

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.02.010

南沙地块南薇隆起区的地震反射特征和结构单元划分

郭磊^{1,2}, 詹文欢^{1,2}, 尚振华^{1,2,3}, 陈梅^{1,2}, 冯英辞^{1,2}

(1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 金属矿山安全技术国家重点实验室长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012)

摘要:南薇隆起区地处南沙地块西北部, 紧邻西南次海盆, 周围发育大量陆缘裂解盆地。裂陷盆地拥有丰富的油气资源。地块经历了中生代末期至古近纪裂谷拉张, 并随晚始新世的海底扩张向南漂移至现今位置。结合区域以往地震剖面 and 钻井数据, 分析了 2013 年中科院南海海洋研究所“实验 2 号”采集的高分辨率单道地震数据(Nan-1), 总结了南薇隆起区的地震反射特征。认为南薇隆起区主要由南部裂陷下沉带和北部埋藏火山隆起带两个结构单元组成。从北到南, 埋藏火山隆起带跨越约 63 km 的范围, 裂陷下沉带跨越约 58 km 的范围。地震剖面清晰地揭示了该区向海盆侧隆起且在 SE 向成带的特征。南薇区具有拉张背景, 其形成与演化主要是与西南次海盆的扩张作用, 以及南沙地块与婆罗洲地块的碰撞作用等有关。自上新世以来, 整个南薇隆起区进入构造活动相对稳定阶段, 地壳稳定性较好。

关键词:地震反射; 结构单元; 南薇隆起; 南沙海域; 永暑礁

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)02-0099-09

作为西太平洋边缘海中最大的海盆之一, 南海存在多个明显由大陆张裂分离及海底扩张形成的海盆。就海盆扩张顺序, Briaies 等认为西北次海盆和东部次海盆在约 30 Ma 开始扩张, 后逐渐向西南方向扩张, 西南次海盆形成时期最晚^[1,2]。根据 IODP349 航次的数据显示, 西南次海盆形成于约 23.6~16 Ma, 为早中新世至中中新世^[3,4]。南沙地块位于海盆南部边缘, 其形成演化经历了中生代末期至古近纪裂谷拉张和晚始新世海底扩张, 是一个复杂过程^[5]。早渐新世时, 地块受扩张作用裂离北部陆缘向 SE 方向运动并与婆罗洲地块发生陆陆接触碰撞。随后, 该区发生大规模沉降, 南沙所处地壳逐渐裂离减薄, 发育了大量台地相碳酸盐岩^[6-9]。拉张构造是南沙地块在新生代的主要构造类型。受到渐新世后期地块碰撞作用的影响, 区内发育大规模的挤压构造及生物礁, 构造圈闭非常发育, 油气资源潜力巨大^[10,11]。

南薇隆起区是南沙地块典型隆起区域, 位于地块西北部, 紧邻洋盆, 构造位置特殊。区内广泛发育生物礁碳酸盐台地, 形成了南沙地块独有的岛礁区。渐新世以来, 受南北对挤及后期地块的漂移沉降等

作用, 隆起区发育大量背斜、断背斜构造, 珊瑚礁和海相泥岩沉积。同时, 由于隆起区特殊构造位置, 区内发育众多规模不等、构造复杂的沉积盆地, 主要包括南薇西盆地、南薇东盆地和永暑盆地等。另外, 受南海区域应力场的影响, 南薇隆起区的构造活动频繁, 其构造演化史不仅与南海开裂、海盆扩张和扩张停止相关的动力学体系有关, 而且与板块之间的碰撞作用有关, 具有重要的研究意义。

目前, 南海南部地震勘探工作已进入高分辨率采集阶段^[12-14]。对于南沙地块, 以往研究主要集中在南部陆缘深部构造及沉积层序等方面^[15-17], 对浅地层构造特征的研究较少, 缺乏洋盆边缘区域的针对性研究。因此, 本文拟在区域地质构造及其演化分析的基础上, 结合区内地震反射资料及围区钻井数据, 重点利用 1 条 NW 向高分辨率单道地震剖面, 研究南薇隆起区的反射地震特征, 确定其裂陷下沉带和埋藏海山隆起带的规模。分析和研究南薇隆起区浅地层地震特征及相应的结构单元划分, 有助于为进一步研究洋盆南部洋陆过渡带构造演化特征提供基础地质信息。

1 区域地质背景

南沙地块主要是指廷贾断裂以东地区^[18,19]。现有研究显示, 该地块基底仍不确定。1976 年, 阿莫科-菲律宾石油公司在礼乐滩钻探了“Sampagu-

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB956104); 国家自然科学基金项目(41376063)

作者简介: 郭磊(1984—), 女, 博士研究生, 海洋地质专业, E-mail: guolei@scsio.ac.cn

收稿日期: 2016-08-31; **改回日期:** 2016-10-21. 周立君编辑

ita-1井”,该井最深钻至下白垩统(约4 123.9 m处),认为是区域迄今揭示的基底中最早的地层^[20]。姚伯初等^[6]认为南沙地块是一地壳减薄陆块,地壳厚度在16~25 km之间。新生代之前,它与西沙—中沙地块相连;新生代由于海盆扩张(晚始新世—早渐新世),与后者分离。吴世敏^[21]等认为在该地块南缘与加里曼丹—巴拉望地块之间经历了一个连续演化的过程。李家彪等^[5]认为南沙地块在经历古近纪裂谷期后开始稳定下沉,发育NE走向的半地堑系和坳陷群,并被有一定长度的线性地垒式断块—碳酸盐礁滩分隔。关于区域热流情况,南沙地块热流值较低,约为60 mW/m²,西侧曾母盆地热流值较高,南侧南沙海槽具中低热流值,基本遵循随地壳年龄增加而降低的规律。另外,南薇隆起区位于西南次海盆南部边缘,属于在陆壳向洋一侧形成的隆起区,其特点是发育众多新生代沉积盆地、碳酸盐台地及珊瑚礁。断裂特征方面,由于海盆南部盆地的地裂陷作用结束要比北部的大致晚7.5~5.5 Ma^[22],且以挤压作用为主,区内主要发育了NE、NW和SN走向的断裂。

