

海南岛高精度航磁特征与居里等温面深度分析

高维¹⁾, 郭志宏¹⁾, 周坚鑫¹⁾, 孟庆奎¹⁾, 舒晴¹⁾, 王纯²⁾

1) 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京, 100083; 2) 中国地质大学, 北京, 100083

内容提要:海南岛高精度航磁数据分析及其居里等温面反演, 对于探究海南岛及其相邻的南海大陆边缘的深部热结构具有重要研究意义。本文通过对海南岛航磁异常数据的化极和上延处理, 分析了岛内不同构造单元的磁异常特征及其空间展布。并在此基础上, 利用功率谱法, 反演计算出岛内区域居里等温面的深度分布, 结合海南岛区域地质演化、大地热流值、莫霍面与岩石圈深度以及地震测深剖面等资料, 获得了如下认识: ① 海南岛航磁异常带主要呈现近东西向与北东向展布, 近东西向磁异常带被北东向异常错断和干扰, 揭示了近东西向构造带要明显早于北东向构造带。② 海南岛居里等温面深度变化于 16 ~ 34 km 之间, 平均深度为 24 km, 其中, 琼北新生代火山-沉积盆地居里等温面深度明显偏深, 大致相当于本区莫霍面深度, 最深可达 35 km, 相对应的大地热流值偏低。③ 琼中-万宁与东方-昌江褶皱造山区的居里等温面深度明显偏浅, 最浅仅为 16 km, 明显低于本区莫霍面深度, 对应较高的大地热流值。④ 综合本文与前人研究表明, 海南岛岩石圈厚度为 55 ~ 90 km, 为典型的去根减薄的岩石圈, 莫霍面的温度为 600 ~ 900 °C, 局部异常高的莫霍面温度, 可能与本区软流圈地幔置换古老岩石圈地幔提供了热量有关。

关键词: 海南岛; 航磁异常; 功率谱分析; 居里等温面; 深部热结构

居里温度是指磁性物质的自发磁化强度降低至零时的温度, 随深度增加, 地球内部温度增加, 在达到一定温度时(约 550 °C), 地下物质出现退磁效应, 这个温度称之为居里点, 对应的深度称为居里等温面深度(Mayhew, 1982; Hemant et al., 2007; Salem et al., 2014)。岩石圈中的各类岩石因含有不同成分的磁性矿物, 在温度低于居里点时呈现出磁性, 而磁性的强弱则与其含有的磁性矿物的数量成正相关关系。作为岩石圈的温度界面, 居里等温面通常能反映地壳与岩石圈深部热结构与状态, 目前已在构建岩石圈三维结构、揭示地球深部热状态、开发利用地热能与旅游开发、预测地震与火山活动等研究领域, 发挥了举足轻重的作用(Hao Shujian et al., 1982; Wang Jun et al., 1990; Tanak et al., 1999; Ruiz and Introcaso, 2004; Chiozzi et al., 2005; Bansal et al., 2013; Xiong Shengqing et al., 2014, 2016)。

海南岛位于特提斯构造域与太平洋构造域交汇

部位, 自中元古代以来, 经历了漫长而复杂的地质演化历史, 发育了多期多旋回的岩浆作用、沉积作用、变质作用与构造运动, 这些地质作用的发生与发展通常与本区地壳与岩石圈深部热结构与状态存在密切的成因联系。目前, 海南岛地壳或岩石圈深部热(温度)结构的研究主要基于地表热流测量获得, 然而由于本区地表热流的测量分布极为稀疏和不均匀, 且测量深度较浅, 故目前对海南岛深部热结构与状态的约束有限(Jiang Guangzheng et al., 2016)。此外, 这些测量值也明显受地表热液循环和侵蚀作用的影响(Li Chunfeng et al., 2017)。近年来, 利用高精度航磁数据, 通过功率谱法反演居里等温面深度, 查明地壳与岩石圈深部热结构与状态, 已成为一种十分有效的方法(Li Chunfeng et al., 2017; Wang Jian and Li Chunfeng, 2018)。本文利用近年来在海南岛及其邻区获得的高分辨率航磁数据, 通过功率谱法反演岛内居里等温面深度变化与分布特征, 揭示海南

注: 本文为中国地质调查局项目(编号 DD20189410, DD20191001)资助成果。

收稿日期: 2019-09-03; 改回日期: 2020-07-25; 网络发表日期: 2020-08-02; 责任编辑: 周健。

作者简介: 高维, 女, 1983 年生。高级工程师, 主要从事航空重磁数据处理、反演与解释工作。Email: gw551121@163.com。

引用本文: 高维, 郭志宏, 周坚鑫, 孟庆奎, 舒晴, 王纯. 2020. 海南岛高精度航磁特征与居里等温面深度分析. 地质学报, 94(11): 3249~3262, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020249.

Gao Wei, Guo Zhihong, Zhou Jianxin, Meng Qingkui, Shu Qing, Wang Chun. 2020. High precision aeromagnetic characteristics and Curie depth analysis of the Hainan Island. Acta Geologica Sinica, 94(11): 3246~3262.

