

# 基于重震联合反演的琼东南盆地岩石圈 密度结构和非均一伸展模式研究

李朝阳<sup>1,2</sup>, 徐 乔<sup>2</sup>, 胡 毅<sup>1</sup>, 曹淑鑫<sup>2</sup>, 刘洪芹<sup>2</sup>, 韩同举<sup>2</sup>, 赵俐红<sup>1,2</sup>, 葛佳裕<sup>2</sup>

(1. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 福建 厦门 361005;

2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**重震联合反演密度结构可以提供更多的岩石圈深部热动力学信息。本研究以琼东南盆地 3 条多道地震骨干剖面为约束, 采用重力异常数据反演岩石圈密度结构, 探究琼东南盆地岩石圈非均一伸展的深部成因机制。研究结果显示, 琼东南盆地普遍受控于深部地幔上隆底侵, 特别是西部乐东凹陷和东部宝岛凹陷两大强烈减薄区, 上地幔、下地壳均表现出异于正常岩石圈的高密度值, 分别为  $2.92\sim 2.96\text{ g/cm}^3$  和  $3.30\sim 3.40\text{ g/cm}^3$ 。不同于琼东南盆地东部宝岛凹陷, 西部乐东凹陷的高密度异常体范围更为广泛, 甚至在上地壳底部也有高密度异常体分布, 局部密度值达  $2.82\sim 2.90\text{ g/cm}^3$ 。然而, 盆地裂陷期末的高热流中心、地壳减薄中心和高密度异常中心, 三者并非完全重合, 且东部宝岛凹陷非均一程度更高。综合分析发现, 琼东南盆地不仅存在东、西部伸展差异, 自深部至浅部的热动力控制模式也是非均一的。本研究成果为进一步约束南海西北部陆缘伸展演化模式提供了数据基础。

**关键词:**重震联合反演; 岩石圈密度结构; 非均一伸展; 高密度异常

中图分类号: P313.2

文献标志码: A

## Lithospheric density structure and non-uniform extension patterns in Qiongdongnan Basin based on gravity-seismic joint inversion

LI Chaoyang<sup>1,2</sup>, XU Qiao<sup>2</sup>, HU Yi<sup>1</sup>, CAO Shuxin<sup>2</sup>, LIU Hongqin<sup>2</sup>,  
HAN Tongju<sup>2</sup>, ZHAO Lihong<sup>1,2</sup>, GE Jiayu<sup>2</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China;

2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Gravity-seismic inversion of density structures provides more information on deep lithospheric thermo-mechanical processes. This study employs gravity anomaly data, constrained by three multichannel seismic profiles across Qiongdongnan Basin, to invert the lithospheric density structure and investigate the deep-seated genetic mechanisms of non-uniform extension within the basin. The results reveal that Qiongdongnan Basin is generally controlled by deep mantle upwelling and underplating. Particularly in the intensely thinned Ledong Sag in the west and Baodao Sag in the east, the upper mantle and lower crust exhibit anomalously high densities of  $2.92\sim 2.96\text{ g/cm}^3$  and  $3.30\sim 3.40\text{ g/cm}^3$  respectively, which deviate from normative lithospheric values. Compared to Baodao Sag in the east, Ledong Sag in the west displays more extensive high-density anomalies, with anomalous bodies distributed even at the base of the upper crust, where local densities reach  $2.82\sim 2.90\text{ g/cm}^3$ .

收稿日期: 2025-07-09

基金项目: 福建省海洋物理与地质过程重点实验室开放基金课题(KLMPG-23-02); 国家自然科学基金项目(42406077); 山东省自然科学基金项目(ZR2022QD087)

作者简介: 李朝阳(1990—), 男, 山东青岛人, 讲师, 博士, 主要从事构造地球物理研究。

胡 毅(1976—), 男, 福建厦门人, 正高级工程师, 博士, 主要从事海洋地球物理研究, 本文通信作者。

E-mail: huyi@tio.org.cn

However, the high thermal flow center, the crustal thinning center, and high-density anomaly center during the late rifting stage are not completely coincident. Baodao Sag in the east demonstrates higher degree of non-uniformity. A comprehensive analysis finds that Qiongdongnan Basin exhibits not only differences in extension between the eastern and western regions but also non-uniform thermo-mechanical controls from the deep mantle to shallow crustal levels. This study provides a data basis for further constraining the extensional evolution models of the continental margin of the northwestern South China Sea.

**Key words:** gravity-seismic joint inversion; lithospheric density structure; non-uniform extension; high density anomalies

南海是西太平洋地区面积最大的边缘海,夹持于太平洋构造域和印度洋构造域两大超级汇聚带之间,四周被多个俯冲系统围限,热力学和动力学过程尤为复杂多变,其非均一伸展破裂机制一直是地学界争论的焦点<sup>[1]</sup>。随着古太平洋板块俯冲后撤,在古南海南向俯冲的驱动下,南海海盆由东向西呈非对称递进式扩张,形成了南海周缘一系列伸展程度不一的陆缘裂陷盆地,完整保存了岩石圈非均一破裂过程的关键信息<sup>[2-3]</sup>。琼东南盆地处于东、西两大构造域的关键衔接区,也是南海北部拉张型陆缘和西部剪切型陆缘的构造转换区,在红河断裂带左旋走滑和西北次海盆 S-N 向拉张两大应力系统的共同控制下,尤其是在早渐新世区域拉伸应力场的影响下,盆地断裂系统横向空间差异越发明显,岩石圈物理性质也逐渐呈非均一化,塑造了盆地差异显著的“东西分块”构造格局(图 1)<sup>[4]</sup>。因此,琼东南盆地是探究南海西北部非均一伸展破裂过程的极佳区域。

近年来,学者们围绕琼东南盆地东、西部差异性构造形变,依据多道地震资料和物理模拟实验,结合伸展因子计算,认为深部地幔热上涌对琼东南盆地岩石圈非均一伸展具有控制作用<sup>[5]</sup>。然而,相比于南海东北部广泛分布的下地壳高速体,南海西北部的琼东南盆地岩浆活动相对较少,凭借丰富的多道地震剖面难以找到裂陷期岩浆活动的确切证据<sup>[6]</sup>。此外,现有海底地震仪(ocean bottom seismograph, OBS)剖面等资料尚未发现明显的高速异常,无法定量给出琼东南盆地裂陷期岩石圈非均一伸展的深部热力学特征,限制了南海西北部陆缘张裂理论的完善和发展<sup>[7]</sup>。岩石圈密度结构作为陆缘非均一张裂过程的关键参数,是外在热力学物理条件的综合体现,其垂向分层和横向变化不仅能反映深部物质组成、热状态及部分熔融程度,还能制约岩石圈脆-韧性变形耦合模式,是认识岩石圈非均一伸展破裂内在机制的重要参数<sup>[8]</sup>。

综上所述,受限于地球物理观测资料的丰度和精度,现有地震探测数据难以在南海西北部弱岩浆背景下,有效识别深部岩浆活动的强度。因此,本研究拟利用地震数据在已构建的沉积断裂框架基础上,进一步反演岩石圈密度结构,通过重力数据进一步挖掘深部岩浆活动信息,为琼东南盆地非均一伸展研究提供新的约束。