研究区位于南沙地块隆起区(图1),其北部直落3 800~4 300 m高差进入西南次海盆,西邻万安盆地,南部为北康、曾母盆地,东部与礼乐盆地相接。南薇隆起区盆地均属汇聚型陆缘盆地。受南海区域应力场影响,构造活动频繁。自中生代末期以来,隆起区分别经历了礼乐运动、西卫运动和万安运动等

3个主要的沉积构造运动。其中,在中中新世—晚中新世的万安运动是区内最强烈的一次构造运动,地层变形强烈,区内盆地由此前的张裂阶段转型为压扭阶段^[22,23]。

2 数据来源

目前,地震反射资料已广泛用于地质构造领域的研究。据可查文献^[8,24,25],地震剖面已用于研究南沙地块的地震地层、构造变形特征以及区内碳酸盐台地的层序等方面。同时,目前利用单道地震数据对区域地质构造及其活动性分析的研究也取得了较好效果^[26,27]。本文所用数据是由中国科学院南海海洋研究所“实验2号”调查船于2013年10月在南沙群岛采集得到的高分辨率单道地震数据,采集参数如下:等离子体震源单脉冲,能量30 kJ;小型8位水听器电缆,记录长度4 s;信号采样间隔0.33 ms;炮间距20 m。Nan-1测线长度为124 km(图2)。

南薇隆起区内钻井资料较少,可收集到的仅有一口海底深钻:ODP184航次的1143站位(图2)。由于测线紧邻永暑礁,结合其上两个第四纪珊瑚礁钻孔(南永1井、南永2井)分析,可为地层解释提供依据。其中,两钻孔均为永暑礁的珊瑚礁岩心,长度分别为162和430 m,两井相距约100 m,地质与环境条件类似,主要由珊瑚灰岩、珊瑚砾块灰岩、生

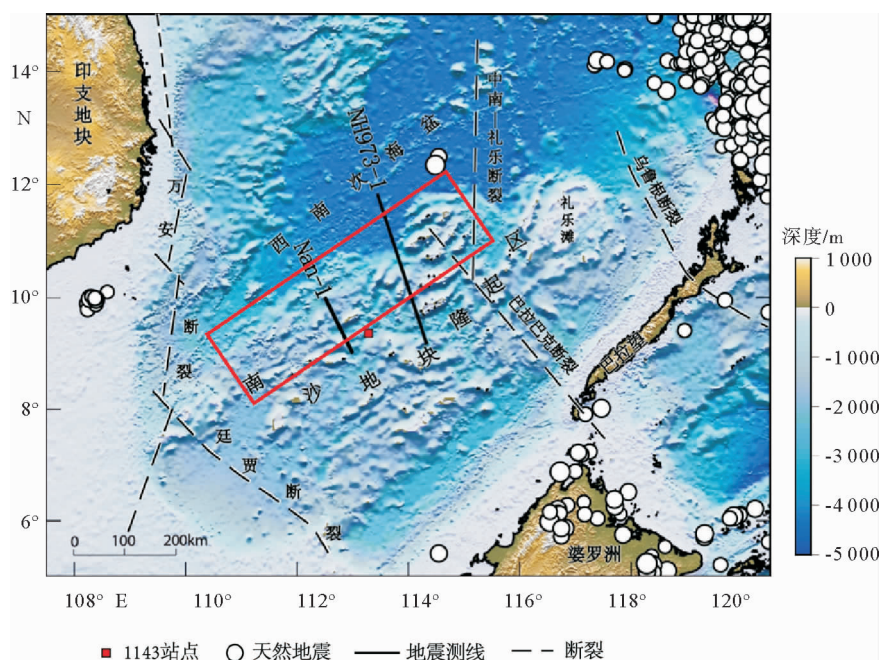


图1 南沙中部海域地貌特征及研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of the Nansha Waters and study area

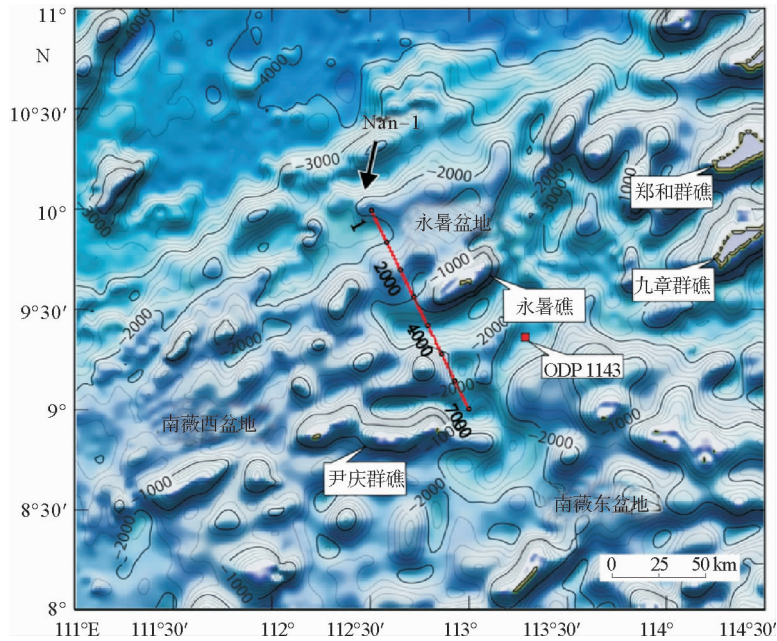


图 2 反射地震数据测线位置图(Nan-1)

