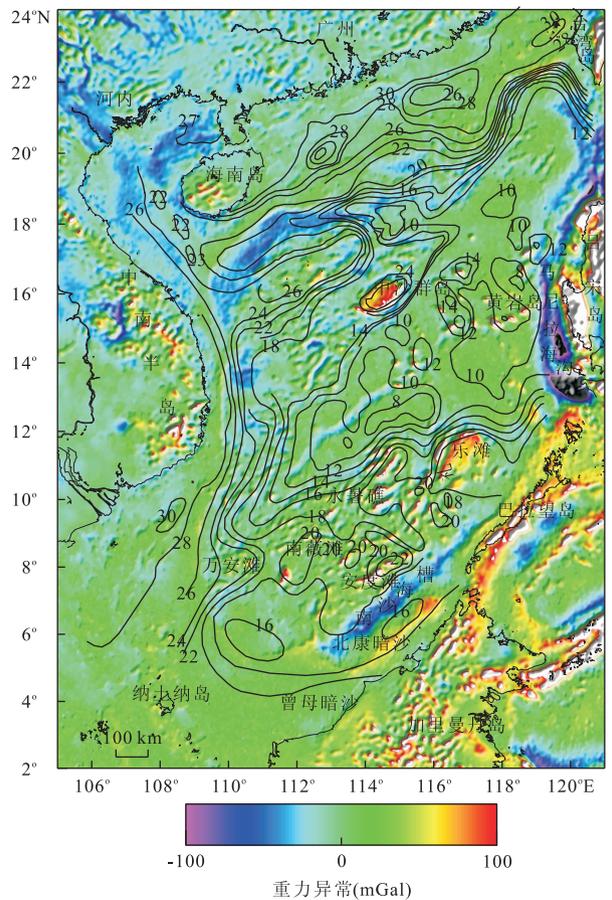


图5 南海自由空间重力异常与莫霍面深度分布(莫霍面深度据苏达权等,2004修改)

Fig. 5 Distribution of gravity anomalies and Moho in the SCS 彩色为重力异常图,等值线为莫霍面深度(m)

壳结构的根本变化紧密相关.此外,该重力异常特征反映了礼乐滩与南海中央海盆之间的洋陆壳交界的特征(苏达权等,1991).磁异常资料显示礼乐滩与北巴拉望的地壳结构是一致的,而礼乐滩的北部和东北部与中央海盆的南部磁性层下界面的接触带为突变带,显然两者的地壳结构不同.从磁性层的下界面变化不是很强烈这一特征,可推测整个南沙的地壳结构基本是一致的,只不过礼乐滩的地壳稍厚一些而已(张毅祥等,1991).莫霍面深度图表明,礼乐滩的北侧与东侧的莫霍面变化较大,而在南沙地块其他地方以及南海中央海盆交界处的莫霍面变化相对平缓(图4).地震折射资料显示,礼乐滩以北的中央海盆海域是洋壳结构,其莫霍面深度约为10~12 km(金庆焕,1989),而礼乐滩钻井资料证实其为大陆型地壳;图3显示,礼乐滩北西方向洋陆壳交界处水深、重力异常呈现非常陡峭的梯度带,这种重力异常特征正好反映了洋陆壳交界上的重力异常边缘

效应(苏达权等,1991)。礼乐、郑和、南薇—安渡断块均为减薄的陆壳,地壳厚度 18~25 km,组成南沙岛礁隆起区;曾母断块北部地壳厚 16~22 km,且地幔异常隆起,形成巨型的早第三纪前陆拗陷;南部地壳厚 26~30 km,为碰撞增厚陆壳。

曾母盆地北部与南沙海槽西南段的莫霍界面埋深为 16~18 km,两者新生代沉积层的最大厚度均大于 1 000 m,曾母盆地海区声纳浮标揭示,上地壳层厚 3.05~3.21 km(Houtz and Hayes,1984)。两地区重力异常和磁力异常特征明显不同,曾母盆地的重力空间异常为正值、中等异常,南沙海槽则为负高值异常(图 5),曾母盆地地温梯度与热流值均较高,南沙海槽则为低地温梯度与低热流值。由于磁性层下界面相当于居里面,在此界面以下为高温,物质不显磁性,故称曾母盆地为岩石圈地幔异常隆起(热地幔)型陆壳,而认为南沙海槽为岩石圈地幔异常隆起(冷地幔)型陆壳。南沙海槽的槽底之下还可能存在残留的古洋壳,上述冷地幔可能是古洋壳的残留块体(夏戡原和黄慈流,1997)。

