

doi:10.3799/dqkx.2011.090

南沙海域礼乐地块构造地层及地壳结构特征

孙龙涛¹, 田振兴², 詹文欢¹, 孙宗勋¹

1. 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
2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 礼乐地块位于南沙海域东北部, 主要由2部分组成: 礼乐滩和礼乐盆地. 根据重力和地震数据研究礼乐地块的主要构造特征和地壳结构. 基于多道地震数据, 主要研究了基底之上的地层和断裂构造, 并通过重力数据反演分析了地块深部地壳结构. 礼乐滩区域主要为碳酸盐岩地层, 此区域地层较平, 断裂不发育. 而礼乐盆地区域早期断裂较为发育, 并且主要发育2种构造: 翘倾断块和宽缓背斜; 中生代地层厚度自SW向NE减薄, 但张裂期地层自SW向NE增厚, 这表明在张裂阶段断层活动强度自SW向NE增强, 离张裂中心越近, 断裂活动强度越大. 礼乐地块以正布格重力异常为主(60~140 mGal), 莫霍面深度约16~27 km, 拉张因子为1.3~2.0, 属于减薄型大陆地壳.

关键词: 礼乐地块; 重力反演; 构造; 地壳结构; 海洋地质.

中图分类号: P736.1 **文章编号:** 1000-2383(2011)05-0861-08 **收稿日期:** 2011-05-24

Crust Structure and Tectonostratigraphy of Liyue Block, Northeast of Nansha Area

SUN Long-tao¹, TIAN Zhen-xing², ZHAN Wen-huan¹, SUN Zong-xun¹

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: The Liyue block is composed of two parts, namely, Reed Bank and Liyue basin, which is separated by Zhongnan fault in west, Palawan trough in southeast and fault scarp in the north of Nansha area. Based on gravity and seismic data set, a systematic investigation on major tectonic and crust structure units in the Liyue block is made. Multichannel seismic data can better our understanding of the stratum and fault structure located in the sediment basement. In the Reed Bank, composed of reefs, the faults are undeveloped and the stratum is flat. In the basin area, the early faults are developed with two kinds of structures: tilted fault block and low relief anticline. The thickness of the Mesozoic strata in basin area decreases from SW to NE. But the thickness of rifting strata increases from SW to NE, which indicates the fault activity strength in the rift period increases from southwest to northeast. Gravity inversion is performed to understand the geometry of the MOHO surface and the crustal thicknesses beneath. The region is characterized by a large positive Bouguer gravity anomaly (60 to 140 mGal), and the MOHO depth generally varies from 16 to 27 km. In general, crustal structures can be distinguished from the thinned continental crust. The Liyue block is characterized by stretching factors ranging from 1.3 to 2.0, which indicates that the local region is lowly stretched.

Key words: Liyue block; gravity inversion; tectonics; crust structure; marine geology.

我国已成为石油消费和进口大国, 对外依存度已接近50%, 而且有逐步提升的趋势. 鉴于国际能源形势, 我国将把南沙海域作为重点油气研究区域. 礼乐地块位于南沙东北部(图1), 是中—非—越合作调查开发区域之一, Pagasa 1A井是Oriental石油矿产公司于1971年在该区域钻探的第一口滨海油气探井, 虽然没有油气显示, 但却真正开启了该区域油气勘探的序幕. 截至目前, 近50%钻井显示有油气, 且主要位于礼乐盆地和巴拉望盆地东北侧, 从而证实该区域有一定的油气勘探前景(孙龙涛等,