岛的地壳与岩石圈热结构与状态,并分析居里等温面深度变化对岛内地壳与岩石圈热结构与状态的制约,以及它与海南岛大地构造单元、大地热流值、莫霍面与岩石圈深度的成因关系。

1 地质背景

研究表明 (Wang Xiaofeng et al. , 1991a, 1991b; Zhang Feifei et al. , 2011),海南岛地层发育较齐全。其中,中元古代-古生代变质地层主要包括有中元古代抱板群(混合片麻岩、片岩类及石英岩)、青白口系石碌群、震旦系石灰顶组、寒武系一志留系片岩、石英岩、变质粉砂岩与大理岩与石炭二叠系石英砂岩与板岩。中生代陆相火山-沉积岩系主要包括砾岩、含砾细砂岩、泥岩、泥质粉砂岩夹玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩、流纹斑岩、火山角砾岩等。新生代总体为滨海相、河湖相碎屑岩沉积和基性-超基性火山岩等。此外,海南岛侵入岩分布较为广泛,占全岛面积的近一半(中元古界一白垩系),从镁铁质岩到中性岩、中酸性岩一酸性岩都有,60%以上岩性为二长花

岗岩(Hainan Geological Survey, 2017)。
海南岛出露的区域变质岩分布较广,见于前中生代地层中,变质相从绿片岩相至麻粒岩相(Hainan Geological Survey, 2017),主要包括镁铁质-长英质麻粒岩、斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、云母片岩、千枚岩、石英岩、变质石英砂岩等。研究表明,这些区域变质岩系的变质时代主体为约 250 Ma,为印支运动的产物,而不是前人认为的古元古代或太古宙(Li Sunxiong et al. ,2016)。

如上所述,海南岛先后经历了多期次的构造运动,这些构造运动塑造了海南岛的主要构造形迹,形成了东西向王五-文教断裂带、昌江-琼海断裂带、尖峰-吊罗断裂带、九所-陵水断裂带和北东向军营-红岭断裂带、戈枕断裂带、白沙断裂带、南好断裂带,以及北西向石门山断裂带、白沙-陵水断裂带、儋县-万宁断裂带、龙波-翰林断裂带和南北向琼东、琼中南北构造带等主要构造体系,构成了本岛的主要构造格局,控制着岛内沉积建造、岩浆活动、变质作用与成矿作用(图 1)。

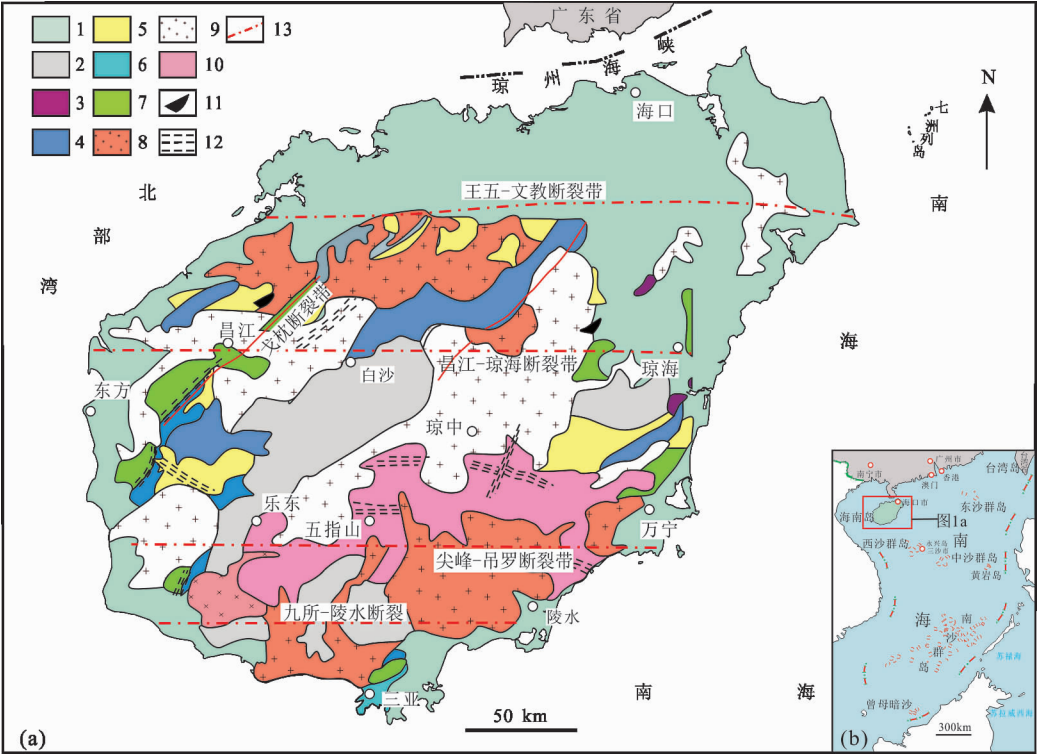


图 1 海南岛地质简图(a)及其位置图(b)(据 Zhang Feifei et al. ,2011 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Hainan Island (a) and its location map (b) (modified from Zhang Feifei et al. , 2011)

- 1—新生代;2—白垩系;3—晚三叠系;4—石炭系-二叠系;5—志留系;6—寒武系-奥陶系;7—元古宙抱板群和石碌群;
8—侏罗纪-白垩纪花岗岩;9—三叠纪花岗岩;10—二叠纪花岗质片麻岩;11—蛇绿岩;12—韧性剪切带;13—推测断裂带
1—Cenozoic; 2—Cretaceous; 3—Upper Triassic; 4—Carboniferous-Permian; 5—Silurian; 6—Cambrian-Ordovician;
7—Proterozoic Baoban and Shilu Groups; 8—Jurassic-Cretaceous granite; 9—Triassic granite; 10—Permian orthogneiss;
11—ophiolitic rocks; 12—ductile shear zone; 13—inferred fault zone

2 数据来源与处理

2.1 航磁异常数据化极

研究区地理坐标为东经 $108^{\circ}20' \sim 111^{\circ}15'$, 北纬 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'$, 航磁数据测量比例尺为 $1:10$ 万。位场转换中采用余弦扩边方法以满足快速傅里叶变换条件, 避免边缘效应。本文所使用的磁异常数据主要来源于中国自然资源航空物探遥感中心多年来的磁力调查资料, 此外还包含了所收集到的海南省地质调查院的磁测资料。在数据处理过程中采用了 2010 年国际地磁参考场 IGRF 模型(Thébault et al., 2015), 13 阶 13 级球谐系数, 对航磁数据逐点计算正常场改正, 数据处理中采用高斯-克吕格投影, 北京 54 椭球, 中央经线 111°E , 最终研究区内的 ΔT 磁异常如图 2 所示。