Fig. 2 Location of the seismic survey Line Nan-1

物砂粒岩组成^[28-31]。根据研究区及领域构造格局、钻孔等地质资料^[8,32-34],将研究区新生代的主要地层界面分为 T2、T3、T4、T5 和 Tg 等。认为界面 Tg 与南海海底扩张时间对应,不整合面 T5 则代表扩

张结束、南沙地块开始与婆罗洲发生碰撞的时间,界面 T2 认为与挤压与隆升事件的结束相对应。相应的岩性也由内陆架台地相礁灰岩向半深海相的粉砂岩、泥岩过渡(图 3)。

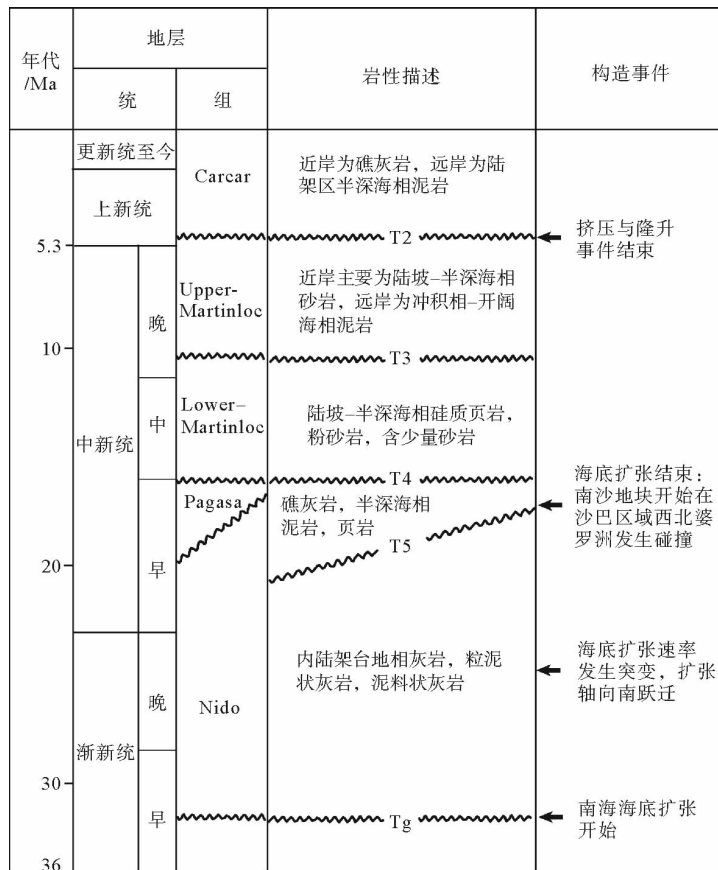


图 3 研究区主要地层界面时代、岩性及主要构造事件(据文献[8])

Fig. 3 Seismic stratigraphy, lithology and major tectonic events of the study area

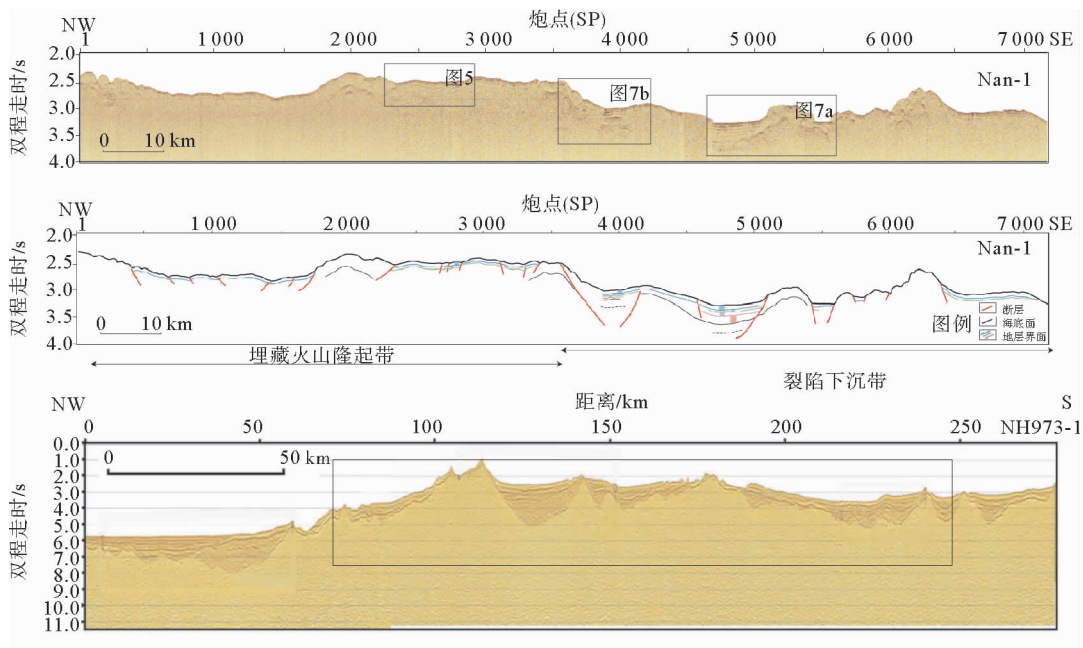


图4 南薇隆起区的单道地震剖面 Nan-1 和穿越西南次海盆的 NH973-1 多道地震剖面(据 Ding et al., 2013, 修改; 位置见图 1)
Fig. 4 Single-channel seismic line Nan-1 and multichannel seismic line NH973-1 in the Nanwei uplift zone