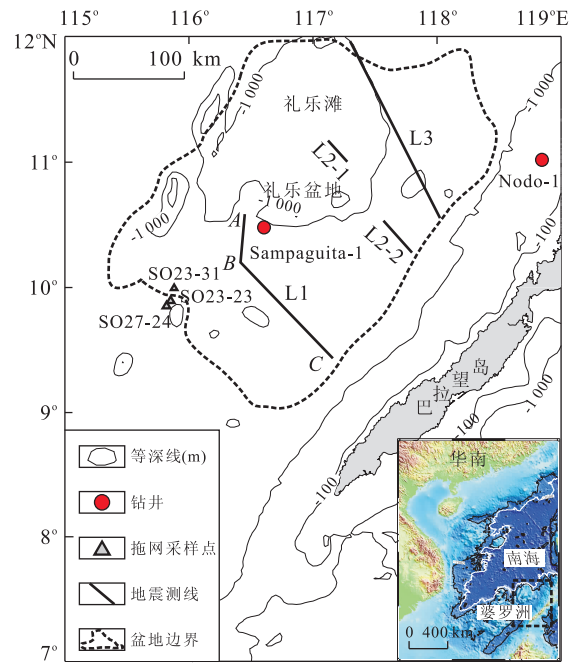


图 1 礼乐地块区域位置及地貌

Fig. 1 Map of the survey area and the location (solid box) of Liyue block

2010)。目前，菲律宾已加强对该区域的勘探力度。鉴于当前国际形势，我国很有必要加强对该区域的勘探与基础研究，为油气开发做准备。

相比于南海北部的地壳结构研究 (Nissen *et al.*, 1995; Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006)，南海南部区域研究程度相对较弱，主要限于对礼乐盆地及南沙区域的构造演化进行了探讨 (Taylor and Hayes, 1980, 1983; Holloway, 1982; Briaies *et al.*, 1993; Zhou *et al.*, 1995; Schluter *et al.*, 1996; 金庆焕和李唐根, 2000; 姚永坚等, 2002; Hutchison, 2004; Yan and Liu, 2004; 姚伯初等, 2004; 杨树春等, 2009)。笔者主要依据多道反射地震和重力数据来分析礼乐盆地地壳结构特征。多道反射地震剖面清晰地揭示了盆地浅部构造特征与样式，尤其是盆地沉积基底之上沉积层特征，而由于受地震波穿透能力限制，难以反映盆地深部地壳结构。参考地震资料，将重力数据进行反演，可以分析莫霍面深度变化，从而显示盆地的地壳结构。该研究成果对南海构造演化分析与南沙油气勘探均有重要参考意义。

1 区域背景

礼乐地块位于南沙海域东北边缘(图 1)，其主

体位于大陆坡上，面积 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，水深变化为 $0 \sim 2\,000 \text{ m}$ 之间。礼乐地块内礁、滩较为发育，海底地形起伏较大。地块北侧是中央海盆，东南侧为巴拉望海槽，西侧为郑和群礁，盆地整体受 NE-SW 向张性基底断裂所控制。

南海张裂之前，礼乐滩及巴拉望岛以西的大部分区域处于华南大陆边缘 (Holloway, 1982)，晚白垩纪一早渐新世阶段，南海北部陆缘受 SE 向拉张作用开始张裂，在古南海北部形成垒构造，在礼乐盆地和巴拉望区域的地震剖面中表现为半地堑张裂特征。依据磁条带分布，中渐新世南海海盆开始张开，礼乐地块随南沙地块向南运移 (Taylor and Hayes, 1980, 1983; Briaies *et al.*, 1993)；中中新世，巴拉望地块与菲律宾弧相碰，南海扩张停止，礼乐地块停止于现今位置，古南海在南沙和婆罗洲之间关闭消亡 (Clift *et al.*, 2008)。

2 数据来源

研究区范围为 $116^\circ \sim 119^\circ \text{E}$ 和 $9^\circ \sim 12^\circ \text{N}$ 之间区域。卫星自由空间重力异常和海底地形数据来自斯克里普斯 (Scripps) 海洋研究所 (<http://topex.ucsd.edu/>)，新生代沉积地层厚度和全球地貌数据 (ETOP01) 来自国际地球物理数据中心 (NGDC)。地震剖面 L1、L2-1 和 L2-2 由中国科学院南海海洋研究所“实验 2 号”调查船采集，L3 由广州海洋地质调查局“探宝号”调查船执行 2009 年“973 航次”采集。

3 构造与地层特征

多道反射地震剖面清晰地反映了基底之上地块的构造特征。依据地震剖面，礼乐地块地形地貌呈现三级台阶式，主要由 3 部分组成：礁区 ($0 \sim 100 \text{ m}$)、过渡区 ($100 \sim 500 \text{ m}$) 和深水区 ($500 \sim 1\,500 \text{ m}$)。

3.1 断裂

由地震剖面可见(图 2)，礼乐盆地发育多排北倾断层。以 T_0 层面为界，断裂分为上下两套断裂系统 (图 3)。下断裂系为张性正断裂，倾向 NW，断裂倾角约 50° ，断距较大，多为犁式或板状断层，局部呈多米诺骨牌式展布。该套断裂断穿新生代基底，上至 T_0 界面，由断裂两侧沉积地层厚度对比可见，中生代地层在断层两侧厚度几乎均等，而新生代早期沉积沿断裂