受地磁场倾斜磁化的影响, 造成磁异常同磁性地质体对应较复杂, 特别是海南岛及其邻近海域的低磁纬度地区, 为了便于解释需要进行化级处理(Baranov, 1957; Zhang Peiqin, 1996; Guo Zhihong, 2003), 本次研究采用频率域位场转换处理方法, 对航磁 ΔT 原始数据进行了分带化极处理。从南到北分成四个带, 每个带宽度跨越地理纬度约 1° , 带内

地磁倾角变化不超过 2° 。选择每个带中间的地磁倾角为参数, 对数据进行化极转换处理, 化极采用地磁倾角依次为 24.25° 、 25.26° 、 26.26° 、 27.27° , 地磁偏角 -1.5° 。经化极处理后, 低纬度地区水平磁化影响大为减弱, 磁场整体特征面貌、磁性体的中心位置、分布范围及形态特征有了改变, 化极后的异常与地质体有较好的对应(图 3), 异常带和梯度带的位置更加准确。

分析对比低纬度化极前后的磁异常数据后, 可以明显看出, 海南岛近东西向断裂带在化极后航磁异常图表现得更加清晰(图 3)。其中, 王五-文教深大断裂带在化极前的磁异常表现很不规则, 断裂带的展布与化极前的磁异常的正负展布没有很好的对应关系, 但化极之后, 王五-文教深大断裂带总体上表现为异常错断带和不同磁场特征分界线。该断裂带不仅是海南岛琼北新生代火山-沉积盆地和琼中地体(五指山褶皱造山带)的分界线(Bian Zhaoxiang, 1958; Zeng Guangce, 1984; Wang Xiaofeng et al., 1991a, 1991b), 而且还控制了琼北新生代沉积凹陷(如长坡、福山、文岭、文教)的展布。据人工地震测深等有关资料表明, 该断裂的西段(王五-加来)错动方向是北盘上升, 南盘下降; 中段(加来-

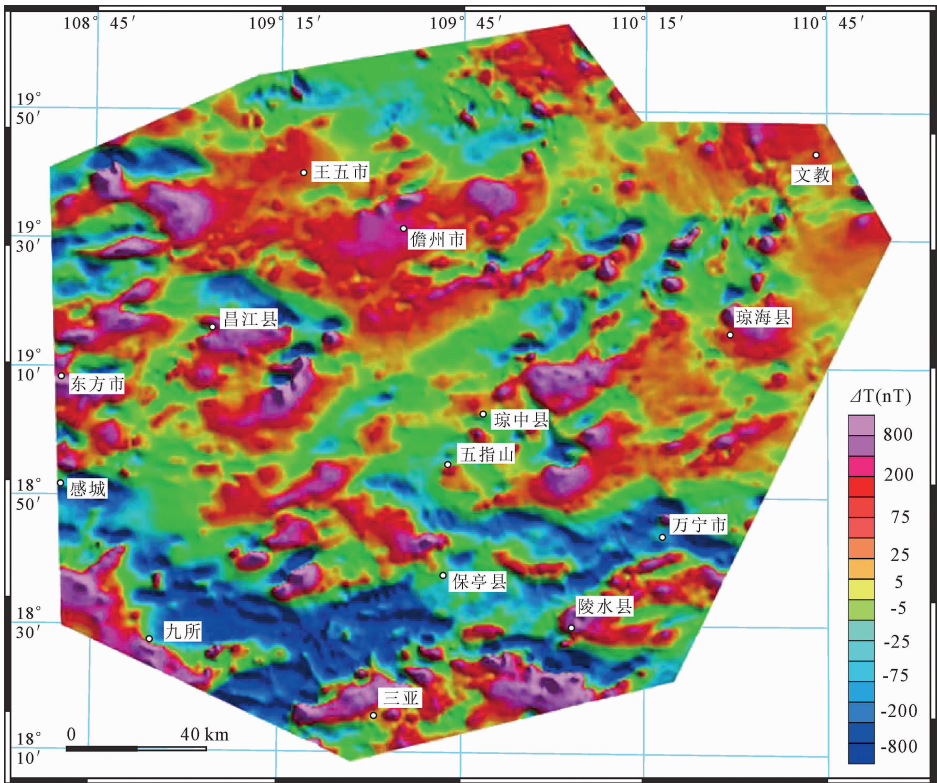


图 2 海南岛总磁场异常图

Fig. 2 Total magnetic field anomaly map of Hainan Island

Guirong et al. , 2012; Xiong Shengqing et al. , 2016)。另一类是间接法 (Spector et al. , 1970; Shuey et al. , 1977; Connard et al. , 1983; Okubo et al. , 1985 ; Shen Ninghua, 1985; Blakely et al. , 1988; Tanaka et al. , 1999; Ravat et al. , 2007), 诸如谱峰法、矩谱法、幂定律校正法、Backus-Gilbert 线性反演加迭代拟合法等, 此类方法需依次求取磁性体顶深、中心深及底深, 故称为间接法。

Tanaka(1999)在 Blakely(1988)给出的磁异常功率谱 $\Phi_{\Delta T}(k_x, k_y)$ 的基础上, 推导了径向平均功率谱的表达式:

$$\Phi_{\Delta T}(|K|) = Ae^{-2|K|Z_t} [1 - e^{-|K|(Z_b-Z_t)}]^2 \quad (1)$$
 式中, K 是波数(km^{-1}); A 是与磁性体的尺度、磁化强度方向和磁场方向有关的常数; $Z_t(\text{km})$ 为磁性体顶面深度; $Z_b(\text{km})$ 为磁性体底面深度。当波长小于磁性体厚度的 2 倍时, 对式(1)两边开方并取对数, 可近似为:

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2}] = \ln B - |K|Z_t \quad (2)$$
 式中, B 为常数, 据式(2)可知, 由该磁异常径向对数功率谱的斜率可估算出磁性体顶面深度 $Z_t(\text{km})$ 。另外, 式(1)还可做如下变化:

$$\Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2} = Ce^{-2|K|Z_o} [e^{-|K|(Z_t-Z_o)} - e^{-|K|(Z_b-Z_o)}] \quad (3)$$
 式中, C 为常数, $Z_o(\text{km})$ 为磁性体中心埋深。在波长较长的波段, 式(3)可改写为:

$$\Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2} = Ce^{-2|K|Z_o} [e^{-|K|(-d)} - e^{-|K|(d)}] \approx Ce^{-2|K|Z_o} |K|d \quad (4)$$

式中, $2d$ 为磁性体的总厚度。对式(4)取对数, 可得到:

$$\ln[\Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2}/|K|] = \ln D - |K|Z_o \quad (5)$$

式中, D 是常数。据式(5)可知, 由该磁异常径向对数功率谱的斜率可估算出磁性体中心深度 $Z_o(\text{km})$, 所以磁性体底面深度可表示为: $Z_b = 2Z_o - Z_t$ 。

3.2 方法分析

本次计算采用的方法是频率域功率谱法, 以直立棱柱体为模型的功率谱法反演居里等温面深度, 考虑到利用谱分析方法求得的居里等温面反映的是平均变化趋势, 为使计算结果更加合理, 我们采用分带变倾角化极磁异常数据, 再化极数据的基础上进行了向上延拓的方法滤掉浅源磁性体的影响, 计算居里等温面数据网格间距为 $5\text{km} \times 5\text{km}$, 主要包括如下步骤: ① 频谱计算与剖面的长度有关, 所以应选择合适的滑动窗口以保证计算频谱的准确性, 公式成立的前提条件是在低频段, 窗口的大小至少应包括地质体产生磁场低频成分才最优化地反演地质体的底部埋深, 根据前人经验 (Okubo et al. , 1985), 窗口的选择以 4 ~ 6 倍的顶部埋深为宜, 结合研究区磁异常特征, 确定一个适当大小的方形窗口及其滑动距离, 滑动窗口纵横方向均可以重叠。经过多模型和实测数据的反复试验, 本次计算确定滑动窗口大小为 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 。② 根据对数功率谱计算直立棱柱体的底面深度, 并把底面深度值放在窗口中心作为该点处的居里等温面深度。③ 将滑动窗口沿剖面方向滑动 10km 至下一个位置进行计算, 依据谱分析结果(图 5), 在计算单个窗口的 Z_t 和 Z_o 时, 采用了 $0.21 \sim 0.33\text{radians/km}$ 和 $0.09 \sim 0.21\text{radians/km}$, 重复上面步骤①和②, 直至通过窗口扫描完整个研究区, 居里等温面计算中参照了前人工作中儋州-保亭地质与地球物理综合

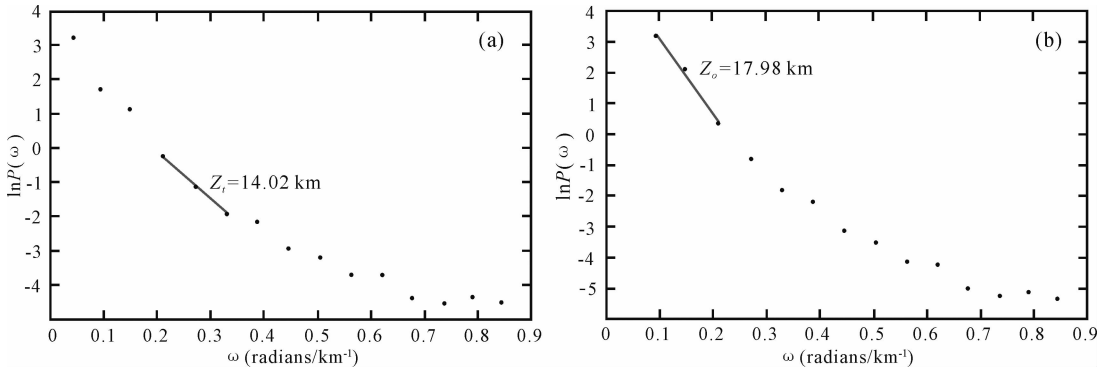


图 5 频谱分析图

Fig. 5 Spectrum characteristics map

(a)—频谱特征及 Z_t 的估算; (b)—频谱特征及 Z_o 的估算

(a)—Spectrum characteristics and Z_t estimation; (b)—spectrum characteristics and Z_o estimation

剖面 and 琼北地区人工地震测深剖面解释资料,以及收集的大地热流值数据(Wang Jiyang, 1990; Hu Shengbiao, 2001; Jiang Guangzheng et al. , 2016;), 所得计算居里等温面深度 16. 3~35. 6 km, 平均深度 25. 5 km, 计算全区居里等温面反演结果共获得 416 个深度点, 再采用最小曲率法进行插值获得居里等温面深度图, 并把儋州-保亭地质与地球物理剖面位置和热流数据按热流值大小分类标在图 6 中。

3. 3 居里等温面特征

反演计算结果表明, 海南岛内居里等温面起伏比航磁化极异常更加明显(图 6)。从图 6 可以清晰地分辨出两个方向的构造异常带, 分别是北东向和北西向, 且表现为北西向异常对北东向异常有干扰和改造的特征, 反映了海南岛北东向构造可能早于北西向构造。在居里等温度深度分布图中(图 6), 东西构造磁异常带反映不明显, 表明东西构造磁异常带是一条相对较浅的磁异常带。海南岛居里等温面的上隆与拗陷大部分呈块状分布, 可进一步划分为琼西北隆起区、乐东-白沙拗陷区与琼中-琼东南隆起区。