3 数据分析和解释

整个南沙地块在新生代发生拉张减薄, 发育一系列 NE 向半地堑系和凹陷群, 并被有一定长度的线性地垒和大型地垒式断块—碳酸盐礁滩分割^[5]。地震测线 Nan-1 穿越南沙地块南薇隆起区。结合 1994 年和 2009 年采集的多道地震剖面^[8,9,17], 认为清晰的地震相展示了沿 NW 向构造带形态(图 4)。区内断裂构造类型众多, 且大多呈 NE 或 NW 向展布, 部分为 NS 或 WE 向断续延伸^[35]。

3.1 结构单元划分

根据剖面显示, 可将南薇隆起区分为北部埋藏火山隆起带和南部裂陷下沉带两个主要结构单元(图 4)。

埋藏火山隆起带主要分布在永暑盆地, 其范围从炮点(Shot Point, SP)1 至 3600。地震剖面上仅显示浅层的地震反射特征, 且沉积连续, 分析认为主要是上新世以来的沉积。结合已有资料分析, 认为深部主要是火山隆起或巨大碳酸盐岩台地, 内部无明显反射特征。隆起的台地顶部沉积物主要表现为平行连续的地震反射特征, 底部则反映为低频杂乱反射(图 5)。根据剖面显示, 隆起带位于洋陆过渡带, 临近海盆, 推测隆起带的基底是中新世的火山岩隆起, 属岩浆侵入型基底, 因此, 将该区域定义为埋

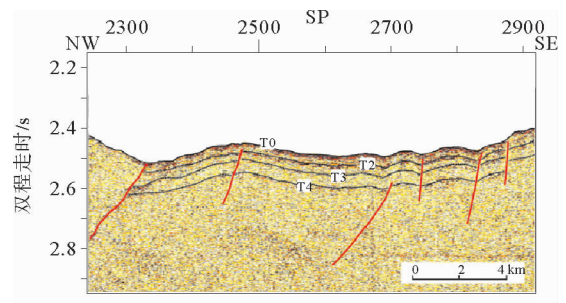


图5 埋藏火山隆起带的地震剖面
Fig. 5 Seismic profile across the buried volcanic uplift belt

藏火山隆起区。扩张结束后, 地块向南漂移并与婆罗洲发生碰撞, 进入裂后沉降期, 该隆起带表现为挤压挠曲沉降的特点, 后期受南北两侧地块的挤压与抬升, 并发育 SE 向断裂, 最终形成现今的形态。这表明自中新世以来的断裂活动较弱, 至上新世以后, 该地带进入构造运动相对稳定阶段。

裂陷下沉带多分布在南薇西盆地, 处深水区。下沉带范围主要从 SP 3600 至 7000。可见几组明显的同相轴反射, 表明沉积层成楔形充填于半地堑中, 部分地段发育碳酸盐台地。在资料采集中, 尽管使用了脉冲高能量电火花做震源, 但受到单道接收的限制, 深部地层反射能量较弱, 很难清楚辨识。因此, 参考 2009 年采集的 NH973-1 测线^[8,9](图 4)进行研究。研究区位于扩张海盆末端, 认为是由地壳裂解形成的, 其间尚未发展出洋壳, 属洋陆过渡带的

范围。同时,结合分析结果,推断该区基底主要经历了初期裂陷期(早渐新世)、主裂解扩张期(渐新世-中中新世)和裂后热沉降期(晚中新世至今)等 3 个阶段,且发育海陆过渡相和海相沉积^[36]。

3.2 地震反射界面特征

剖面主要横穿南薇隆起区,能够揭示该区主要地层的地震反射特征。根据研究区构造特征,识别出 T0、T2、T3、T4、T5 和 Tg 等 6 个主要反射界面^[16,32]。通过分析几个主要地震反射界面,有助于研究区域构造运动特征及构造演化过程等。另外,

进行层位追踪时,由于受剖面品质和地形因素等条件制约,识别的个别反射层位置可能存在解释偏差。

(1) T0 海底面,全区分布,为强振幅,连续反射,且与下部地层存在上超、下超或整合接触(图 4)。图 6 显示了明显的上超和角度不整合。其中,图 6a 的上超关系,表明海进,指示了原始盆地的沉积边界;图 6b 的地层角度不整合关系,推测在该部位可能有构造挤压作用或岩墙侵入。