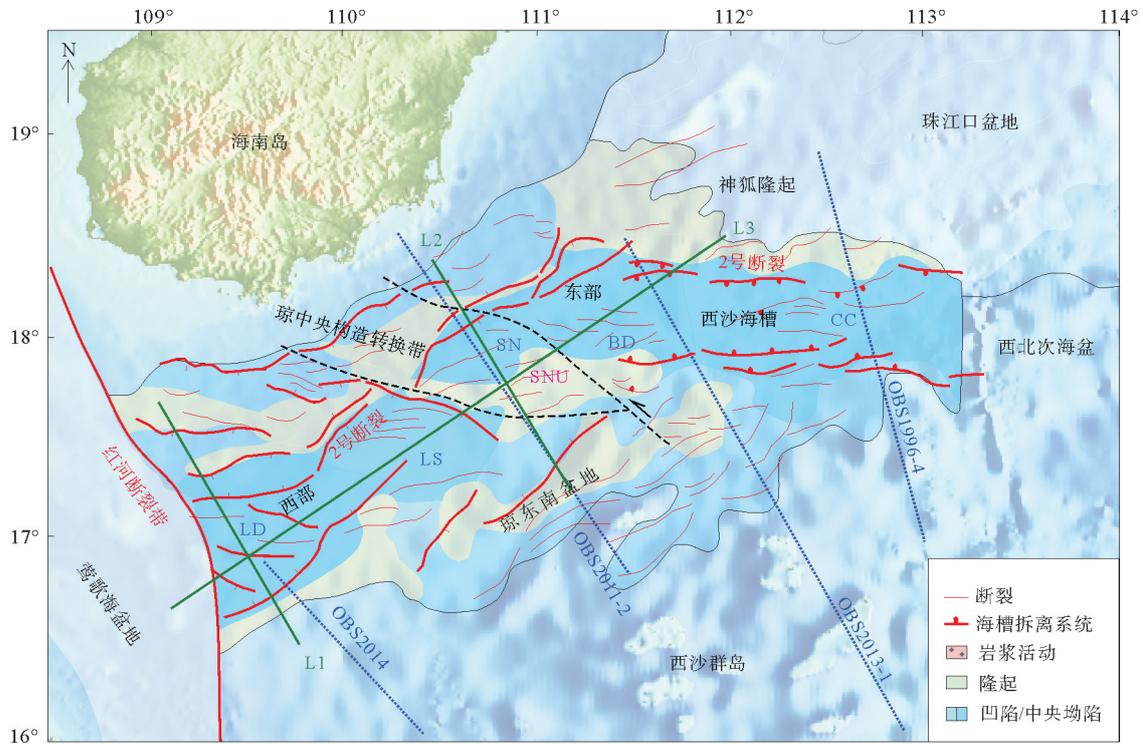
## 1 地质背景

琼东南盆地位于南海北部陆缘的西端,呈 NE 向延伸,南北夹持于海南岛与西沙群岛之间,西以红河断裂带与莺歌海盆地相接,东经西沙海槽与西北次海盆相通(图 1)。南海周边被多个俯冲系统围陷,大量俯冲物质在南海北部形成大范围地幔上涌区,加之古南海俯冲板片的部分熔融,丰富的岩浆来源影响了南海北部伸展破裂的热力学过程<sup>[9]</sup>。然而,不同于南海东北部陆缘广泛分布的下地壳底侵,琼东南盆地裂陷期岩浆活动较弱,至今仍缺乏下地壳高速体的确切证据,但在地幔上隆的形态上显示,盆地东部的深部热异常强于西部<sup>[5,10-12]</sup>。

琼东南盆地自白垩纪至新生代早期经历了多幕式裂陷,在印支板块侧向挤压和南海海盆扩张的双重作用下,SEE 向和 SN 向应力场几经更迭,加之盆地中部松南隆起和东部异常薄弱带等先存构造的控制作用,奠定了琼东南盆地“东西分块”的构造格局<sup>[13-14]</sup>。琼东南盆地西部整体形态极不对称,受到西缘红河断裂带左旋走滑的影响,表现为一系列倾向 SE 的高角度正断层,剩余地壳厚度仅为 4~5 km,且少见断层深入下地壳,多汇聚于上-下地壳边界,表现为典型的壳内拆离(图 1、图 2)。而盆地东部主体为 EW 向展布的西沙海槽,向东过渡为具有洋壳性质的西北次海盆,并受到 SN 向扩张的影响,岩石圈极度拉伸接近完全破裂<sup>[11,15]</sup>。西沙海槽形态较为对称,在双向大型铲状拆离断层的控制下,局部剩余地壳厚度甚至接

近 0, 下地壳几乎与沉积层直接接触, 仅保留了少量韧性形变的强地震反射证据, 极度接近壳幔拆离。

综上, 琼东南盆地形态存在显著的东、西部差异, 断层拆离深度也各有不同, 但其裂陷期深部岩浆活动规律及差异未知, 缺乏定量化描述的技术手段。基于此, 本研究以琼东南盆地 3 条多道地震骨干剖面为约束, 采用重力异常数据反演岩石圈密度结构, 重点解析下地壳与上地幔高密度异常体的成因机制, 以期为探究琼东南盆地岩石圈非均一伸展成因机制提供理论参考。



LD—乐东凹陷; LS—陵水凹陷; SN—松南凹陷; BD—宝岛凹陷; CC—长昌凹陷; SNU—松南隆起;  
绿色实线为多道地震剖面; 蓝色虚线为 OBS 速度结构剖面