### 3 南海共轭陆缘地壳结构的类型特征探讨

从水深和莫霍面深度分布图可以了解到(图 4),南海南北陆缘的莫霍面深度变化与水深变化之间具有很好的一致性,水深急剧增加的地方正好对应莫霍面的急剧抬升,这说明了深部地壳结构对浅层地形具有控制作用,也揭示出浅层构造特征与深部地壳结构之间存在很好的耦合关系。同样,从重力异常和莫霍面深度分布图也可以了解到(图 5),莫霍面深度与重力异常之间也存在很好的耦合关系,在莫霍面急剧抬升的地方也正好对应重力陡峭梯度带,在西沙海槽、南沙海槽莫霍面较浅的区域正好对应负重力异常,而在其两侧为正重力异常,同时,在中、西沙和礼乐滩等岛礁区,莫霍面较深,其对应的正重力异常也很大。以上说明了水深地形和重力异常的变化特征能够间接反映深部地壳结构的变化特征。南海北部陆缘开展过多次海底地震仪精细地壳结构研究,图 2 的剖面表明了深部地壳结构与水深地形变化、重力异常、磁力异常的耦合性和变化规律的一致性。依据这个耦合关系,图 3 建立了多条穿越南、北陆缘的水深、磁力和重力异常剖面图,并结合岩浆活动及断裂分布特征,对南海共轭陆缘的地壳

结构的类型特征进行了分析探讨。

南海北部陆缘的中、东部剖面,揭示了该区地壳结构可以划分为华南正常陆壳、减薄陆壳、洋陆壳转换带和洋壳等类型特征。其中华南陆区正常型陆壳的地壳层厚约 30 km,从北到南减薄程度很低,且上、下地壳层的厚度相近,在中地壳普遍存在低速层,局部地区出现下地壳高速层(廖其林等,1988;尹周勋等,1999),在滨海断裂带处中地壳低速层从北到南逐渐尖灭,该断裂带也是华南正常陆壳的南部边界。而滨海断裂带向南为减薄型陆壳,莫霍面深度从 30 km 逐渐减薄至 25 km 后,存在地壳急剧减薄的转折点。该转折点对应地形、重力异常和磁力异常的陡峭梯度带,推测其为洋陆壳过渡带的北界。自此转折点向南,下地壳高速层极为发育,并向洋盆方向发育直至尖灭,其尖灭点正好为洋陆壳的转换点。因此,以滨海断裂带为界,其北部为正常陆壳,其南部直至地壳急剧减薄点被定义为减薄陆壳;而从地壳急剧减薄点向南,到下地壳高速层尖灭点,为洋陆壳转换带;下地壳高速层尖灭点向南为洋壳(图 2a~2d)。南海北部陆缘西部剖面,虽然不能像东、中部剖面划分出明显的减薄陆壳、洋陆壳转换带和洋壳之间的分界标志,但是其莫霍面的深部特征揭示其为减薄陆壳。此外,西沙海槽拉张减薄具有很好的对称性,为典型的夭折裂谷结构。

从南海水深地形图上(图 4)发现,南沙群岛与中、西沙群岛具有较好的对称性。由于缺乏深地震探测,以水深、磁力和重力异常的变化特征为依据,结合莫霍面深度变化,推测中、西沙至南沙地区地壳结构的变化特征和类型(图 3)。礼乐滩与中沙群岛之间的剖面显示出陡峭的洋陆壳转换带,其中礼乐滩和中沙群岛莫霍面深度为 22~25 km 左右,为减薄型陆壳结构,对应正重力异常;向海盆方向存在水深、磁力和重力异常的陡峭梯度带,且很快过渡到洋壳结构,该陡峭带为洋陆壳过渡带,相比北部陆缘的中、东部剖面,该地区的洋陆壳转换带要陡峭很多,暗示了南海共轭陆缘局部构造动力的差异性。南沙海槽为负高值重力异常,其两侧也存在水深、磁力和重力异常急剧变化的陡峭梯度带,具有低地温梯度和低热流值,且南沙海槽槽底之下可能存在残留的古洋壳(夏戡原,1997),由此推测,其地壳结构可能属于古俯冲残留型陆壳。