(2) T2 界面,对应挤压或隆升事件的结束。全区大范围分布,为强振幅,连续反射,上部地层较薄,部分地层缺失(图 5)。

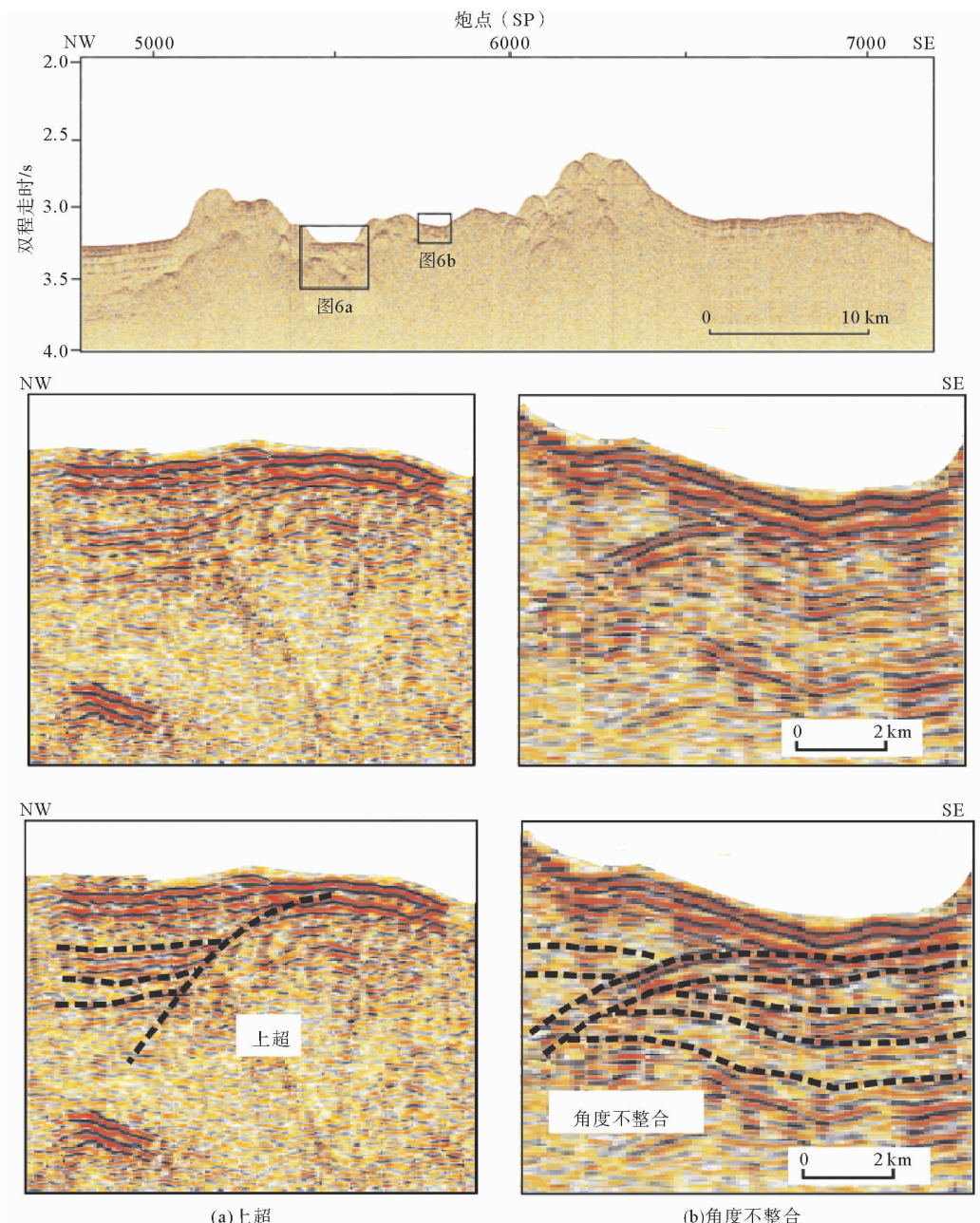


图 6 测线 Nan-1 中的地层接触关系

Fig. 6 Stratigraphic contacts in the study area(Nan-1)

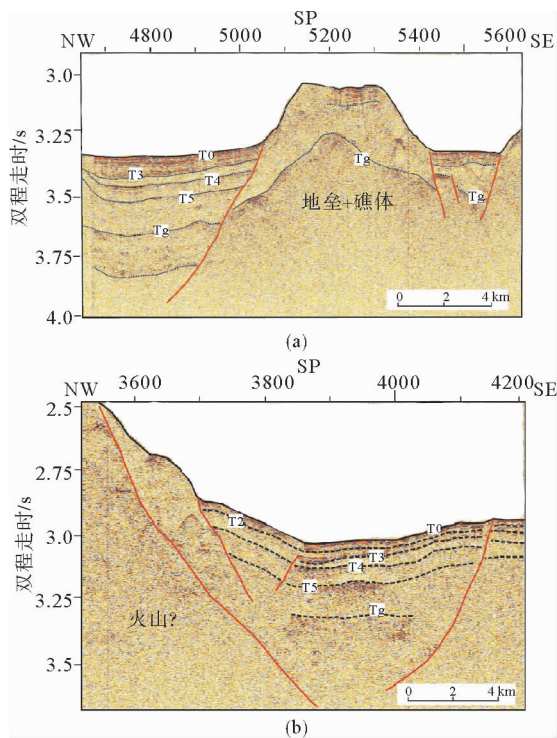


图7 裂陷下沉带的地震剖面
Fig. 7 Seismic profile across the subsidence belt in rifting stage

(3) T3界面,全区分布,为连续的强振幅,是本区最明显的一个界面,是水平层状沉积的底界面。认为是上 Matinloc 和下 Matinloc 的分界面(图3)。其主要反射特征是存在强烈的削蚀现象。

(4) T4界面,在全区基本表现为平行状、连续性较好的地震反射特征,在盆地边缘具明显的上超现象(图7a)。本次解释为中中新世地层,与NH973-1测线的T40不整合面相对应^[8]。以T4为界,海底扩张结束,进入裂后沉降期。在ODP1143井钻探中获得的上中新统主要是近岸半深海相或远滨冲积相,标示着该界面由漂移期浅水相向深水相沉积环境转化。同时,由于海底扩张结束,整个地块也由挠曲沉降期向快速沉降期转化。

(5) T5界面,是一个重要的不整合面(图3)。地震反射特征通常表现为中低频不连续的反射同相轴,且在区内大范围缺失。T5的上部地层振幅相对较低,局部空白,其上下地层反射特征差异较大。有学者认为^[8,9],该界面是台地相碳酸盐的顶界,在某些地形较高地区会形成礁体构造。

(6) Tg基底面,是一个重要的地层界面,在研究区大多表现弱振幅低连续反射。在不同构造部位,其振幅和连续性可能不同。它代表基底初始裂陷期,地层埋藏深,断层发育(图7a),地震反射特征不稳定。认为Tg与T5可组成一套层序,其特点是