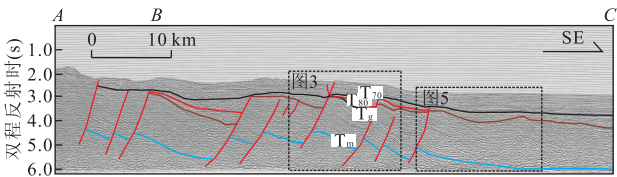


图 2 L1 测线地震剖面(位置见图 1)
Fig. 2 L1 seismic line in Liyue basin

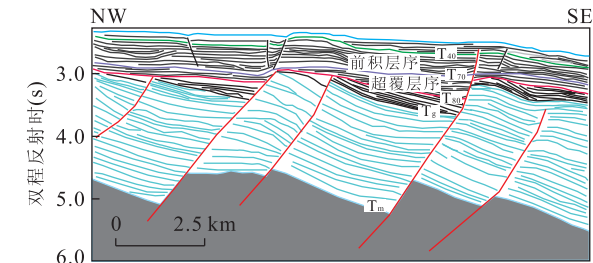


图 3 L1 测线半地堑段及解释剖面(位置见图 1 和图 2)
Fig. 3 Seismic section from L1 and interpretation in Liyue basin

呈楔形充填,所以可以认为下断裂系为新生代早期活动断层.下断裂系控制了礼乐盆地新生代早期的构造变形,形成一系列 NE 走向的半地堑.上断裂系处于 T_{70} 界面之上,倾角较陡,断距不大,对沉积的控制较弱,推测为后期局部沉积均衡沉降和菲律宾板块 NW 向仰冲在礼乐盆地的构造响应.

3.2 构造地层

由于研究区礁体发育,而且钻井资料较少,所以地层定年有一定难度.综合利用地震和生物地层证据来确定地层时间,并与文献中的地层时间表和拖网数据进行校正(Taylor and Hayes, 1980; Hinz and Schluter, 1985; Schluter *et al.*, 1996; Sales *et al.*, 1997; 张莉等, 2003; Yan and Liu, 2004).研究区主要确定了 5 个反射面,其中 T_{70} 和 T_g 是两个主要的区域性不整合面(图 4).

3.2.1 下构造层(中生代地层) L1、L2-1 和 L2-2 剖面中均发现中生代地层,主要表现为 2 种构造类型:宽缓背斜和翘倾断块.该套地层顶部已被剥蚀,与上覆 T_g 界面呈角度不整合.中生代地层分布有一定的区域性,L3 剖面中未发现中生代地层. L1 和 L2-2 剖面中,中生代地层沿 NE-SW 走向断裂翘倾旋转,形成半地堑,同时也为新生代沉积提供了空间(图 3,5),剖面中有多个宽缓褶皱构造,局部受下断裂系统影响,形成断背斜(图 6,7).由中生代地层的构造样式可知,礼乐盆地中生代地层首先受太平洋板块 NW 向俯冲的挤压作用,形成宽缓的挤压褶皱构造(Yan and Liu, 2004),局部遭受剥蚀,与上覆

地质年代		年龄 (Ma)	地震反 射界面	构造层	沉积环境	构造幕
第四纪		1.64				↑
上新世		5.2				稳定沉降
中新世	晚	10.4	~~~~~T ₃₂ ~~~~~	上构造层	内浅海相	↓
	中	16.3	~~~~~T ₄₀ ~~~~~			← 微板块碰撞
	早	23.3				海底扩张
渐新世	晚	30.0	~~~~~T ₇₀ ~~~~~		滨浅海相	↑ 南海运动
	早	35.4		中构造层		张裂(伸展)
始新世	晚	38.5	~~~~~T ₈₀ ~~~~~			
	中	50.5				
	早	56.5				
古新世	晚	61.0			滨海—河流 湖泊相	
	早	65.0	~~~~~T _g ~~~~~	← 礼乐运动		
早白垩纪 — 晚侏罗纪				下构造层	陆—内浅 海相	↑ 俯冲 ↓

图 4 礼乐地块地层年代及构造活动期次
Fig. 4 Stratigraphic sequence scheme of the Liyue block

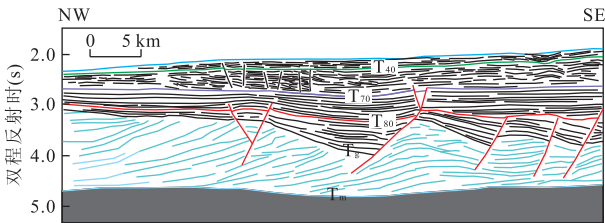


图 5 L2-2 地震测线的解释剖面(位置见图 1)
Fig. 5 Interpretation in Liyue basin of L2-2 seismic line