南海位于欧亚大陆东南缘,邻近特提斯构造域和滨太平洋构造域的交汇处。沿特提斯构造域发生的冈瓦那大陆边缘的渐次裂解、漂移,和向欧亚大陆

的碰撞拼贴,以及沿滨太平洋构造域发生的俯冲,都对南海南、北陆缘的形成演化具有重要的影响和控制作用,从而导致南海南、北共轭陆缘从东到西、从南到北的差异性地壳结构,并使多种类型的陆壳结构发育。另外,古南海沿南沙海槽的俯冲消失和紧接其后南巴拉望的逆冲推覆以及现代马尼拉俯冲带,均会导致南、北陆缘地壳结构的剧烈变化,暗示了南海共轭陆缘地壳结构的复杂性。

## 4 讨论与结论

南海及其周边陆区发现较大范围的海相中生代地层和古动物群,说明南海在中生代存在较大范围的特提斯海,并经历了晚三叠—早侏罗世和晚侏罗—早白垩世两次海侵以及后期的隆起剥蚀(夏戡原和黄慈流,2000)。深地震探测揭示了东沙—澎湖—北港隆起带为地壳增厚和高磁异常带,其上地壳减薄,但下地壳增厚(Nissen *et al.*, 1995),推测中生代古洋壳的存在,该隆起带可能为中生代缝合带。夏戡原和黄慈流(1997)从地震资料上发现,在南沙地块与南海深海盆洋壳接触处,在上第三系水平层状地层之下存在一套变形地层。从变形地层的地震相特征来看,其似乎为下第三系或更老的地层。这说明,在现代洋壳以南与南沙地块之间,可能存在较老的基底,且由于地壳很薄(9~10 km),推测其可能为古洋壳。以上资料揭示了南海南、北陆缘地壳结构中混有古洋壳的物质,从而在认识南海共轭陆缘地壳结构的变化特征上增添了更为复杂的因素,也提醒研究人员在研究探讨南海陆缘地壳结构的差异性和类型特征时应该将古洋壳的可能影响因素考虑进去。

地球物理和钻井资料揭示,南海及周缘陆区在中新生代时的岩浆活动极为普遍。越南南部由闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩组成的岩基呈北东走向,侵入下侏罗统红层并使其变质;在沿海地区则出露晚白垩世至早第三纪的淡色亚碱性花岗岩岩基;在湄公河三角洲至纳土纳岛的陆架区的新生代沉积盆地的基底内,发现有许多燕山期花岗岩类,时代为晚侏罗世至早白垩世(Areshev *et al.*, 1992);万安盆地的基底是以花岗闪长岩为主;在南海西南部钻遇燕山期花岗岩,且在晚白垩世至早第三纪早期遭受风化(Areshev *et al.*, 1992);在南沙海区的仁爱礁西测发现了流纹质凝灰岩、蚀变闪长岩及蚀变橄榄辉长岩,以及晚三叠世至早侏罗世浅变质的三角洲相

砂岩、粉砂岩;有地震资料表明,南沙海区前新生代基底由变质或未变质的沉积岩组成,因而被侵入岩和喷出岩复杂化。基性—超基性岩浆岩也广泛分布于加里曼丹岛北部、巴拉望岛以及民都洛岛,常与燧石岩和深海沉积共生而构成蛇绿岩套,有时在混杂岩中呈岩块出现,代表因构造变动逆冲上来的古洋壳碎片,指示了古汇聚带的存在;另外,新生代时期在越南、东南沿海及南沙南部陆区发育了较大规模的玄武岩。这些岩浆活动对南海南、北陆缘的地壳结构起到过一系列的改造作用,导致了局部地区重力异常和磁异常特征上的差异性和特殊性,使其具有发育下地壳高速层和局部莫霍面的抬升等特征,也从侧面反映了南海共轭陆缘地壳结构特征及类型的独特性。

在南海北部陆缘,以中地壳低速层和下地壳高速体的分布特征为基础,拟定了滨海断裂带为华南正常陆壳与南海减薄陆壳的分界标志,且以地壳减薄程度和下地壳高速层的尖灭为标志,圈定了洋陆壳转换带、西沙海槽夭折裂谷型等地壳特征。南沙地块礼乐滩洋陆壳转换带,表现为水深、磁力和重力异常变化的陡峭梯度带,而礼乐滩以西的洋陆壳转换带从东到西逐渐变得平缓,南沙海槽两侧的水深和重力异常具有对称性,可能存在古洋壳。因此,南海共轭陆缘既能划分出减薄陆壳、洋陆壳转换带和洋壳等特征类型,也存在夭折裂谷型地壳和残留古洋壳等特征类型。