琼西北隆起区主要分布于北部湾海陆交互带过渡到海南岛东方、昌江、石碌、南平等地, 该隆起区形态呈一个北东走向的菱形圈闭异常, 居里等温面深度从海上向陆地过渡明显变浅的趋势, 变化于 17 ~ 25 km 之间。琼中-琼东南隆起区分布在崖城、琼中、琼海、陵水与万宁等地, 其居里等温面深度为 16 ~ 24 km, 相对琼西北隆起区埋深更浅, 该隆起区内 在万宁等地分布着两个较浅的极值点, 深度分别约为 16 km 和 17 km。从图 6 还可以看出, 琼东南隆起区还具有隆中有拗的特征, 后安地区存在一个次级拗陷, 拗陷形态呈块状分布, 与后安白垩纪陆相沉积盆地相对应, 其居里等温面深度为 24 ~ 27 km。乐东-白沙拗陷区分布在海南岛西南部的黄流、中部白沙地区后过渡到儋州直到海南岛东北部, 整体形态呈哑铃状, 居里等温面深度变化总体上显示为块状沉降区特征, 该拗陷区由三个相对独立的块状或条带的次级拗陷组成, 总体上由南往北居里等温面深度由浅变深, 变化于 26 ~ 34 km 之间, 最深处可达 35 km, 在琼北龙州市一带, 拗陷带内分布着次级隆起, 隆起北缘边界发育在王五-文教深大断裂带附

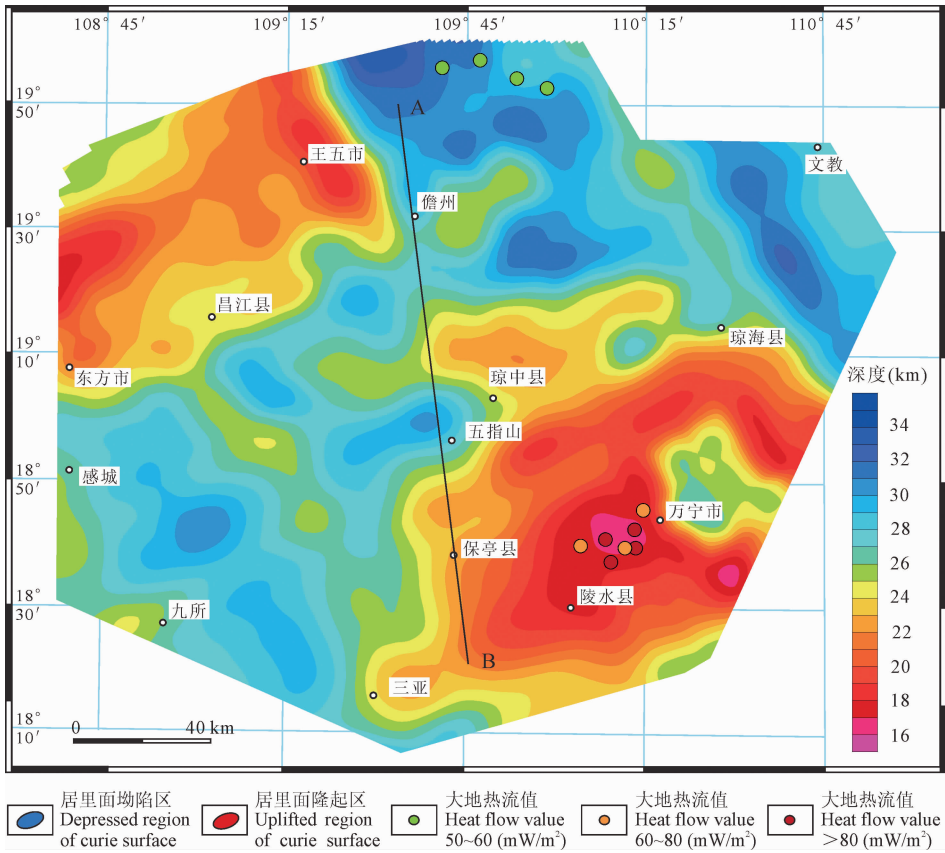


图 6 海南岛居里等温面深度图

Fig. 6 Curie isothermal depth map of Hainan Island

近,沿该断裂带居里等温面明显变化,断裂带南侧居里等温面较浅,起伏较缓,北侧明显较深,推断该断裂带为深部岩浆活动的通道。总体上,琼北居里等温面呈现出“坳中隆”的特征。

4 讨论

4.1 居里等温面起伏与大地热流关系分析

相关研究表明 (Bouligand et al., 2009; Li Chunfeng et al., 2010, 2013; Bansal et al., 2011; Wang Jian et al., 2018), 在少数情况下, 如古老而稳定的克拉通, 居里等温面与大地热流不具明显对应关系 (Li Chunfeng et al., 2009; Li et al., 2017)。但在其他大地构造单元 (如洋中脊、洋-陆转换带和俯冲带等), 地表大地热流与居里等温面起伏具有较好对应关系 (Okubo et al., 1985; Liu Guangxia et al., 1996; Tanaka et al., 1999; Lin Jingyi et al., 2005; Nuri et al., 2005; Hu Xuzhi et al., 2006; Jiang Guangzheng et al., 2016;), 如 Idárraga-García and Vargas (2018) 基于全球居里等温面深度与大地热流值的相关性研究, 提出了根据居里等温面深度计算大地热流值的方法。