图 1 琼东南盆地构造图

Fig. 1 Structural map of Qiongdongnan Basin

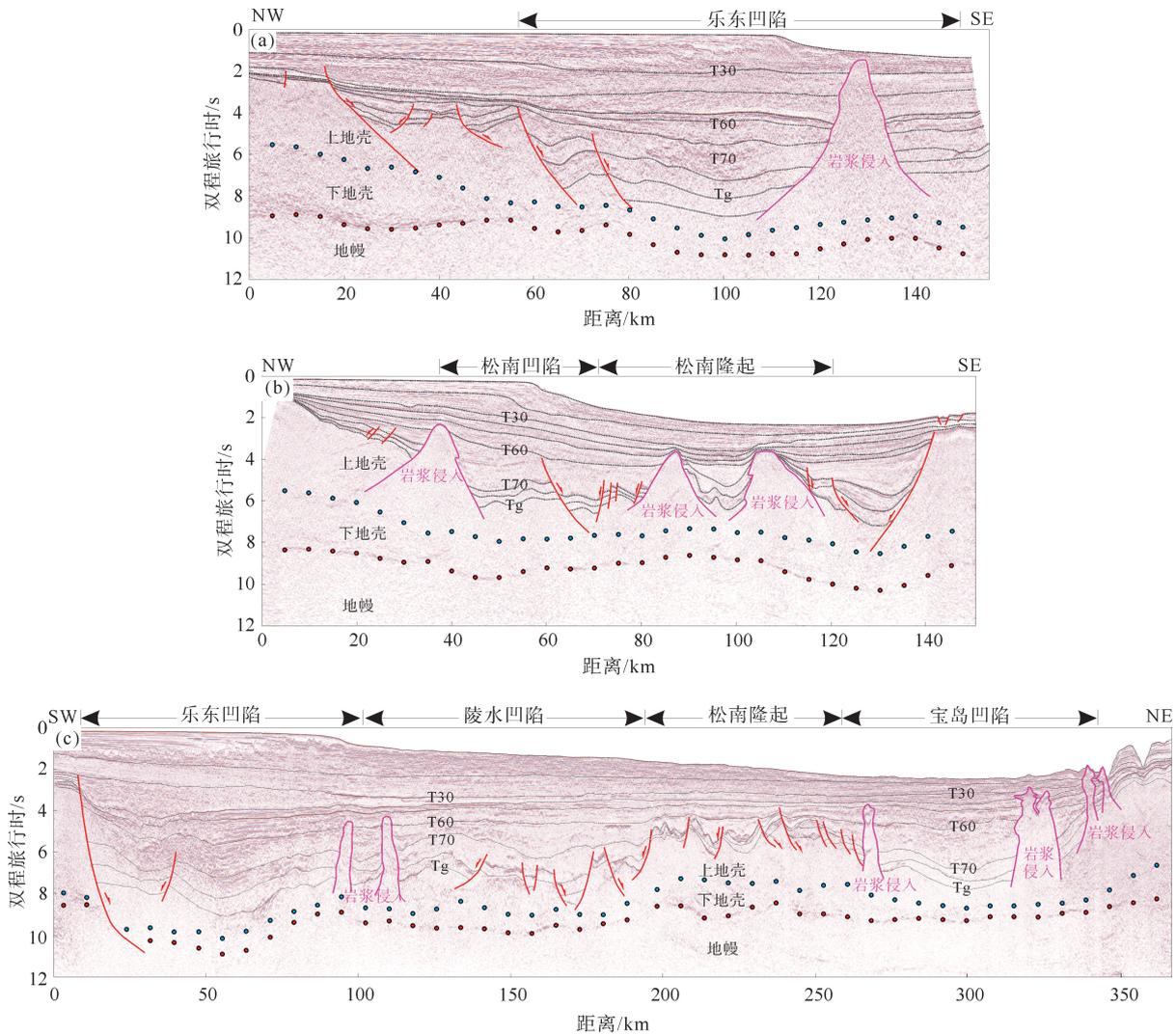
## 2 数据与方法

本研究以布格重力异常数据为基础, 在 3 条多道地震反射剖面和相邻 OBS 速度结构剖面的约束下, 参考速度-密度转换经验公式, 引入多边形棱柱体正演计算模型, 采用人工蜂群智能优化算法计算最优解, 反演得到地壳和上地幔的密度结构。

### 2.1 数据

本研究的布格重力异常数据采用 Sandwell 等<sup>[16]</sup>提出的 V32.1 全球卫星重力模型 CryoSat-2 和 Jason-1 卫星数据, 空间分辨率为  $1.0' \times 1.0'$ , 获取琼东南盆地 3 条关键多道地震反射剖面。由剖面数据显示(图 2), 纵波自地面向下传播, 到达深部后返回地面, 在 4~6 s 穿过上地壳, 6~8 s 穿过下地壳, 8~9 s 到达并穿过莫霍面, 整个双程旅行时为 12 s, 采样率为 2 ms。为提升数据质量, 采用最小二乘约束反演 Fadon 变换多次波压制技术。反演迭代过程中, 根据前一次迭代结果, 利用贝叶斯原理更新加权矩阵, 求解加权矩阵方程得到频率域的稀疏解。处理后的数据成像保真度提升, 频带展宽 10 Hz, 地震剖面信噪比明显提高。沉积层主频达 80 Hz, 带宽 6~160 Hz, 信噪比为 18 dB, 可清晰识别浅层结构。虽然深部地壳信号受低频吸收衰减影响, 带宽降至 6~45 Hz, 信噪比低至 12 dB, 导致部分结构模糊, 但仍能清晰地识别包括莫霍面在内的完整地壳结构, 为重震联合反演提供了重要的结构约束。测线 L1 位于琼东南盆地西部, 横跨整个乐东凹陷, 总长 160 km。测线 L2 位于琼东南盆地中部琼中央构造转换带附近, 北起松西凹

陷,南抵北礁凹陷,贯穿松南凹陷,总长 156 km。测线 L3 呈 SW-NE 向展布,覆盖了宝岛凹陷、松南凹陷、陵水凹陷及乐东凹陷,是横穿盆地东西部的关键剖面,总长 370 km(图 2)。



(a) 琼东南盆地西部 L1 测线;(b) 琼东南盆地东部 L2 测线;(c) 贯穿琼东南盆地东西部 L3 测线;  
蓝色圆点和红色圆点分别代表上下地壳的分界面

图 2 多道地震剖面解释图

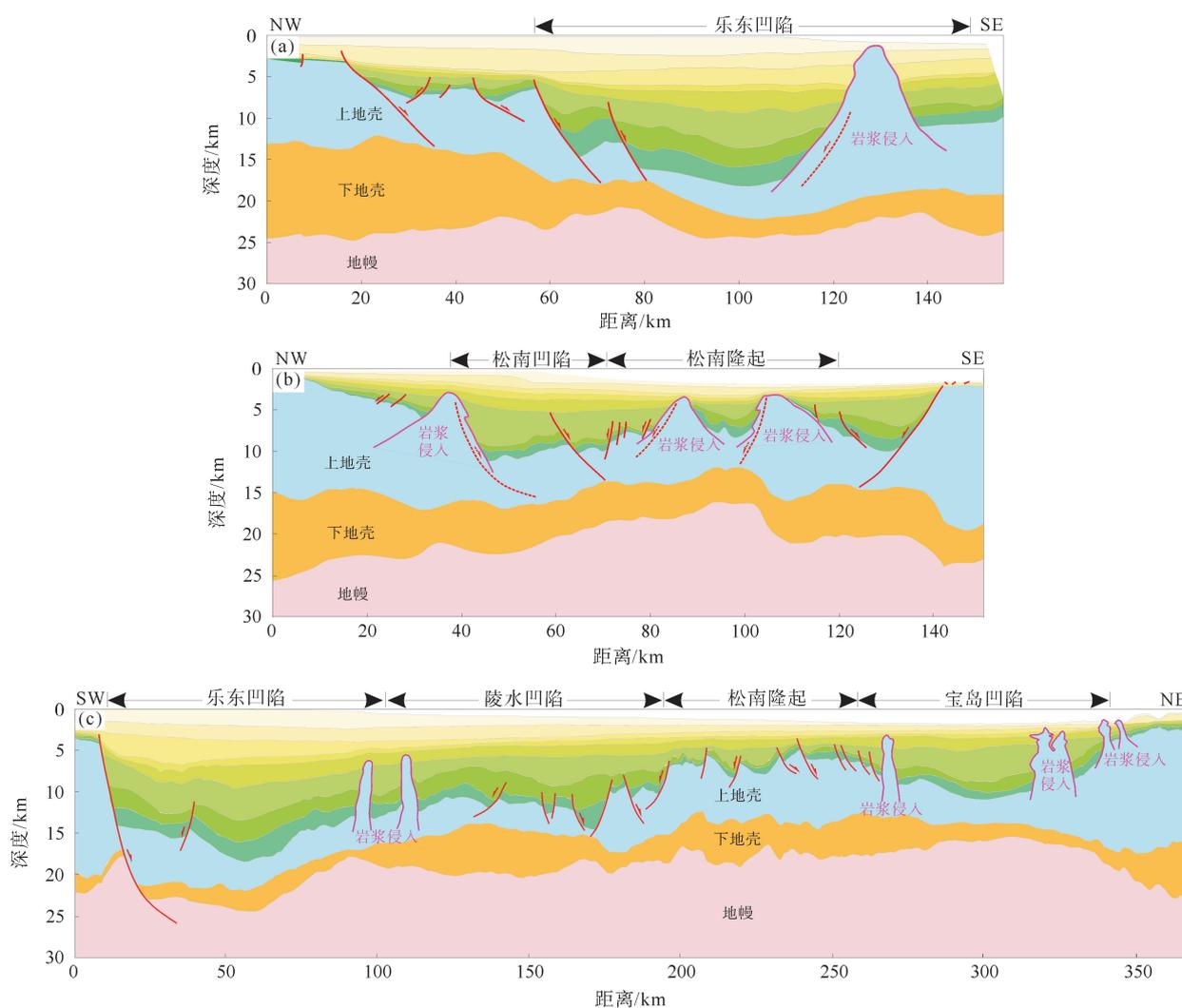
Fig. 2 Interpretation diagram of multichannel seismic profiles

### 2.2 密度模型建立

本研究综合多道地震反射剖面和邻近 OBS 剖面,识别上下地壳分界面和莫霍面,建立包括海水层、沉积层、上地壳、下地壳和上地幔的五层精细化地质模型(图 3 和表 1),并进一步识别多个岩浆侵入体,作为密度反演的结构性约束。前人<sup>[17]</sup>根据全盆地钻井数据,总结出适应全盆地的幂函数时深转换关系,海水层、沉积层和地壳层深度的计算式如下:

$$\begin{cases} D_1 = 1\,500 \times \frac{T_1}{2}, \\ D_2 = [924.2 \times (T_2 - T_1)^{1.368} + 103.5] \times 0.001 + D_1, \\ D_3 = \frac{6.5 \times (T_3 - T_2)}{2} + D_2. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  为各层双程反射时间,s; $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别为海水层、沉积层、地壳层的深度,m。