## References

- Areshev, E. G., Tran, L. D., Ngo, T. S., et al., 1992. Reservoirs in fractured basement on the continental shelf of southern Vietnam. *J. Petrol. Geol.*, 15(4): 451—464.
- Hazebroek, H. P., Tan, D. N. K., 1993. Tertiary tectonic evolution of the NW Sabah continental margin. In: The, G. H., ed., Proceedings of the symposium on tectonic framework and energy resources of the western margin of Pacific basin. *Bull. Geol. Soc. Malaysia*, 33: 195—210.
- Houtz, R. E., Hayes, D. E., 1984. Seismic reflection data from Sunda shelf. *AAPG Bulletin*, 68: 1870—1878.
- Hutchison, C. S., 1996. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo. In: Hall, R., Blundell, D., eds., Tectonic evolution of Southeast Asia. *The Geological Society of London, Special Publications*, 106: 247—262.
- Jia, S. X., Li, Z. X., Xu, Z. F., et al., 2006. Crustal structure

- features of the Leiqiong depression in Hainan Province. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(5): 1385—1394 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q. H., 1989. Geology and hydrocarbon resources in the South China Sea. Geology Press, Beijing.
- Liao, Q. L., Wang, Z. M., Wang, P. L., et al., 1988. Explosion seismic study of the crustal structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou region. *Acta Geophysica Sinica*, 31(3): 270—280 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Yang, S. K., Zhou, D., et al., 1998. Basic characteristics of extension structure in northern Nansha islands, China, and its dynamical implications. *Geological Journal of China Universities*, 4(1): 64—72 (in Chinese with English abstract).
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Buhl, P., et al., 1995. Deep penetrating seismic sounding across the northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 100(B11): 22407—22433.
- Qiu, X. L., Shi, X. B., Yan, P., et al., 2003. Recent progress of deep seismic experiments and studies of crustal structure in northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 13(7): 481—488. doi: 10.1080/10020070312331343890
- Qiu, X. L., Ye, S. Y., Wu, S. M., et al., 2001. Crustal structure across the Xisha trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 341(1—4): 179—193. doi: 10.1016/S0040—1951(01)00222—0
- Ruan, A. G., Niu, X. W., Wu, Z. L., et al., 2009. The 2D velocity and density structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan depression. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 522—528 (in Chinese with English abstract).
- Su, D. Q., Liu, Z. H., Chen, X., et al., 1991. Features and interpretation of gravity in the Liyne bank and its surrounding areas. In: Nansha islands cruises of South China Sea institute of oceanology, ed., geology, geophysics and coral in the Nansha islands and its surrounding areas. Ocean Press, Beijing.
- Su, D. Q., Liu, Y. Q., Chen, X., et al., 2004. Moho depth in South China Sea. In: Zhang, Z. J., Gao, R., Lv, Q. T., et al., eds., Deep structure and dynamics in the continent of China. Beijing, Science Press, 357—365.
- Sun, Z., Sun, L. T., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup through 3D analogue modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 435—447 (In Chinese with English abstract).
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., The tectonic and geologic evolution of south eastern Asian Seas and Islands, II. Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C., 27, 23—56.
- Tong, D. J., Ren, J. Y., Lei, C., et al., 2009. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea, and controlling of the post-rift subsidence. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 963—974 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. K., Chen, M. K., Lee, C. S., et al., 2006. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 412(3—4): 237—254. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.039
- Wu, Z. L., Ruan, A. G., Li, J. B., et al., 2008. New progress of deep crust sounding in the mid-northern South China Sea using ocean bottom seismometers. *South China Journal of Seismology*, 28(1): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Xia, K. Y., Huang, C. L., 1997. Tectonic framework and sedimentary basin analysis of the South China Sea and its surrounding areas. In: Gong, Z. S., Li, S. T., eds., Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press, Beijing.
- Xia, K. Y., Huang, C. L., 2000. The discovery of Meso-Tethys sedimentary basins in the South China Sea and their oil and gas perspective. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 227—238 (in Chinese).
- Xia, S. H., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2010. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5—6): 460—472. doi:10.1016/j.jseas.2009.11.004
- Xu, H. L., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2006. Characteristics of the crustal structure and hypocentral tectonics in the epicentral area of Nan'ao earthquake ( $M=7.5$ ), the northeastern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51(Suppl.): 95—106. doi:10.1007/s11434—006—9095—x
- Yan, P., Zhou, D., Liu, Z. S., 2001. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 338(1): 1—21. doi: 10.1016/S0040—1951(01)00062—2
- Yang, Z., Besse, J., 1993. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from northern Thailand supports the extrusion model for Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 117: 525—552. doi:10.