根据 Idárraga-García and Vargas (2018) 的计算方法与收集到海南岛大地热流值得出, 海南岛内大地热流值变化于 $60 \sim 91 \text{ mW/m}^2$, 平均值为 74 mW/m^2 , 与全球典型克拉通型大陆区与大洋区的大地热流值相比 (Li Chunfeng et al., 2017), 海南岛总体上具有中等—较高的区域大地热流值, 介于大洋地壳区与大陆地壳区的大地热流值之间, 这与本区位于华南大陆地壳向西太平洋地壳过渡的大地构造位置相吻合 (图 1)。此外, 值得指出的是, 具有较高的大地热流的区域与岛内分布众多 (34 处) 的中—低温对流型温泉分布区域相一致 (Gao Fanglei et al., 2009)。相关研究表明, 岛内温泉地下热水的形成与岛内具有相对较高的地热场有关, 地下热水的水源以大气降水为主, 大气降水通过花岗岩体的构造裂隙渗入, 由于相对偏高的区域性地热场在深部加热, 在地壳浅部的循环过程中被围岩加热成为地下热水。

为了进一步说明海南岛居里等温面的起伏与地表热流对应关系, 我们还获取了 25 个大地热流值 (图 6; Wang Jiyang, 1990; Hu Shengbiao, 2001; Jiang Guangzheng et al., 2016)。从图 6 可以看出, 海南岛居里等温面起伏与大地热流值具有较好的相关性。具体来说, 较低的大地热流值分布于居里等

温面的坳陷区或坳陷区边缘 (如琼北居里等温面坳陷区); 较高的热流值分布于居里等温面隆起的五指山印支褶皱造山区 (琼中—万宁), 如位于琼东南吊罗山居里等温面隆起区 (居里等温面深度约 16 km), 具有较高的大地热流值, 变化于 $75 \sim 82 \text{ mW/m}^2$ 之间 (Wang Jiyang, 2012)。在 Wang Jiyang (2012) 出版的中国大地热流图上, 海南岛大地热流值分布特征为琼东南部万宁、陵水等地区大地热流值最高, 极值可达到 85 mW/m^2 , 而后逐渐向琼中县、五指山等地区依次衰减, 进一步证明了居里等温面隆起区分布相对较高的热流值。而居里等温面坳陷区, 大地热流值相对较低, 如琼北居里等温面坳陷区具有较低的大地热流值, 介于 $60 \sim 65 \text{ mW/m}^2$ 之间 (Jiang Guangzheng et al., 2016)。此外, 值得指出的是, 海南岛东方—昌江居里等温面隆起区, 在最新的中国大地热流图中并没有反映出较高的热流值, 可能是岛内西部断裂活动或浅表热液循环影响破坏了居里等温面与大地热流之间的相关性, 也可能因为海南岛西部大地热流值测点较少, 没有被反映至最新大地热流图有关, 具体原因有待进一步深入研究。

4.2 居里等温面、莫霍面与岩石圈深度变化对照分析

为了系统分析海南岛居里等温面深度起因, 以及它与莫霍面深度、岩石圈厚度变化规律, 本文综合了海南岛已发表的地质-地球物理资料 (Hainan Geological Survey, 2017), 绘制了儋州-保亭地质-地球物理综合剖面图 (图 7) 与海南岛莫霍面深度等值线图 (图 8), 剖面位置见图 6 与图 8。儋州-保亭剖面北起儋州市北部福安—南宝一带, 在保亭南侧的海棠湾结束, 几乎包括了海南岛主要大地构造单元, 主要包括: 琼北中—新生代火山-沉积岩区、琼中五指山褶皱造山区与三亚地体。

从图 6~8 可以明显看出: ① 海南岛从北至南, 总体上其岩石圈厚度变化不大 ($70 \sim 80 \text{ km}$), 但从琼北新生代火山岩区→琼中五指山褶皱造山区→三亚地体, 其岩石圈厚度具有逐渐变薄的趋势, 在 Zhu Jieshou et al. (2006) 与 Li Tingdong (2010) 编制的中国及相邻陆域海域岩石圈厚度图上, 琼北地区岩石圈厚度为 $70 \sim 75 \text{ km}$, 而琼中—南地区为 $65 \sim 70 \text{ km}$, 居里等温面深度值总体上由大变小的趋势, 具有与岩石圈厚度变化一致的特点。② 大致以王五-文教断裂带为界, 该断裂带以南居里等温面深度相对较浅, 位于莫霍面之上, 这与区内具有较高大地