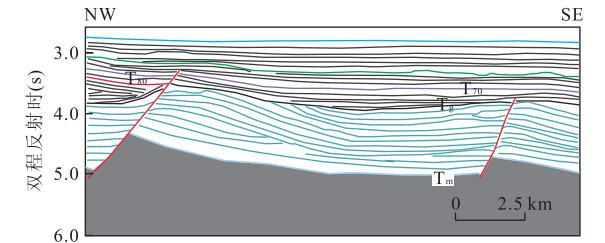


图 6 L1 测线宽缓褶皱段及解释剖面(位置见图 1 和图 2)
Fig. 6 Seismic section from L1 and interpretation in Liyue basin

地层形成角度不整合. 新生代初期受张裂作用影响,褶皱被错断,地层沿断裂发生旋转伸展,地块发生翘倾旋转,地层发生简单的剪切变形,局部背斜被断裂错断形成断背斜构造. 中生代地层厚度呈现自 SW 向 NE 减薄趋势, L1 剖面中厚度约 3~5 km,而在 L2-1 剖面中减为 2 km,在 L3 剖面中未发现该套地层.

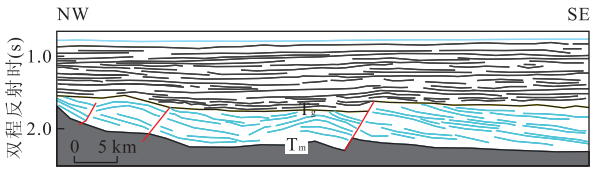


图 7 L2-1 地震测线的解释剖面(位置见图 1)
Fig. 7 Interpretation in Reed Bank of L2-1 seismic line

拖网、钻井所获得的岩石样品也可为该套地层的定年提供依据,根据 Kudrass *et al.* (1986) 和 Schluter *et al.* (1996) 的调查研究,在研究区拖网发现晚三叠世一早侏罗世砂泥岩(采样位置见图 1). 在西北巴拉望的钻井和露头中同样有中生代地层出现(Sales *et al.*, 1997),同时在礼乐盆地 Sampaguita-1 井钻遇的中生代地层与北巴拉望盆地的 Nodol-1 井(位置见图 1)的岩性相似,为近岸滨浅海碎屑岩沉积,含煤线及红色凝灰质火山岩,物源来自华南大陆(Sales *et al.*, 1997).

3.2.2 中构造层(张裂期地层) T_g-T_{70} 之间地层为张裂期沉积(图 4). 现有的钻井资料揭示(Sales *et al.*, 1997; 夏戡原和黄慈流, 2000),晚白垩世—晚古新世早期,礼乐盆地和西北巴拉望整体出露水面,未接受沉积,受拉张作用地块翘倾旋转,形成一系列 NE-SW 向半地堑(图 3, 5, 8),地层表现为楔形沉积充填特征. 自中—始新世全球海平面开始上升,至早渐新世达到顶峰(Haq *et al.*, 1987),沉积层也同步表现出明显的超覆现象(图 3).

该套地层在半地堑中自 SW 向 NE 增厚,地层厚度的变化也是断裂活动强度的反映. 在 L1 测线中(图 3),该套地层最大厚度约 750 m,断裂活动强度约为 25 m/Ma. 但在 L2-2 和 L3 测线中,断裂活动强度分别为 50 和 80 m/Ma,所以在礼乐地块张裂初期断裂活动强度自 SW 向 NE 增强,证实在盆地拉伸过程中,离张裂中心越近,断层活动越强.

在地震剖面中,该套地层在构造高点表现出明显的连续高振幅反射特征,为晚始新世至早中新世灰岩. 灰岩的区域性分布主要受 NE-SW 走向张性

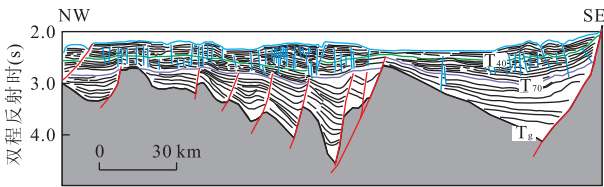


图 8 L3 地震测线的解释剖面(位置见图 1)
Fig. 8 Interpretation in Liyue basin of L3 seismic line

基底断裂所控制(Sales *et al.*, 1997; Williams, 1997). 碳酸盐岩构造主要发育于张裂期翘倾地块的顶部(Fournier *et al.*, 2005),碳酸盐岩是南沙微板块油气主要的储层. 在礼乐滩区域,张裂期沉积没有明显的张性构造特征,地震反射近平行与海底相平行,地层平均厚度约 1 km(图 7).