地震反射特征大多表现为平行连续反射,席状外形,且常见于新生代半地堑之下。根据剖面显示的火山形态(图7b),推测在隆起带和下沉带的过渡区域存在岩浆侵入体。

另外,根据南永1井、南永2井资料,永暑礁地壳长期处于下沉状态。2.47 MaBP以来,该区地壳已下降268 m^[29]。因此,推测在T0和T2之间存在一个地层界面T1,由于地层较薄,未在剖面中标示。T1是新近系上新统与第四系更新统的分界,其反射特征为连续的强振幅反射,认为T0-T3是一个明显的地震超层序^[16]。

4 讨论和结论

南薇隆起区的盆地均为裂陷盆地,其大陆边缘和盆地主要通过岩石圈的伸展作用形成,被动大陆边缘岩石圈的减薄导致了岩浆的减压熔融,最终形成了洋壳和减薄的转换带^[37-39]。该区基底主要经历了初期裂陷期、主裂解扩张期和裂后热沉降期等3个阶段,并发育海陆过渡相和海相沉积。根据采集的高分辨率单道地震数据(测线Nan-1),南薇隆起区主要分为北部埋藏火山隆起带和南部裂陷下沉带。测线走向为NW向,与古洋中脊垂直,且平行于海底扩张方向。因此,可沿西南次海盆南部海盆边缘进行分带,即分为埋藏火山隆起带和裂陷下沉带两部分。从北到南,埋藏火山隆起带跨越约63 km的范围,裂陷下沉带跨越58 km的范围。地震剖面清晰地揭示了该区向海盆侧隆起且在SE向成带的特征。在第三纪裂谷阶段后,隆起区地块开始稳定下沉,可以看到,在裂陷下沉带发育多个半地堑系和拗陷群,其被有一定长度的线性地垒式断块—碳酸盐礁滩分隔。较大断裂旁的火山刺穿沉积层,形成隆起背部的新高地,发育有碳酸盐岩沉积。而埋藏火山隆起带在新生代经历了若干期挤压抬升运动,表现出明显的地块抬升和地壳减薄特征。总的来说,断拗转换和挤压抬升是研究区新生代以来的主要构造特征。同时,根据热流数据,南沙区域平均热流值为60 mW/m²,并由NW往SE方向降低,而ODP1143孔的地温梯度高达86 °C/km,热流值达到84 mW/m²,反映出较高的地热^[40,41],揭示了南薇区具有强拉张背景。

关于研究区的构造演化时期,认为主要是在南海扩张后,即是中中新世至今。其与陆缘盆地扩展后缓慢沉降和扩张后快速沉降是对应的。对于其形成机制,推测可能受多种因素影响,不仅有太平洋板

块、菲律宾海板块和印度洋板块对冲运动的影响,还有深部地幔物质作用的影响^[20]。南薇隆起区的形成与演化,主要是与西南次海盆的扩张作用,以及南沙地块与婆罗洲地块的碰撞作用等有关。第四纪以来,整个块体地震活动比较微弱。根据 4 级以上的地震震中分布显示(图 1),在南薇隆起区范围内无强震纪录(时间从 1919 年至 2016 年 7 月)。仅在双子礁附近,于 1965 年 10 月 7 日在海盆内发生过一次 5.9 级地震。区内存在第四纪火山活动^[35],分布有 3 个第四纪死火山口。断裂带有岩浆侵入活动,形成一些小型的火山,部分成礁礁体的底座可能是火山岩。这反映了海盆南缘隆起区是比较活跃的一个火山活动带。上新世以来,南海南部边缘西部的几大主要盆地基底都处在热流逐渐降低的阶段^[42-44]。结合断裂分布特征,该地带自上新世可能进入构造运动相对稳定阶段。