(a) L1 测线;(b) L2 测线;(c) L3 测线;具体位置见图 1

图 3 时深转换后的多道地震剖面解释图

Fig. 3 Interpretation of time-depth conversion multichannel seismic profiles

表 1 初始密度模型

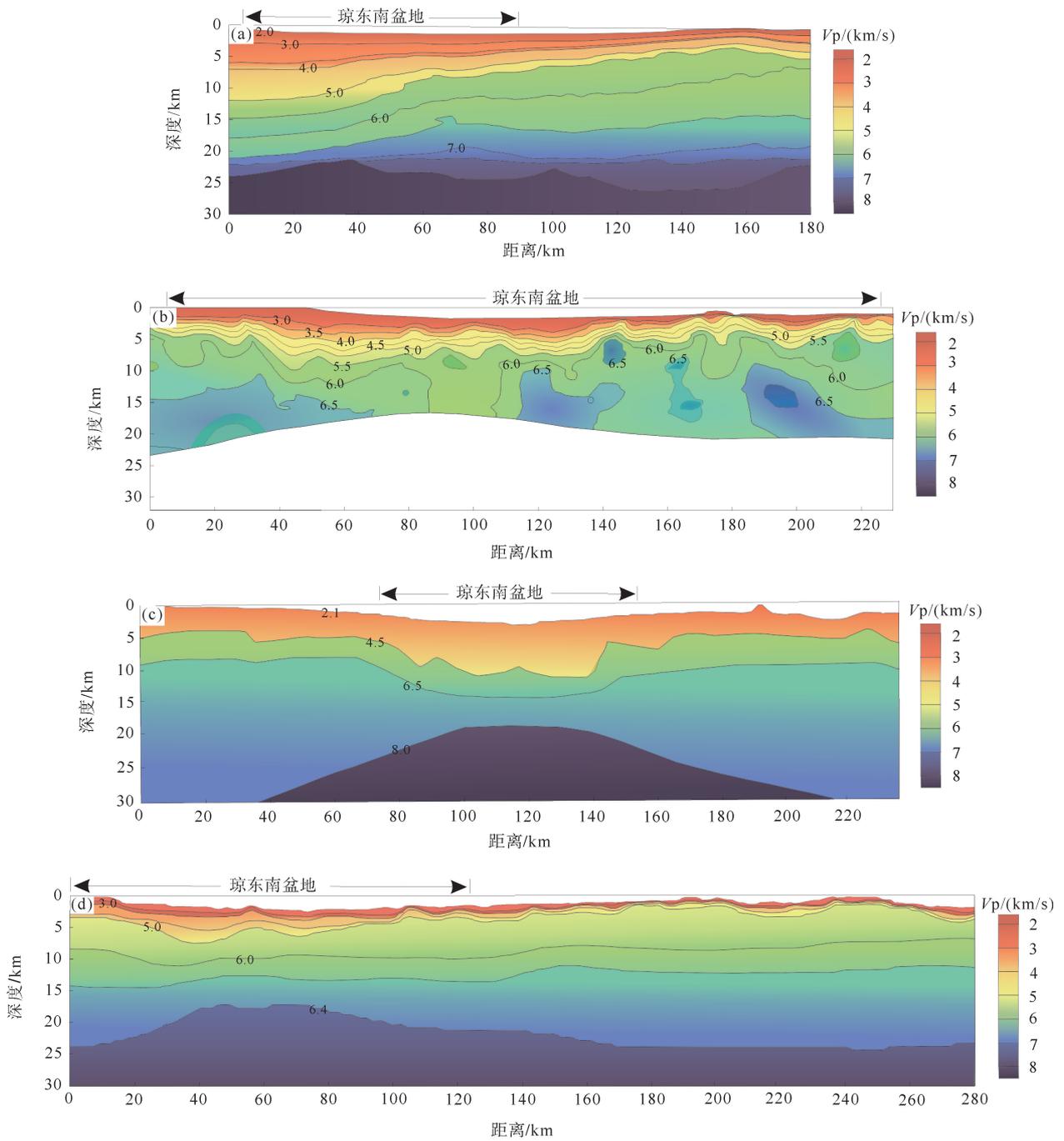
Table 1 Initial density model

分层	海水	沉积层	上地壳	下地壳	地幔
参考速度/(m/s)	1.50	1.70~4.70	5.20~6.30	6.40~7.00	7.60~8.60
初始密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.03 2.67(布格矫正)	2.20~2.60	2.60~2.78	2.80~2.96	3.00~3.40

在地震剖面解释的基础上,结合 OBS-2014、OBS2011-2、OBS2013-1 和 OBS1996-4 测线的 P 波速度数据<sup>[10-11,18-19]</sup>(图 4),依据 Karplus 等<sup>[20]</sup>提出的速度-密度关系,建立初始密度模型(表 1),该速度-密度转换方法已在其他区域成功应用,能将 P 波速度有效转化为密度,且应用范围覆盖了沉积岩、变质岩和岩浆岩,可为重震联合反演提供良好的约束。

$$\rho = 1.661 2V_p - 0.472 1V_p^2 + 0.067 1V_p^3 - 0.004 3V_p^4 + 0.000 106V_p^5 \quad (2)$$

式中: $\rho$  为密度, g/cm<sup>3</sup>;  $V_p$  为 P 波速度, m/s。



(a) OBS-2014 测线<sup>[18]</sup>; (b) OBS2011-2 测线<sup>[19]</sup>; (c) OBS1996-4 测线<sup>[10]</sup>; (d) OBS2013-1 测线<sup>[11]</sup>; 具体位置见图 1

图 4 OBS 测线速度剖面图

Fig. 4 OBS velocity profiles along the lines

### 2.3 密度模型正演

由于地质构造十分复杂,为了更真实地刻画地质异常体的形态,引入多边形棱柱体的重力异常计算式<sup>[21]</sup>。采用多边形棱柱理论<sup>[22]</sup>(图 5),将原点处的布格异常写为:

$$\Delta g_{(0)} = 2G\rho \sum_{i=1}^N \omega_i (S \times D_{LRY} - C \times D_{ATY}) + C(Y \times D_{LRU}) ; \quad (3)$$

$$\begin{cases}
 D_{\text{LRY}} = \ln\left(\frac{R_{20} + Y}{R_{10} + Y} \times \frac{R_1}{R_2}\right), \\
 D_{\text{LRU}} = \ln\left(\frac{R_{20} + u_2}{R_{10} + u_1}\right), \\
 D_{\text{ATY}} = \tan^{-1} \frac{u_2 \times Y}{\omega_2 \times R_{20}} - \tan^{-1} \frac{u_1 \times Y}{\omega_1 \times R_{10}}, \\
 u_1 = C \cdot x_1 + S \cdot z_1, \\
 u_2 = C \cdot x_2 + S \cdot z_2, \\
 \omega_1 = -S \cdot x_1 + C \cdot z_1, \\
 S = \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}, \\
 C = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}.
 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $G$  为重力常数, $\rho$  为密度差, $N$  为多边形节点, $Y=0.5 \times (Y_1 + Y_2)$ , $x_1, x_2, z_1$  和  $z_2$  为  $(x, y, z)$  坐标系中的角点坐标, $u_1, u_2, \omega_1$  和  $\omega_2$  为新坐标系中多边形棱镜的角点坐标。对于 2.5 维的情况, $D_{\text{LRY}}$  和  $D_{\text{LRU}}$  采用顶点的  $(x, z)$  或  $(u, \omega)$  坐标表示径向距离的微分对数; $D_{\text{ATY}}$  是微分反正切。 $R_{ij}^2 = R_i^2 + Y_j^2$ ,  $R_{20}^2 = R_2^2 + Y_0^2$ ,  $R_{10}^2 = R_1^2 + Y_0^2$  ( $Y_0=O$ ); $R_2$  是从点  $(x_2, O, z_2)$  到坐标原点  $O$  的距离; $R_1$  是点  $(x_1, O, z_1)$  到坐标原点  $O$  的距离, $S$  和  $C$  为点  $(x_2, y_1, z_2)$  和  $(x_1, y_1, z_1)$  之间的直线斜率,作为坐标系的转换系数。