3.2.3 上构造层(裂后期地层) T_{70} 是礼乐地块分布范围最广的区域不整合面,其上地层以连续、低频、准平行反射结构为特征,未见明显张裂构造,所以可以认为 T_{70} 对应礼乐盆地的张裂活动停止期(孙龙涛等, 2008). T_{70} 之后南海海盆张开,礼乐地块整体向南漂移,盆地进入整体沉降阶段,其上海相地层广泛发育,形成披覆盖层沉积,局部在 T_{40} 界面拱起. 随南海海盆的扩张,礼乐地块从华南陆缘裂离向南漂移,最终定位于现今位置,以浅海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积序列为主,是碳酸盐岩储集层发育的有利时期.

16 Ma 弧陆碰撞(Hall, 2002),盆地漂移结束,进入区域沉降阶段. 局部区域拱起,并伴有小断层发育(图 3, 8),接受一套浅海—半深海砂、泥相和台地碳酸盐岩、生物礁相沉积,地层变形微弱(张莉等, 2003). 隆起区仍以碳酸盐岩和生物礁沉积为主,凹陷区则以碎屑岩沉积为主,盆地沉降与沉积速率相对缓慢.

4 重力反演

4.1 反演方法

4.1.1 布格校正 布格校正是法国大地测量学家布格提出的一种重力校正方法,它是从观测重力值中去掉测点水准面与海平面之间物质(中间层物质)的引力,然后再引入自由空间校正(Blakely, 1995). 布格重力异常校正公式为:

$$\delta_{gb} = 0.0419(\sigma - 1.03)H, \quad (1)$$

其中, δ_{gb} 为布格异常; σ 为地层密度 (2.67 g/cm^3); H 为海水深度(m).

4.1.2 Parker 法计算莫霍面深度 Parker 法是计算莫霍面深度的有效方法(Parker, 1973). 首先,运用小波转换分离区域和局部异常;然后,通过 6 阶小波逼近法计算可得到莫霍面深度. 张裂前和现在的地壳厚度可分别表示为:

$$H_p = H_m - H_w - H_s, \quad (2)$$

$$H_n = H_m - H_w, \quad (3)$$

其中, H_p 为古地壳厚度(km); H_m 为海面至莫霍面

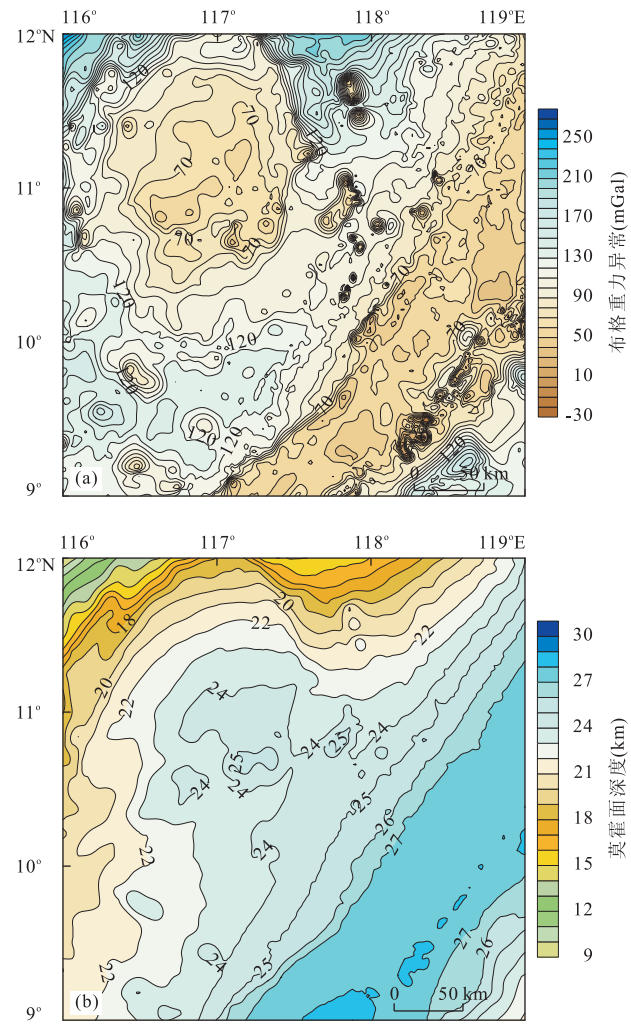


图 9 研究区布格重力异常(a)和莫霍面深度(b)(莫霍面深度是相对海底的深度)

Fig. 9 Computed Bouguer gravity anomaly (a) and MOHO depth (b)

深度(km); H_w 为海水深度(km); H_s 为新生代沉积厚度(km); H_n 为现在地壳厚度(km).