1016/0012-821X(93)90101-E

Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., et al., 2004. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 543—549 (in Chinese with English abstract).

Yao, B. C., Zeng, W. J., Hayes, D. E., et al., 1994. The geological memoir of South China Sea survey jointly by China and USA. China University of Geosciences Press, Beijing (in Chinese).

Yin, Z. X., Lai, M. H., Xiong, S. B., et al., 1999. Crustal structure and velocity distribution from deep seismic sounding along the profile Lianxian-Boluo-Gankou in South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(3): 383—392 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Deng, C. M., Zhao, Y., 1991. Features and geological implications of magnetic anomalies in the Liyne Bank. In: Nansha islands cruises of South China Sea institute of oceanology, ed., geology, geophysics and coral in the Nansha islands and its surrounding areas. Ocean Press, Beijing.

Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, S. H., et al., 2010. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and  $V_p/V_s$  ratios derived from three-component OBS data. *Tectonophysics*, 480(1-4): 183—197. doi:10.1016/j.tecto.2009.10.004

Zhao, M. H., Qiu, X. L., Ye, C. M., et al., 2004. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the Binhai (littoral) fault zone in northeastern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(5): 845—852 (in Chinese with English abstract).

Zhou, D., Ru, K., Chen, H. Z., 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251(1-4): 161—177. doi:10.1016/0040-1951(95)00018-6

## 附中文参考文献

嘉世旭,李志雄,徐朝繁,等,2006.雷琼拗陷地壳结构特征.地球物理学报,49(5):1385—1394.

金庆焕,1989.南海地质与油气资源.北京:地质出版社.

廖其林,王振明,王屏路,等,1988.福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究.地球物理学报,31(3):270—280.

刘海龄,杨树康,周蒂,等,1998.南沙北部伸展构造的基本特

征及其动力学意义.高校地质学报,4(1):64—72.

丘学林,施小斌,阎贫,等,2003.南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展.自然科学进展,13(3):231—236.

阮爱国,牛雄伟,吴振利,等,2009.潮汕拗陷中生代沉积的折射波2D速度结构和密度.高校地质学报,15(4):522—528.

苏达权,刘云龙,陈雪,等,2004.南海的三维莫霍界面.见:张忠杰,高锐,吕庆田,等,编.中国大陆地球深部结构与动力学研究.北京:科学出版社,357—365.

苏达权,刘祖惠,陈雪,等,1991.礼乐滩及其邻近海区的重力场特征及解释.见:中国科学院南沙综合科学考察队,编,南沙群岛及其邻近海区地质地球物理及岛礁研究论文集(一),北京:海洋出版社.

孙珍,孙龙涛,周蒂,等,2009.南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟.地球科学——中国地质大学学报,34(3):435—447.

佟殿君,任建业,雷超,等,2009.琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其对裂后期沉降的控制.地球科学——中国地质大学学报,34(6):963—974.

吴振利,阮爱国,李家彪,等,2008.南海中北部地壳深部结构探测新进展.华南地震,28(1):21—28.

夏戡原,黄慈流,1997.南海及围区大地构造格架与沉积盆地分布.见:龚再升,李思田,等编著,南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集.北京:科学出版社.

夏戡原,黄慈流,2000.南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与找寻中生代含油气盆地的前景.地学前缘,7(3):227—238.

徐辉龙,丘学林,赵明辉,等,2006.南海东北部南澳大地震( $M=7.5$ )震中区的地壳结构特征与震源构造.科学通报,51(增刊2):83—91.

姚伯初,万玲,刘振湖,等,2004.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.地球科学——中国地质大学学报,29(5):543—549.

姚伯初,曾维军, Hayes, D. E., 等,1994.中美合作调研南海地质专报.北京:中国地质大学出版社.

尹周勋,赖明惠,熊绍柏,等,1999.华南连县—博罗—港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果.地球物理学报,42(3):383—392.

张毅祥,邓传明,赵岩,1991.礼乐滩磁异常特征及其地质意义.见:中国科学院南沙综合科学考察队,编,南沙群岛及其邻近海区地质地球物理及岛礁研究论文集(一).北京:海洋出版社.

赵明辉,丘学林,叶春明,等,2004.南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析.地球物理学报,47(5):845—852.