### 2.4 密度模型反演

利用已知某一剖面的重力异常值,反演其下方地质构造的过程是一个求最优化问题解的过程,即寻找一组界面深度或形态已经确定情况下的剩余密度值构成的解,使得对应的重力异常值最大程度地接近实测的重力异常值。而地下地质构造复杂多变,其密度在横向上也复杂多变。因此,综合多道地震反射剖面 and 邻近 OBS 剖面,建立包括海水层、沉积层、上地壳、下地壳和上地幔的精细化地质模型,以约束界面的深度或形态(表 1)。

本研究引入人工蜂群算法求解重力密度反演问题,基于先验地质模型与物性约束条件,将区域密度分布重构为带边界限制的全局优化命题,即利用人工蜂群算法寻找区域内的密度最优解,从而在重力反演中实现复杂密度结构的高效全局优化。人工蜂群算法通过模拟蜂群采蜜行为,以地壳密度分布为优化目标,将初始密度模型迭代优化至与实测重力异常的高度匹配。通过雇佣蜂、跟随蜂与侦查蜂协作机制动态搜索最优解,其中雇佣蜂生成初始密度模型并根据适应度探索邻域解,适应度即目标函数  $f(x)$ ,由重力数据均方根误差进行量化,跟随蜂基于概率选择机制,对优质解进行深度优化。假设某一剖面共有  $M$  个重力观测点且均匀分布,设第  $i$  个观测点产生的重力异常值为  $g_{i \text{ 观测}}$ ,拟合的重力异常值为  $g_{i \text{ 拟合}}$ ,则可把目

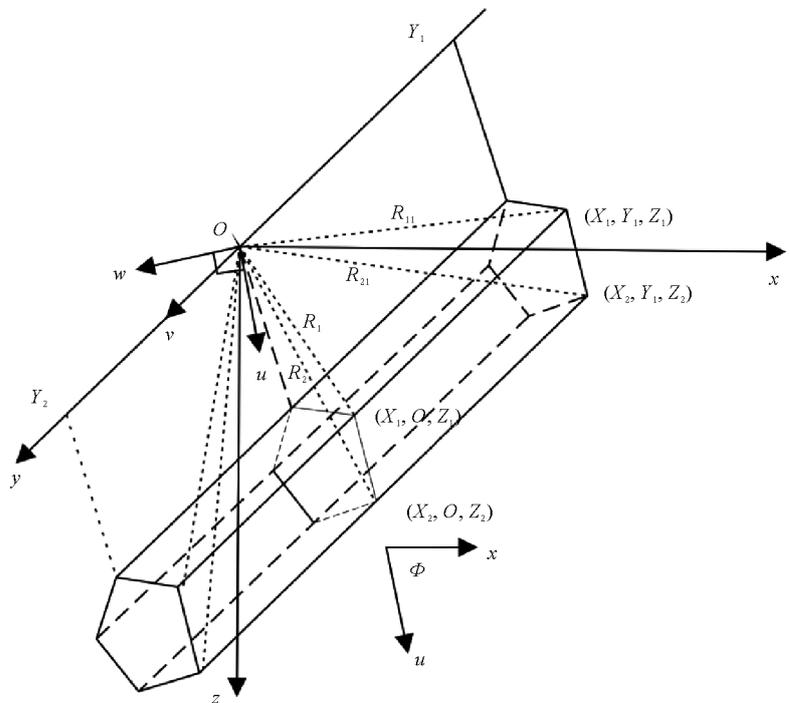


图 5 多边形棱柱示意图

Fig. 5 Schematic diagram of polygonal prisms

标函数设为:

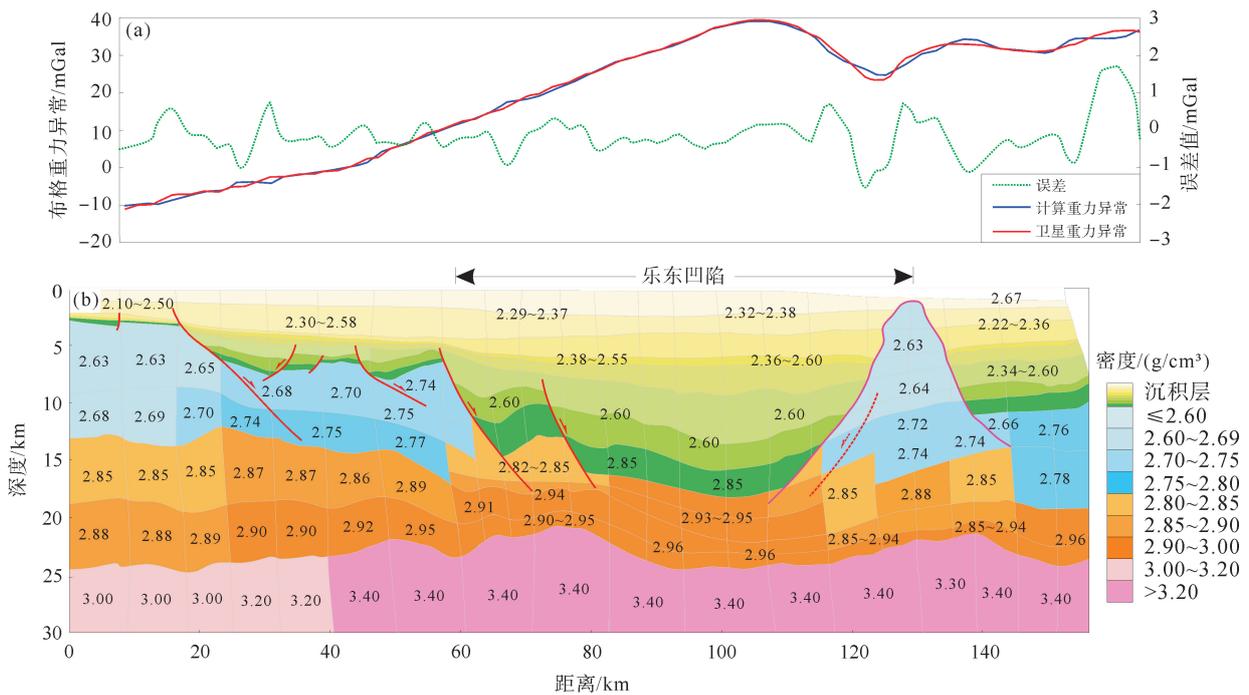
$$f(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (g_{i\text{观测}} - g_{i\text{拟合}})^2}{M}} \quad (5)$$

每个剖面进行至少 2 000 次的迭代计算,三个剖面的模型反演重力异常曲线与卫星重力异常曲线的均方根误差均小于 2,保证了结果的可靠性。

### 3 结果分析

#### 3.1 琼东南盆地西部岩石圈密度结构

测线 L1 呈 NW-SE 向分布,横跨琼东南盆地西部减薄最为显著的乐东凹陷,可见裂后期岩浆侵入活动,侵入体密度为 2.63~2.88 g/cm<sup>3</sup>,且由下向上逐渐减小(图 6)。测线 L1 靠近向陆一侧,在剖面 0~20 km 范围内,更为接近尚未形变的正常地壳密度结构,地壳厚度 25 km,上地壳密度 2.60~2.77 g/cm<sup>3</sup>,下地壳密度 2.85 g/cm<sup>3</sup>,地幔密度 3.0~3.2 g/cm<sup>3</sup>。乐东凹陷呈显著的极端地壳减薄现象,地壳厚度仅 5 km,但在 17 km 巨厚沉积物的负载下,地幔上隆幅度较小。乐东凹陷中部密度值异常升高,下地壳和上地幔密度分别达 2.96、3.40 g/cm<sup>3</sup>,上地壳局部密度升高至 2.85~2.93 g/cm<sup>3</sup>,地幔底侵现象显著。乐东凹陷中部有巨厚沉积层,经压实作用密度升至 2.85 g/cm<sup>3</sup>。乐东凹陷由中部向两侧,地壳密度逐渐减小,在向陆一侧仍保持正常地壳的密度值。