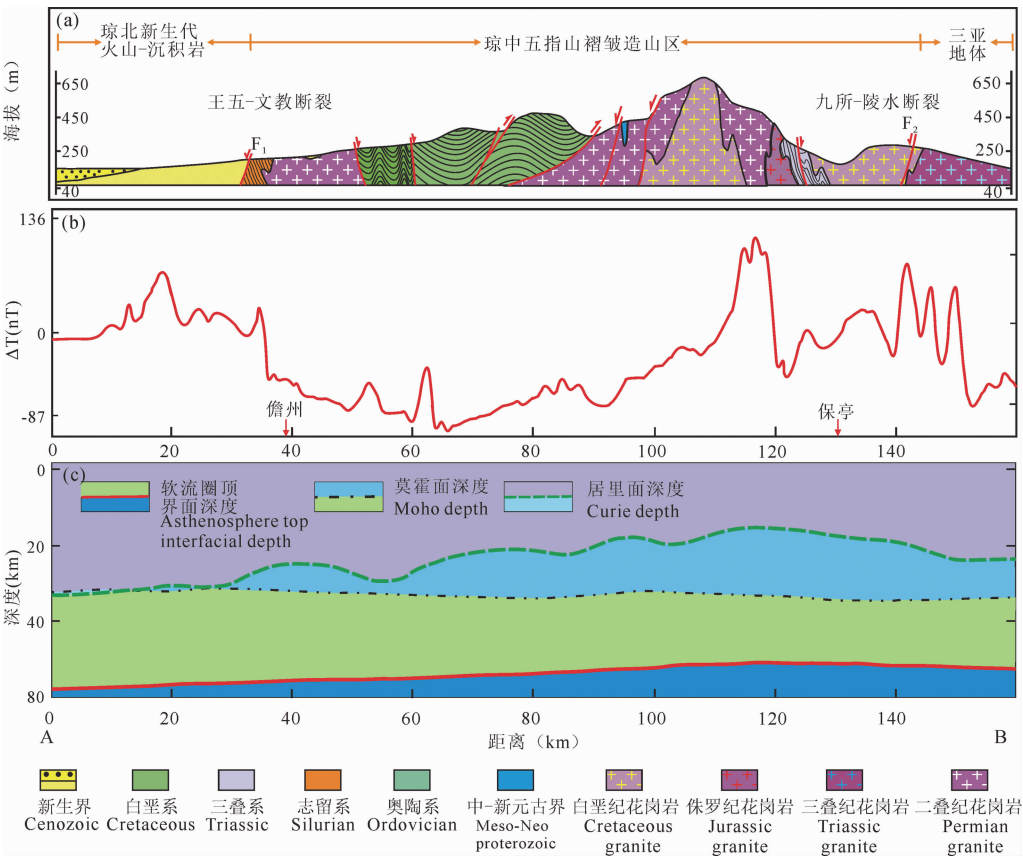


图 7 海南岛儋州-保亭主要岩石构造单元地质-地球物理综合剖面图(剖面 A—B 位置见图 6)

Fig. 7 Geological-geophysical profile (A—B) of the main tectonic units from Danzhou to Baoting in Hainan Island (location of section A—B is shown in Fig. 6)

(a)—主要岩性-构造单元(据 Hainan Geological Survey, 2017 修改);(b)—化极后航磁异常剖面变化图;
(c)—居里等温面深度-莫霍面深度与岩石圈厚度变化

Lithology-tectonic units (revised by Hainan Geological Survey, 2017); (b)—reduction-to-pole of aeromagnetic anomaly profile change;
(c)—Curie isothermal depth-Moho depth and lithosphere thickness variation

热流值、深部地壳显著的高温部分熔融作用(Xu Deming et al., 2006; Gao Fanglei et al., 2009)以及本区大面积出露了与印支造山作用有关的岩浆活动相吻合(Shen et al., 2018; Zhao Guofeng et al., 2018; Wen Shunyu et al., 2018)。③ 王五-文教断裂带以北的琼北地区,居里等温面深度相对较深,与莫霍面深度几乎相同,为 28 ~ 33 km,这与区内具有偏低的大地热流值以及新生代盆地发育较少的高热岩浆活动相一致(Wang Xiaofeng et al., 1991a)。此外,利用人工深地震反射方法,前人曾对琼北地壳结构进行初步研究,结果表明琼北地壳平均速度在 6.27 km/s,莫霍面上、下界面速度分别为 6.5 km/s 和 8.05 km/s,无明显生热的低速层(Meng Xiangli, 2012),推测可能深部无热磁性岩石。相关钻孔资料显示(Wang Xiaofeng et al., 1991a)在琼北新生代火山-沉积断陷盆地之下,还存

在早古生代—中元古代无磁性的长英质岩石与无生热力较高的隐伏花岗岩层。由此可见,琼北居里等温面拗陷是本区地壳深部热结构的综合反映。④ 琼西北与琼中-琼东南两个明显居里等温面隆起区(图 6),其居里等温面的深度(16 ~ 24 km)明显低于本区的莫霍面深度(30 ~ 32 km),反映了以上两个地区具有明显高热的特征。此外,值得指出的是,进一步综合对比海南岛居里面深度分布与海南主要岩石-构造单元分布表明,琼西北与琼中-琼东南居里等温面隆起区与岛内印支造山后岩浆岩分布区几乎完全重合,这种关系是否暗示海南岛内居里等温面的隆起与岛内印支期花岗岩放射性生热有关,值得进一步研究。

4.3 居里等温面起伏对海南岛深部热结构的制约
许多研究表明,利用居里等温面深度与大地热流值等参数可以估算岩石圈厚度与温度(Li et al.,

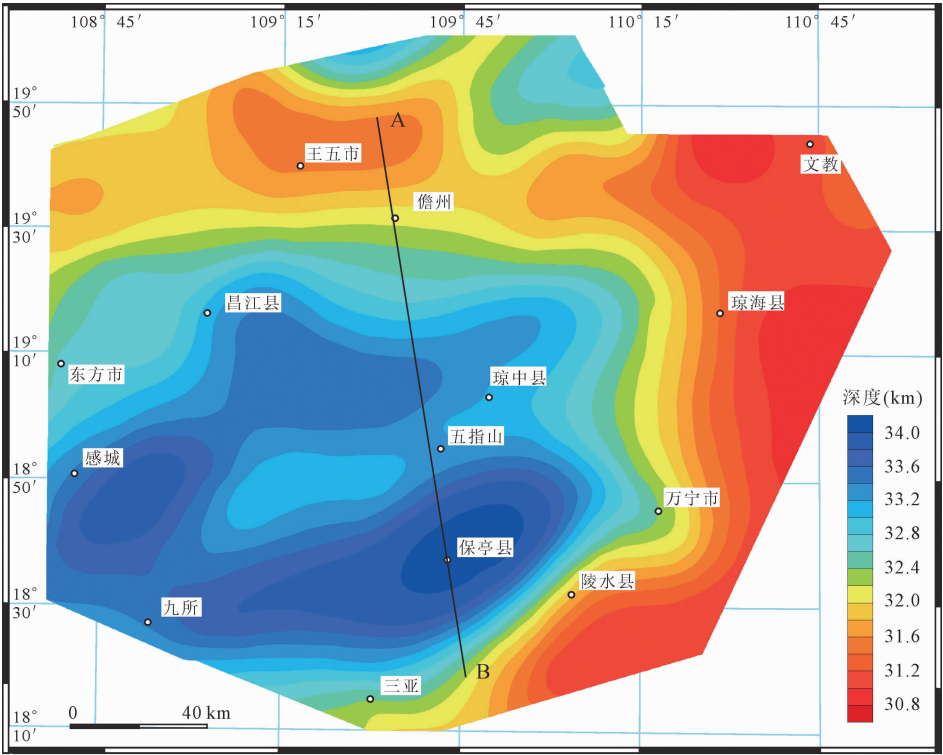


图 8 海南岛莫霍面深度等值线图(据 Wang Xiaofeng et al. , 1991 修改)