布格重力异常反映地壳内部物质密度的分布及不均匀性,与地壳厚度(即莫霍面深度)存在着很好的相关性.由于地壳的密度较小(一般 $2.6\sim 2.9\text{ g/cm}^3$),而地幔的密度较大($>3.3\text{ g/cm}^3$),所以,地壳越厚(莫霍面的深度越深),则布格重力异常值越小或负值越大;反之,地壳越薄(莫霍面深度越浅),则布格重力异常值越大.

4.1.3 2D 正反演方法 正反演方法可沿剖面约束地壳结构.笔者运用 Geosoft 软件 GM-SYS 模块沿 L1 地震剖面位置反演地壳结构. GM-SYS 可以考虑多种参数,处理不同类型的复杂几何体.为达到区域研究的目的,假设整个地壳分为 3 层,包括新生代沉积、中生代沉积和基底,并设置不同地层岩性参数,

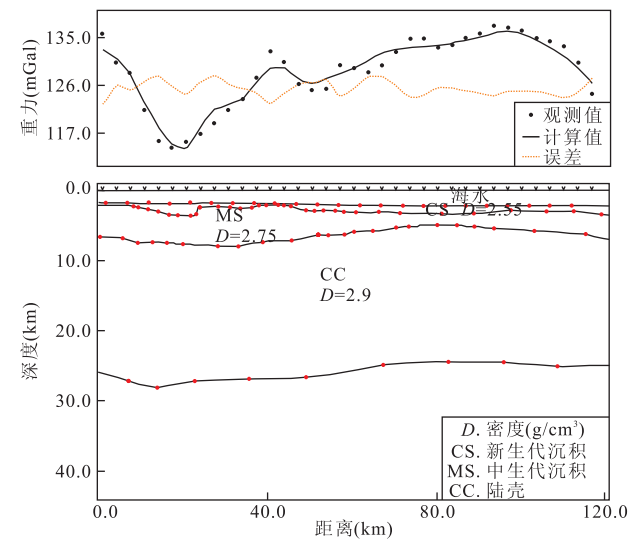


图 10 重力异常反演地壳结构图(位置为图 1 中 L1 测线 BC 段)

Fig. 10 Predicted structure of the profile L1 inverted from free air gravity anomaly

依据地震剖面解释结果建立初步地质构造模型,采用人机交互进行正反演模拟,最终确定最优的正反演地质构造模型.

4.2 模拟结果

- (1)研究区以正布格异常为主($60\sim 140\text{ mGal}$) (图 9a),等值线走向表现为 SW-NE 向.礼乐滩布格异常约 60 mGal ,明显低于南侧礼乐盆地 120 mGal .由此可以表明,礼乐滩地壳厚度明显大于礼乐盆地区域.
- (2)布格异常反演莫霍面深度,可见研究区构造主要呈 SW-NE 向展布(图 9b),莫霍面深度从巴拉望海槽的 27 km 变化至礼乐滩北侧洋陆过渡带的 16 km ,相比周边区域礼乐滩地壳厚度明显增厚,与姚伯初等(2006)的研究成果有相似的厚度变化趋势,但平均厚度差约 2 km ,推测与沉积层厚度选取有关.
- (3)地壳的伸展程度通常用拉伸因子 β 来衡量,拉伸因子是地壳伸展前厚度与伸展后厚度的比值.现今莫霍面深度剥除沉积物厚度即为残留地壳厚度,与平均地壳厚度(32 km)的比值为研究区拉伸因子.研究区古地壳厚度介于 $25\sim 16\text{ km}$ 之间,因而拉伸因子介于 $1.3\sim 2.0$,属于弱拉伸地壳.
- (4)L1 测线横穿礼乐地块,对该剖面进行二维地壳结构反演,可以清晰揭示盆地地壳结构(图 10).基底与莫霍面基本平行,莫霍面深度最大达 28 km ,中生代沉积较厚,最厚达 5 km .