(a) L1 测线拟合曲线与误差曲线;(b) L1 测线岩石圈密度结构;测线位置见图 1

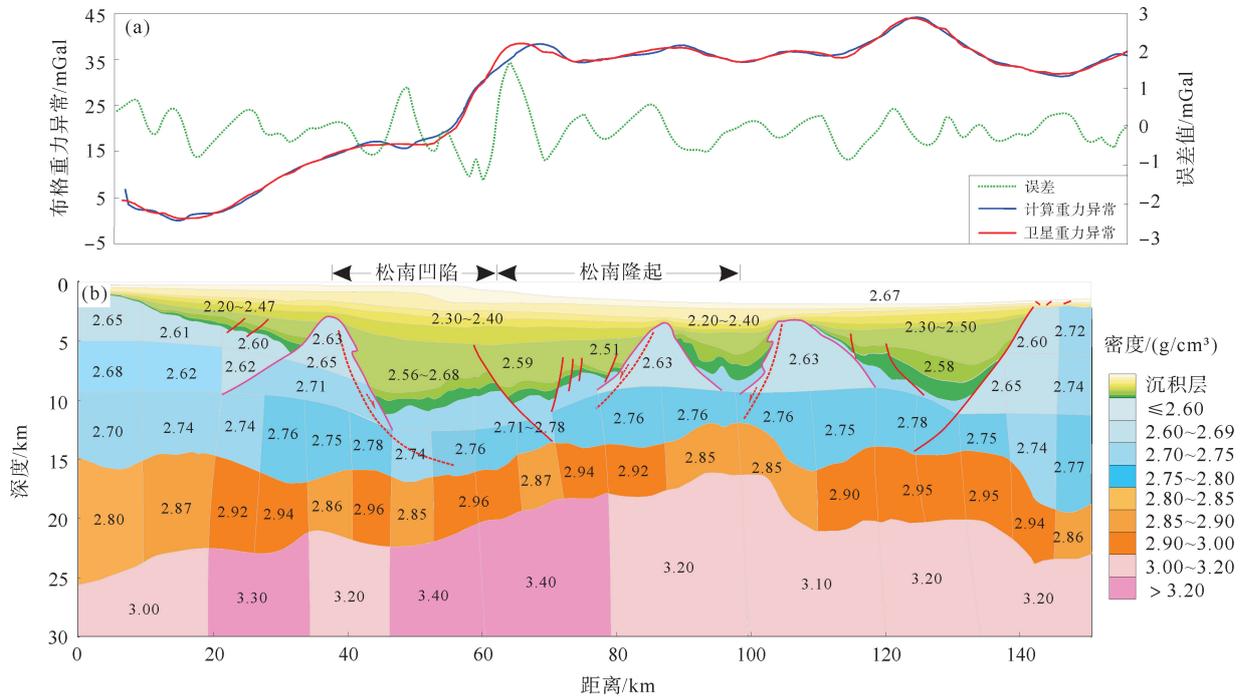
图 6 测线 L1 岩石圈密度结构反演结果

Fig. 6 Inversion results of lithospheric density structure along lines L1

#### 3.2 琼东南盆地中部岩石圈密度结构

测线 L2 位于琼东南盆地中部的琼中央构造转换带上,横跨松南凹陷和松南隆起等构造单元(图 7)。琼中央构造转换带作为琼东南盆地东、西部分界的重要构造单元,局部地壳极端减薄至 10 km,并在松南隆起表现为地幔上隆,上隆幅度为 7 km。该剖面的下地壳高密度异常体呈离散分布,大致出现在 20~45 km、55~85 km 及 110~140 km 三个区段,下地壳密度为 2.90~2.96 g/cm<sup>3</sup>,对应的上地壳密度值也略有升高。除此之外,剖面其他位置地壳密度接近正常地壳,上地壳密度为 2.60~2.76 g/cm<sup>3</sup>,下地壳密

度为  $2.80 \sim 2.90 \text{ g/cm}^3$ 。与测线 L1 乐东凹陷强伸展地区相比,该剖面转换带的地壳减薄与高密度异常均减弱,分布范围也相对减少。



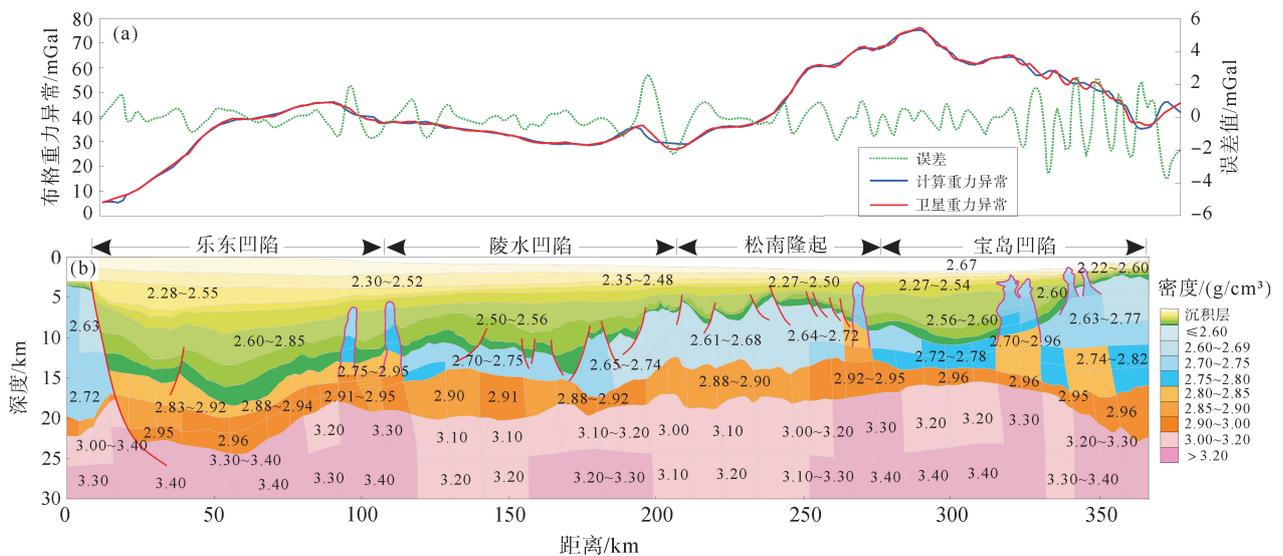
(a) L2 测线拟合曲线与误差曲线;(b) L2 测线岩石圈密度结构;测线位置见图 1

图 7 测线 L2 岩石圈密度结构反演结果

Fig. 7 Inversion results of lithospheric density structure along lines L2

### 3.3 琼东南盆地东、西部岩石圈密度结构差异

测线 L3 贯穿琼东南盆地东、西部,跨越乐东凹陷、陵水凹陷、松南隆起及宝岛凹陷等多个构造单元,反映岩石圈非均一伸展过程中的东、西部差异(图 8)。如图 8 所示,盆地中部以松南隆起为主要构造单元,沉积厚度有所减薄,但上地壳厚度相对较厚。下地壳密度为  $2.88 \sim 2.90 \text{ g/cm}^3$ ,异常体分散展布,强度有所减弱,是东、西部两大高密度异常的重要缓冲区。