地震的产生可以引发震源及其附近地区地热的异常变化,地热系统的活动能力增强也会诱发地震。然而,通过钻孔和岩石“探针”手段去解释深部地幔过程并探讨地块形成演化动力源问题方面的资料非常缺乏,建议今后在该区域加强大洋深钻、地震台网和热流探针的深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Brian Taylor, Dennis E. Hayes. The tectonic evolution of the South China Basin[C]//In: Dennis E. Hayes (Ed.). The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. AGU, Washington D C 1980, 23: 89-104.
- [2] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea; Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [3] ChunFeng Li, Xing Xu, Jian Lin, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. Geochem. Geophys. Geosyst., 2014, 15: 4958-4983.
- [4] Brian Taylor, Dennis E. Hayes. Origin and history of the South China Basin[C]//In: Dennis E. Hayes (Ed.). The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. AGU, 1983, 27:23-56.
- [5] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 148. [LI Jiabiao. Evolution of China's Marginal Seas and its Effect of Natural Resources[M]. China Ocean Press, 2008: 148.]
- [6] 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. [YAO Bochu, WAN Ling, WU Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China area[J]. Geology in China, 2004, 31(2): 113-122.]
- [7] 姚伯初. 南海新生代的构造演化与沉积盆地[C]//南海地质研究, 1998(10):1-17. [YAO Bochu. The tectonic evolution and sedimentary basins of South China Sea in Cenozoic[C]//Geological Research of South China Sea, 1998(10): 1-17.]
- [8] 丁巍伟, 李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用:来自两条 973 多道地震测线的证据[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension factors across the southern margin of the South China Sea: evidence from two regional multi-channel seismic profiles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3038-3056.]
- [9] DING Weiwei, Franke Dieter, LI Jiabiao, et al. Seismic stratigraphy and tectonic structure from a composite multi-channel seismic profile across the entire Dangerous Grounds, South China Sea[J]. Tectonophysics, 2013 (582): 162-176.
- [10] 张功成, 屈红军, 刘世翔, 等. 边缘海构造旋回控制南海深水区油气成藏[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 533-545. [ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, LIU Shixiang, et al. Tectonic cycle of marginal sea controlled the hydrocarbon accumulation in deep-water areas of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 533-545.]
- [11] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 611-627. [ZHANG Gongcheng, XIE Xiaojun, WANG Wanyin, et al. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 611-627.]
- [12] 熊莉娟, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海南部新生代控盆断裂特征及盆地群成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 113-127. [XIONG Lijuan, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic Basin-controlling faults and their bearing on basin groups formation in the southern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(6): 113-127.]
- [13] 孙福利, 王真理, 郝天珧, 等. 南海南部深部结构的复杂构造地震成像[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3210-3216. [SUN Fuli, WANG Zhenli, HAO Tianyao, et al. Seismic imaging of complicated deep structures in southern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3210-3216.]
- [14] 程子华, 丁巍伟, 董崇志, 等. 南海南部地壳结构的重力模拟及伸展模式探讨[J]. 高校地质学报, 2014, 20(2): 239-248. [CHENG Zihua, DING Weiwei, DONG Chongzhi, et al. Crustal structures inferred from gravity modeling and stretching model in the south of South China Sea [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(2): 239-248.]
- [15] WANG Yanlin, QIU Yan, YAN Pin, et al. Seismic evidence for Mesozoic strata in the northern Nansha waters, South China Sea[J]. Tectonophysics, 2016, 677-678: 190-198.
- [16] 彭学超, 郭依群, 陈玲, 等. 南沙中部海域诸盆地地震地层分析[J]. 石油物探, 2003, 42(4): 486-492. [PENG Xuechao, GUO Yiqun, CHEN Ling, et al. Seismic strati-

- graphic analysis of basins Nanweixi and Nanweidong in middle Nansha, South China Sea [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(4): 486-492.]
- [17] YAN Pin, LIU Hailing. Tectonic-stratigraphic division and blind fold structures in Nansha Waters, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 24: 337-348.
- [18] 孙珍, 赵中贤, 李家彪, 等. 南沙地块内破裂不整合与碰撞不整合的构造分析[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3196-3209. [SUN Zhen, ZHAO Zhongxian, LI Jiabiao, et al. Tectonic analysis of the breakup and collision unconformities in the Nansha[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3196-3209.]
- [19] 孙珍, 赵中贤, 周蒂, 等. 南沙海域盆地的地层系统与沉积结构[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 798-806. [SUN Zhen, ZHAO Zhongxian, ZHOU Di, et al. The Stratigraphy and the sequence architecture of the basins in Nansha region[J]. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 798-806.]
- [20] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 55-78.]
- [21] 吴世敏, 周蒂, 刘海龄. 南沙地块构造格局及其演化特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(1): 23-28. [WU Shimin, ZHOU Di, LIU Hailing. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha block, South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(1): 23-28.]
- [22] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 077-087.]
- [23] 高红芳. 南沙中部海域南薇西盆地、南薇东盆地构造演化差异性分析[J]. *南海地质研究*, 2002(14): 35-44. [GAO Hongfang. Comparison study of tectonic evolution between Nanweixi basin and Nanweidong basin, South China Sea[J]. *Geological Research of South China Sea*, 2002(14): 35-44.]
- [24] Chang Jih-Hsin, Hsu Ho-Han, Liu Char-Shine, et al. Seismic sequence stratigraphic analysis of the carbonate platform, north offshore Taiping Island, Dangerous Grounds, South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2016, doi: 10.1016/j.tecto.2015.12.010.
- [25] Stephan Steuera, Dieter Frankea, Florian Meresseb, et al. Oligocene-Miocene carbonates and their role for constraining the rifting and collision history of the Dangerous Grounds, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58(Part B): 644-657.
- [26] 魏喜, 贾承造, 孟卫工, 等. 西沙海域新近纪以来生物礁分布规律及油气勘探方向探讨[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(3): 308-312. [WEI Xi, JIA Chengzao, MENG Weigong, et al. Discussion on biogenetic reef distribution and hydrocarbon exploration direction in Xisha sea area since Neogene[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(3): 308-312.]
- [27] 冯贤辞, 詹文欢, 姚衍桃, 等. 西沙群岛礁区的地质构造及其活动性分析[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(3): 48-53. [FENG Yingci, ZHAN Wenhuan, YAO Yantao, et al. Analysis of tectonic movement and activity in the organic reef region around the Xisha Islands [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(3): 48-53.]
- [28] 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academia Sinica to the Nansha Islands. *Quaternary Coral Reef Geology of Yongshu Reef, Nansha Islands*[M]. China Ocean Press, 1992.]
- [29] 朱袁智, 沙庆安, 郭丽芬, 等. 南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997. [ZHU Yuanzhi, SHA Qingan, GUO Lifen, et al. *Cenozoic Coral Reef Geology of Yongshu Reef, Nansha Islands* [M]. Science Press, Beijing, 1997.]
- [30] 汤贤赞, 唐诚, 陈木宏, 等. 南沙群岛永暑礁钻井珊瑚礁和珊瑚碎屑的磁学分析[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(3): 44-51. [TANG Xianzan, TANG Cheng, CHEN Muhong, et al. Magnetism of drilling coral reef and coral clast from Yongshu atoll of Nansha Islands, Southern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(3): 44-51.]
- [31] 赵焕庭. 南海诸岛珊瑚礁新构造运动的特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(1): 37-45. [ZHAO Huanting. Characteristics of neotectonic movement of coral reef area of the South China Sea islands[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1998, 18(1): 37-45.]
- [32] 赵长煜, 宋海斌, 李家彪, 等. 南海西南次海盆 NH973-1 测线地震解释[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3258-3268. [ZHAO Changyu, SONG Haibin, LI Jiabiao, et al. Tectonic and seismic interpretation of line NH973-1 along southwest sub-basin in South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3258-3268.]
- [33] Hinz K, Schlueter H U. Geology of the Dangerous Grounds, South China Sea, and the continental margin off southwest Palawan; results of SONNE Cruises SO-23 and SO-27[J]. *Energy*, 1985, 10(3/4): 297-315.
- [34] Shipboard Scientific Party. Leg 184 Summary: Exploring the Asian Monsoon through Drilling in the South China Sea[R]// In: Wang P, Prell W, Blum P. eds. *Proc. ODP, Initial Results*, TX:IODP, College Station, 2000: 1-77.
- [35] 詹文欢, 刘以宣, 钟建强, 等. 南海南部活动断裂与灾害性地质初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(3): 1-9. [ZHAN Wenhuan, LIU Yixuan, ZHONG Jianqiang, et al. Preliminary analysis of the active faults an hazard geology in the south of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1995, 15(3): 1-9.]
- [36] 徐行, 姚永坚, 王立非. 南海南部海域南薇西盆地新生代沉积特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(3): 170-175. [XU Xing, YAO Yongjian, WANG Lifei. Cenozoic sedimentation of Nanweixi basin, the Southern South China Sea[J].