5 讨论

5.1 裂前地块位置

在南海张开之前,礼乐地块处于华南陆缘(Taylor and Hayes, 1980; Holloway, 1982),但不能确定其准确位置.依据钻井和地震资料,认为在张裂前礼乐地块处于潮汕坳陷西南侧.潮汕坳陷 Mz-1-1 井已钻到海相中生代沉积(Li *et al.*, 2008),与礼乐地块 Sampaguita-1 井相类似.同时,在地震剖面中潮汕坳陷表现出与图 6 相类似的挤压背斜构造(郝沪军等, 2001).这些背斜构造可能是晚中生代古太平洋板块 NW 向俯冲所形成的相似的 NE-SW 向挤压构造带.

5.2 漂移期盆地断裂停止活动

Sampaguita-1 中的中—渐新世不整合面对应于 T_{70} (Taylor and Hayes, 1980),该不整合面所代表的是海底张裂的开始. T_{70} 不整合面具有双轴反射特征,可能与海平面变化相关.最大的海平面变化发生于晚渐新世(Haq *et al.*, 1987),全球性海退事件与发生于 29 Ma 的南极洲冰期相关.

在地震剖面中, T_{70} 之上基本没有断裂发育,所以可以认为礼乐地块内的张裂活动在南海张开(30 Ma)后停止. 30 Ma 之前,华南陆缘处于张裂状态,大断裂及张裂盆地发育,礼乐地块和潮汕坳陷之间区域有可能是张裂中心,因此礼乐地块中的断裂活动强度从 NE 向 SW 减弱.当南海破裂张开时,洋盆区域成为抗拉强度最弱区,也成为伸展应力的集中释放区.礼乐地块向南漂移,断裂活动基本停止.

6 结论

(1)礼乐地块以 T_{70} 不整合面为界发育两套断裂系统.下断裂系统主要发育于新生代早期,呈 NE-SW 走向,在礼乐滩区域发育弱,盆地区域发育相对强烈些,并控制了早期沉积充填与分布.上断裂系统处于 T_{70} 不整合面之上,主要为走滑断层,与晚期菲律宾海板块的 NW 向挤压相关.

(2) T_{70} 和 T_g 是研究区 2 个主要的不整合面,将整个地层分为 3 套地震构造层序.下构造层为中生代地层,地层厚度自 SW 向 NE 减薄.中构造层为新生代早期张裂沉积地层,地层分布受大型张裂断裂所控制;地层厚度自 SW 向 NE 增厚,表明新生代早期断裂活动强度自 SW 向 NE 增强.上构造层为裂

后期沉积,沉积地层产状较平,地层内部基本没有明显变形,碳酸盐岩是该套地层的主要组成.

(3)礼乐地块以正布格重力异常为主要特征(60~140 mGal).依据重力数据反演,莫霍面深度介于 18~27 km 之间,地壳拉伸因子介于 1.3~2.0,属于减薄型大陆地壳.

致谢:感谢李家彪研究员、丘学林研究员和阎贫研究员提供的地震反射剖面!

References

- Blakley, J., 1995. Potential theory in gravity and magnetics applications. Cambridge University Press, New York.
- Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and sea-floor spreading in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast-Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98 (B4): 6299 — 6328. doi: 10.1029/92JB02280
- Clift, P., Lee, G. H., Duc, N. A., et al., 2008. Seismic reflection evidence for a dangerous grounds miniplate; no extrusion origin for the South China Sea. *Tectonics*, 27 (3): 1—16. doi:10.1029/2007TC002216
- Fournier, F., Borgomano, J., Montaggioni, L. F., 2005. Development patterns and controlling factors of Tertiary carbonate buildups: insights from high-resolution 3D seismic and well data in the Malampaya gas field (Offshore Palawan, Philippines). *Sedimentary Geology*, 175(1—4): 189—215. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.01.009
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 (4): 353 — 431. doi: 10.1016/S1367—9120(01)00069—4
- Hao, H. J., Lin, H. M., Yang, M. X., et al., 2001. The Mesozoic in Chaoshan depression: a new domain of petroleum exploration. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15 (3): 157 — 163 (in Chinese with English abstract).
- Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic. *Science*, 235 (4793): 1156—1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156
- Hinz, K., Schluter, H. U., 1985. Geology of the dangerous grounds, South China Sea, and the continental margin off Southwest Palawan: results of SONNE cruises SO-23 and SO-27. *Energy*, 10 (3—4): 297 — 315. doi: 10.1016/0360—5442(85)90048—9
- Holloway, N. H., 1982. North Palawan block, Philippines: its

- relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *AAPG Bulletin*, 66(9): 1355—1383. doi: 10. 1306/03B5A7A5 - 16D1 - 11D7 - 8645000102C1865D
- Hutchison, C. S. , 2004. Marginal basin evolution: the southern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21(9): 1129—1148. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2004. 07. 002
- Jin, Q. H. , Li, T. G. , 2000. Regional geologic tectonics of the Nansha Sea area. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Kudrass, H. R. , Wiedicke, M. , Cepeck, P. , et al. , 1986. Mesozoic and Cenozoic rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea and their significance for plate-tectonic reconstructions. *Marine and Petroleum Geology*, 3(1): 19—30. doi: 10. 1016/0264—8172(86)90053—X
- Li, C. F. , Zhou, Z. Y. , Hao, H. J. , et al. , 2008. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeastern South China Sea continental margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4—6): 546—561. doi: 10. 1016/j. jseas. 2007. 09. 004
- Nissen, S. S. , Hayes, D. E. , Yao, B. C. , et al. , 1995. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B11): 22447—22483. doi: 10. 1029/95JB01868
- Parker, R. L. , 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4): 447—455. doi: 10. 1111/j. 1365—246x. 1973. tb06513. x
- Sales, A. O. , Jacobsen, E. C. , Morado, A. A. , et al. , 1997. The petroleum potential of deep-water Northwest Palawan block GSEC 66. *Journal of Asian Earth Science*, 15(2—3): 217—240. doi: 10. 1016/S0743—9547(97)00009—3
- Schluter, H. U. , Hinz, K. , Block, M. , 1996. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea. *Marine Geology*, 130(1—2): 39—78. doi: 10. 1016/0025—3227(95)00137—9
- Sun, L. T. , Sun, Z. , Zhan, W. H. , et al. , 2010. Petroleum potential prediction of the Lile basin in Nansha. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(1): 137—145 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L. T. , Sun, Z. , Zhou, D. , et al. , 2008. Stratigraphic and structural characteristics of Lile basin in Nansha area. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(2): 151—158 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B. , Hayes, D. E. , 1980. The tectonic evolution of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E. , ed. , The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian Seas and islands. Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C. , 23: 89—104.
- Taylor, B. , Hayes, D. E. , 1983. Origin and history of the South China basin. In: Hayes, D. E. , ed. , The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands Part 2. Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C. , 27: 23—56.
- 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
- Williams, H. H. , 1997. Play concepts-Northwest Palawan, Philippines. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(2—3): 251—73. doi: 10. 1016/S0743—9547(97)00011—1
- 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 with English abstract).
- Yan, P. , Liu, H. L. , 2004. Tectonic-stratigraphic division and blind fold structures in Nansha Waters, South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(3): 337—348. doi: 10. 1016/S0040—1951(01)00062—2
- 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, S. C. , Tong, Z. G. , Hao, J. R. , et al. , 2009. Tectono-thermal modeling of Lile basin, southern South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 359—364 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , Wan, L. , Liu, Z. H. , 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. , Wan, L. , Zeng, W. J. , 2006. 3-D lithosphere structures and evolution of the South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yao, Y. J. , Jiang, Y. K. , Zeng, X. H. , 2002. Cenozoic tectonic movements in Nansha area, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 16(2): 113—118 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. , Li, W. C. , Zeng, X. H. , 2003. Stratigraphic sequence and hydrocarbon potential in Lile basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 25(5): 69—573 (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

郝沪军,林鹤鸣,杨梦雄,等,2001. 潮汕坳陷中生界——油气勘探的新领域. *中国海上油气(地质)*, 15 (3): 157—163.

金庆焕,李唐根,2000. 南沙海域区域地质构造. *海洋地质与第四纪地质*, 20(1):1—8.

孙龙涛,孙珍,詹文欢,等,2010. 南沙海域礼乐盆地油气资源潜力. *地球科学——中国地质大学学报*, 35 (1): 137—145.

孙龙涛,孙珍,周蒂,等,2008. 南沙海区礼乐盆地沉积地层与

构造特征分析. *大地构造与成矿学*, 32(2):151—158.

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.

杨树春,全志刚,郝建荣,等,2009. 南海南部礼乐盆地构造热演化研究. *大地构造与成矿学*, 33(3):359—364.

姚伯初,万玲,刘振湖,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,万玲,曾维军,2006. 南中国海岩石圈三维结构与演化. 北京:地质出版社.

姚永坚,姜玉坤,曾祥辉,2002. 南沙海域新生代构造运动特征. *中国海上油气(地质)*, 16(2):113—118.

张莉,李文成,曾祥辉,2003. 礼乐盆地地层发育特征及其与油气的关系. *石油实验地质*, 25(5):469—573.