(a) L3 测线拟合曲线与误差曲线;(b) L3 测线岩石圈密度结构;测线位置见图 1

图 8 测线 L3 岩石圈密度结构反演结果

Fig. 8 Inversion results of the lithospheric density structure along Line L3

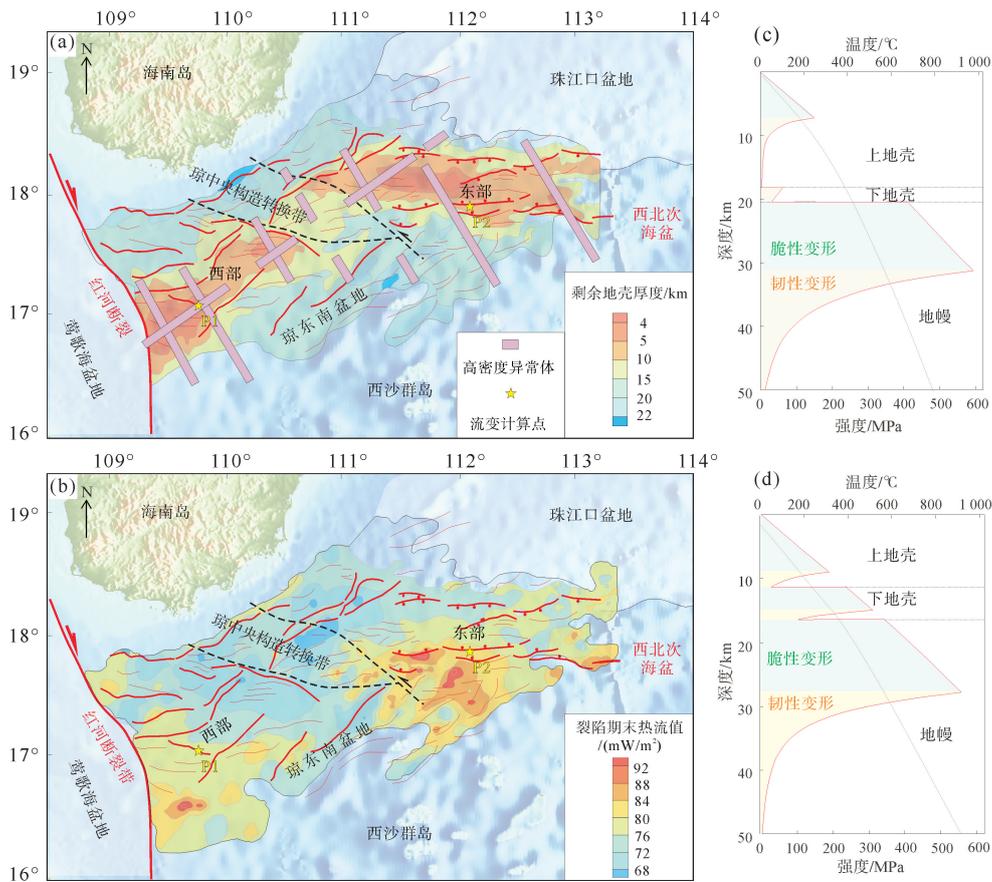
剖面上,盆地西部以乐东凹陷和陵水凹陷减薄最为显著,最薄处不足 5 km,但前者在巨厚沉积物的负载下,几乎未发育地幔上隆,甚至出现了莫霍面向下弯曲。其中,乐东凹陷高密度异常最为强烈,下地壳密度高达  $2.96 \text{ g/cm}^3$ ,其相近的上地壳密度也升至  $2.83 \sim 2.92 \text{ g/cm}^3$ 。相邻的陵水凹陷虽同属地壳减薄区,但莫霍面相对平直,且下地壳高密度为  $2.90 \sim 2.92 \text{ g/cm}^3$ ,异常强度和范围均有所减弱。

盆地东部以宝岛凹陷为主,地壳强烈减薄至  $7 \sim 8 \text{ km}$ ,但发育近  $10 \text{ km}$  的大幅度地幔上隆,裂后期岩浆活动也更加显著。宝岛凹陷发育显著的下地壳高密度异常,最高可达  $2.96 \text{ g/cm}^3$ ,但其分布范围相对于盆地西部的乐东凹陷有所减少。松南隆起作为关键构造转换带(地壳厚度  $15 \text{ km}$ ),分散分布的弱异常体(上地壳密度  $2.61 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ )构成分隔东西两大高密度异常域的缓冲屏障。

综上,琼东南盆地沉积层厚度自西向东逐渐减薄,地幔上隆幅度由西向东却逐渐增强,且岩石圈密度结构呈由西部极高异常→中部过渡异常→东部较高异常的分布规律,与盆地“东西分块”的构造格局相对应,为进一步探究琼东南盆地岩石圈非均一伸展的热动力学机制提供了证据。

### 4 讨论

琼东南盆地作为南海西北部的重要裂陷盆地,渐新世中期至早中新世末期( $32 \sim 16 \text{ Ma}$ ),经历了强烈的地壳伸展减薄和广泛的地幔上涌,在红河断裂带左旋走滑和西北次海盆 SN 向拉张两大热动力系统的共同控制下,呈“东西分块”的非均一伸展特征<sup>[18,23]</sup>。琼东南盆地大致以琼中央构造转换带为界,发育西部 NE 向和东部 EW 向两大块强烈减薄区(图 9(a)),二者地壳减薄程度相近,但断裂结构和拆离方式明显不同,暗示了其裂陷期可能经历了完全不同的热动力环境<sup>[5-6]</sup>。



(a) 高密度异常体及剩余地壳厚度;(b) 裂陷期末热流值<sup>[24]</sup>;(c) 西部 P1 的壳幔流变图,具体流变计算点见图(a);  
(d) 东部 P2 的壳幔流变图;具体流变计算点见图(a)

图 9 琼东南盆地非均一伸展和热动力学特征简图

Fig. 9 Schematic diagram of heterogeneous extension and thermal dynamics characteristics in Qiongdongnan Basin

综合前人和本研究测线 L1~L3 密度反演结果,琼东南盆地东、西部均存在大范围的下地壳高密度异常分布区,密度 $>2.92\text{ g/cm}^3$ 。盆地中部的琼中央构造转换带高密度异常发育范围较小,呈离散分布(图 9(a))。盆地东、西两大下地壳高密度异常区发育特征有所差异:盆地东部地壳强烈减薄,但沉积物厚度相对较小,地幔上隆显著,高密度异常体发育规模减小;盆地西部地壳强烈减薄,发育巨厚沉积物,莫霍面向下弯曲,高密度异常体的发育规模显著大于盆地东部,甚至在局部下地壳也有体现。值得注意的是,盆地地下地壳高速异常体并非仅局限于地壳强烈减薄区,可能反映了更为广泛的地幔上涌和底侵。

学者们经过多年努力,在琼东南盆地探测并收集了大量地表热流数据,基本确定了现今盆地的“热幔冷壳”的热流格局,其中地幔热贡献高达 90%以上,深部的热效应控制了盆地热状态的空间展布特征。部分学者考虑到裂后期岩浆侵入和沉积热披覆效应的影响,在钻井资料镜质体反射率的约束下,计算还原了琼东南盆地裂陷期末(约 21 Ma)的热状态,结果显示,盆地存在东、西部两个高达  $80\text{ mW/m}^2$  的高热流区,且分别发育于红河断裂带和西北次海盆附近,双热动力来源特征显著(图 9(b))。琼东南盆地地下地壳高速异常体的分布范围与两个高热流区接近,深部双热源控制显著。此外,岩石圈热-流变结构研究显示(图 9(c)、图 9(d)),相对于盆地西部,盆地东部的岩石圈强度更大,下地壳几乎完全冷却脆化,流变学性质非常接近西北次海盆的洋壳。