- China Offshore Oil and Gas(Geology), 2003, 17(3): 170-175.]
- [37] 刘以宣, 詹文欢. 南海变质基底基本轮廓及其构造演化[J]. 安徽地质, 1994, 4(1-2): 82-90. [LIU Yixuan, ZHAN Wenhuan. Basin outline and tectonic evolution of the metamorphic basement in the South China Sea[J]. Geology of Anhui, 1994, 4(1-2): 82-90.]
- [38] 鲁宝亮, 王璞珺, 吴景富, 等. 南海陆缘盆地中生界分布特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 497-503. [LU Baoliang, WANG Pujun, Wu Jingfu, et al. Distribution of the Mesozoic in the continental margin basins of the South China Sea and its petroliferous significance[J]. Petroleum exploration and Development, 2014, 41(4): 497-503.]
- [39] 朱俊江, 丘学林, 徐辉龙, 等. 南海北部洋陆转换带地震反射特征和结构单元划分[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(3): 28-34. [ZHU Junjiang, QIU Xuelin, XU Huilong, et al. Seismic reflection characteristic and structure unit division of a continent-ocean transition zone in the northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(3): 28-34.]
- [40] 施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海热流特征及其构造意义[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 63-73. [SHI Xiaobin, QIU Xuelin, XIA Kanyuan, et al. Heat flow characteristics and its tectonic significance of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(2): 63-73.]
- [41] 赵长煜, 宋海斌, 杨振武, 等. 南海南部边缘沉积盆地构造—热演化历史[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1543-1553. [ZHAO Changyu, SONG Haibin, YANG Zhenwu, et al. Tectonic and thermal evolution modeling for the marginal basins of the southern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1543-1553.]
- [42] 薛晨光, 杨李东. 地热监测在地震预报中的应用前景[J]. 科技信息, 2013, 25: 188. [XUE Chenguang, YANG Lidong. Prospects of applying geothermal monitor for the earthquake forecasting[J]. Science & Technology Information, 2013, 25: 188.]
- [43] Dmowska R. Connection between thermal stresses and earthquake processes[J]. Publish of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, 1975, 80: 1-45.
- [44] 安镇文, 朱传振. 地热异常和地震孕育的关系[J]. 地震研究, 1985, 8(4): 541-549. [ANZhenwen, ZHU Chuanzhen. Relationship between geothermal anomaly and earthquake development and occurrence[J]. Journal of Seismological Research, 1985, 8(4): 541-549.]

SEISMIC REFLECTION CHARACTERISTICS OF NANWEI UPLIFT ZONE IN NANSHA AND THEIR APPLICATION TO STRUCTURAL UNIT DIVISION

GUO Lei^{1,2}, ZHAN Wenhuan^{1,2}, SHANG Zhenhua^{1,2,3}, CHEN Mei^{1,2}, FENG Yingci^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Changsha Institute of Mining Research CO., Ltd., State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha 410012)

Abstract: A large number of continental margin rifting basins are well developed on the Nanwei uplift of Nansha Waters, which bears great oil and gas potentials. The region experienced a complex evolutionary history in Cenozoic period, including extensional rifting from Late Mesozoic to Paleogene and seafloor spreading in Late Eocene. A high-resolution single-channel seismic line Nan-1, acquired in the Nansha by the trial vessel "Shiyan 2" of the South China Sea Institute of Oceanology in 2013, is interpreted and analyzed in this study. As well, some previous seismic profiles and drilling data are studied. The seismic reflection characteristics of the Nanwei uplift in the southern margin are summarized and outlined briefly. Results show that the Nanwei uplift zone is mainly composed of two structural units, the southern belt of subsidence and the northern belt of buried volcanic uplift. Compared to the previous reflection seismic data in this area, some main seismic reflection layers are divided. The belt of buried volcanic uplift is about 63 km wide, and the neighboring subsidence belt 58 km wide both in SE direction. The distribution of sporadic epicenters stronger than 4 magnitude earthquakes suggest that the entire Nanwei uplift is still a relatively stable tectonic body since Pliocene.

Key words: seismic reflection; structural unit; Nanwei uplift; Nansha Waters; Yongshu Reef