综上,琼东南盆地裂陷期末的高热流中心、地壳减薄中心和高密度异常中心,三者并非完全重合,东部宝岛凹陷非均一程度更高(图 9(a)、图 9(b))。琼东南盆地东、西部伸展差异,受控于深部双热动力系统,二者的控制范围也更为广泛。

## 5 结论

本研究以布格重力异常数据为基础,在 3 条多道地震反射剖面 and 相邻 OBS 速度结构剖面的约束下,采用人工蜂群智能优化算法计算最优解,并反演得到琼东南盆地骨干剖面的岩石圈密度结构,主要结论如下。

1) 琼东南盆地深部结构存在显著密度异常,西部乐东凹陷和东部宝岛凹陷的下地壳、上地幔均表现出异于正常岩石圈的高密度值,分别为  $2.92\sim 2.96\text{ g/cm}^3$  和  $3.30\sim 3.40\text{ g/cm}^3$ 。不同于宝岛凹陷,乐东凹陷异常体不仅规模更大,且向上穿透至地壳浅部,上地壳底部局部密度达  $2.82\sim 2.90\text{ g/cm}^3$ 。这种空间分异指示了不同深部过程,东部受控于幔源物质底侵,而西部则反映了大规模拆沉作用引发的壳幔物质垂向混合。

2) 琼东南盆地的下地壳高密度异常体分布区和地壳强烈拉伸减薄区,二者空间展布并非完全一致,高密度异常体分布范围更广泛,指示地幔热上涌及下地壳底侵作用的影响范围超过局部构造减薄区,反映了深部热动力对浅表构造的控制作用。而下地壳高速异常体与裂陷期高热流区在空间分布上呈高度耦合性,证实了岩浆侵入通道作为热传递与岩性改造的双重载体,以及热-岩相互作用的成因。

3) 琼东南盆地高热流中心、地壳减薄中心与高密度异常中心在空间上呈非重合特征。其中,东部宝岛凹陷尤为典型,其热异常区、减薄极值区与高密度核部的分布范围明显偏离。这种三维空间解耦现象印证了盆地东西向的伸展差异,并揭示了深部至浅层热动力控制机制的非均一性,为双热源主导的差异伸展模式。

## 参考文献:

- [1] 孙珍,李付成,林间,等.被动大陆边缘张-破裂过程与岩浆活动:南海的归属[J].地球科学,2021,46(3):770-789.  
SUN Zhen,LI Fucheng,LIN Jian,et al. The rifting-breakup process of the passive continental margin and its relationship with magmatism: The attribution of the South China Sea[J]. Earth Science,2021,46(3):770-789.
- [2] 汪品先.南海深部过程的探索[J].科技导报,2020,38(18):6-20.  
WANG Pinxian. Exploring the deep sea processes in the South China Sea[J]. Science and Technology Review,2020,38(18):6-20.
- [3] 丁巍伟.南海大陆边缘动力学:从陆缘破裂到海底扩张[J].地球科学,2021,46(3):790-800.  
DING Weiwei. Continental margin dynamics of South China Sea: From continental break-up to seafloor spreading[J]. Earth Science,2021,46(3):790-800.
- [4] 丁航航,丁巍伟,张帆,等.南海海盆区深部结构的不对称性及控制因素[J].地球科学,2021,46(3):929-941.  
DING Hanghang,DING Weiwei,ZHANG Fan,et al. Asymmetric deep structure of the South China Sea Basin and its controlling factors[J]. Earth Science,2021,46(3):929-941.
- [5] ZHAO Z X,SUN Z,ZHU X X,et al. The spatial-temporal variations in dynamic uplift and deep mantle upwelling in the north-west South China Sea margin: Insights into continental rifting and magmatism[J]. Gondwana Research,2022,120:145-161.

- [6] LI F C, SUN Z, DING W W, et al. Compression-induced anomalous subsidence in the extensional sedimentary basin: A numerical study from the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48. DOI:10.1029/2021GL094750.
- [7] DONG M, ZHANG J, BRUNE S, et al. Quantifying postrift lower crustal flow in the northern margin of the South China Sea[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125. DOI:10.1029/2019JB018910.
- [8] 刘海燕, 吕大炜, 李增学, 等. 琼东南盆地构造演化与含煤沉积作用研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(5):86-92.  
LIU Haiyan, LÜ Dawei, LI Zengxue, et al. Research prospect on tectonic evolution and coal-bearing sedimentary action in Qiongdongnan Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2012, 31(5):86-92.
- [9] 丁巍伟, 朱日祥, 万博, 等. 新特提斯洋东南段动力过程及东南亚环俯冲体系形成机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2023, 53(4):687-701.
- [10] QIU X L, YE S Y, WU S M, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341:179-193.
- [11] HUANG H B, KLINGELHOEFER F, QIU X L, et al. Seismic imaging of an intracrustal deformation in the northwestern margin of the South China Sea: The role of a ductile layer in the crust[J/OL]. *Tectonics*, 2021, 40. DOI:10.1029/2020TC006260.
- [12] LIU Z L, PÉREZ-GUSSINYÉ M, RÜPKE L, et al. Lateral coexistence of ductile and brittle deformation shapes magma-poor distal margins: An example from the West Iberia-Newfoundland margins[J/OL]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 578. DOI:10.1016/j.epsl.2021.117288.
- [13] SUN Z, WANG Z F, SUN Z P, et al. Structure and kinematic analysis of the deepwater area of the Qiongdongnan Basin through a seismic interpretation and analogue modeling experiments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(4):32-40.
- [14] 宋鹏, 宋瑞有, 韩光明, 等. 琼东南盆地松东凹陷断裂发育特征[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(3):603-613.  
SONG Peng, SONG Ruiyou, HAN Guangming, et al. Characteristics of faults in the Songdong Sag of Qiongdongnan Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(3):603-613.
- [15] LEI C, ALVES T M, REN J Y, et al. Rift structure and sediment infill of hyperextended continental crust: Insights from 3D seismic and well data (Xisha trough, South China Sea)[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125. DOI:10.1029/2019JB018610.
- [16] SANDWELL D T, MÜLLER R D, SMITH W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205):65-67.
- [17] ZHAO Z X, SUN Z, WANG Z F, et al. The mechanics of continental extension in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2015, 36:197-210.
- [18] PICHOT T, DELESCLUSE M, CHAMOT-ROOKE N, et al. Deep crustal structure of the conjugate margins of the SW South China Sea from wide-angle refraction seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58:627-643.
- [19] 夏少红, 范朝焰, 王大伟, 等. 琼东南盆地超伸展地壳结构及后期海南地幔柱影响[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(6):1113-1131.
- [20] KARPLUS M S, ZHAO W, KLEMPERER S L, et al. Injection of Tibetan crust beneath the South Qaidam Basin: Evidence from INDEPTH IV wide-angle seismic data[J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116. DOI:10.1029/2010JB007911.
- [21] 公维梁, 屠泽杰, 孙月文, 等. 一种基于重力正演理论的海底地形反演迭代算法[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3):64-74.  
GONG Weiliang, TU Zejie, SUN Yuewen, et al. A seafloor topography inversion iterative algorithm based on gravity forward modeling theory[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2024, 43(3):64-74.
- [22] LI C Y, GONG W, ZHAO L H, et al. Gravity-seismic joint inversion of lithospheric density structure in the Qiongdongnan Basin, northwest South China Sea[J/OL]. *Lithosphere*, 2024. DOI:10.2113/2024/lithosphere\_2023\_124.
- [23] 牛华伟, 杨鹏程, 刘闯, 等. 琼东南盆地陵水凹陷北坡沉积特征及油气地质意义[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(5):740-749.  
NIU Huawei, YANG Pengcheng, LIU Chuang, et al. Sedimentary characteristics and oil-gas geological significance of northern slope in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(5):740-749.
- [24] WANG Z F, SHI X B, YANG J, et al. Analyses on the tectonic thermal evolution and influence factors in the deep-water Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12):107-117.

(责任编辑:高丽华)