Fig. 8 The Moho isothermal depth of Hainan Island (modified after Wang Xiaofeng et al. , 1991)

2012; Wang et al. , 2016; Yasmina et al. , 2017), 依据海南岛居里面深度及其相关参数,本文估算了海南岛岩石圈厚度。计算过程中假设岩石圈热传导仅在垂向上发生,岩石圈连续热产量随着深度增加呈指数变化,且居里点温度为 550℃(Li, 2011; Li et al. , 2012)。首先,采用最小二乘法对海南岛居里面深度和大地热流值进行拟合获得: $k=2.00\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (磁性层热导率), $H_0=3.00\mu\text{W/m}^3$ (地表热产率), $h_r=15\text{ km}$ (热产量衰减因子),再利用随温度变化的热导率模型(Li et al. , 2012)和一维稳态热传导方程式(6);Turcotte and Schubert, 2002)计算所得结果与地幔固相线温度理论模型曲线($T_{\text{LAB}}\approx 1050+3Z$,Lachenbruch, 1978)交点,获得海南岛岩石圈厚度变化于 55 ~ 90 km 之间。

$$\frac{d}{dz}\left(k[T(z)]\frac{dT(z)}{dz}\right)=-Hoe^{-z/hr}\tag{6}$$

式中, $k(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ 为磁性层热导率; $H_0(\mu\text{W/m}^3)$ 为地表热产率; $h_r(\text{km})$ 为热产量衰减因子, $z(\text{km})$ 为岩石圈厚度, $T(z)(^{\circ}\text{C})$ 为某一岩石圈厚度对应的温度。

本文利用居里等温面深度估算的海南岛岩石圈厚度与前人利用其他方法获得的岩石圈厚度基本一致,它们主要包括:① Zhu Jieshou et al. (2006)利用

人工地震测深剖面 and 天然地震面波层析成像技术,反演了中国东部岩石圈厚度,并推测海南岛北部岩石圈厚度为 70 ~ 75 km,其南部为 65 ~ 70 km。② Jiang Ying et al. (2017)通过对琼北蓬莱地区新生代玄武岩中捕获的尖晶二辉橄榄岩和方辉橄榄岩幔源包体相关研究表明,推测琼北地区被减薄的岩石圈厚度约为 50 ~ 90 km。③ 近年来,还有学者利用瑞利波衰减的方法估算了海南岛及其相邻地区具有一个被减薄的岩石圈厚度,变化于 55 ~ 85 km 之间(Pasyanos et al. , 2014; Dalton et al. , 2017)。以上本文与前人有关海南岛及其邻区岩石圈厚度估算结果,进一步表明海南岛及其邻区的岩石圈发生了明显去根减薄过程,为典型的大陆边缘海过渡带岩石圈减薄区(Zhu Jieshou et al. , 2006),这可能与 中国东部地区晚中生代软流圈大规模上涌,并置换古老克拉通型岩石圈地幔有关(Yan Quanshu et al. , 2007)。

如图 8 所示,海南岛地壳厚度为 30 ~ 34 km (平均值为 32.5 km),结合海南岛岩石圈深度与其温度指数变化模型(图略),本文获得海南莫霍面的温度介于 600 ~ 900 ℃之间。这与 Wang Yang et al. (2011)利用重力均衡原理获得海南岛莫霍面温度大致相当,其中莫霍面最高温度出现在琼东南与

琼西南戈枕印支褶皱造山带内,这与本区地表及其地壳深部存在大量温度高、强烈变形的水平韧性流变层与高温麻粒岩相一致(Chen Xinyue et al., 2006a, 2006a b; Xu Deming et al., 2007)。

5 初步结论

本文在对海南岛高精度航磁异常数据进行了化极和上延处理的基础上,利用功率谱法,反演计算了海南岛居里等温面深度,结合本区已发表的地质-地球物理资料,获得了如下三点初步结论:

(1)海南岛航磁异常特征主要呈现近东西向与北东向,近东西向磁异常带主要反映了古生代末期印支板块与华南板块碰撞、拼合的构造特征;而北东向磁异常带则反映了中生代太平洋俯冲的构造特征;近东西向磁异常带被北东向异常错断和干扰,揭示了近东西向构造带要明显早于北东向构造带。

(2)海南岛居里等温面深度为 16 ~ 35 km,平均深度 25.5 km,其中,琼北新生代陆相火山-沉积盆地居里等温面深度明显偏深,大致与莫霍面深度相当,最深可达 35 km,相对应的大地热流值较低;琼中-万宁与东方-昌江褶皱造山区的居里等温面深度明显偏浅,最浅仅为 16 km,明显低于本区莫霍面深度,相对应的大地热流值较高。

(3)居里等温面深度及其相关参数估算结果表明,海南岛岩石圈厚度为 55 ~ 90 km,为典型的去根减薄的岩石圈,莫霍面的温度为 600 ~ 900 ℃,局部异常高的莫霍面温度可能与本区软流圈地幔置换古老岩石圈地幔提供了热量有关。

致谢:感谢中国地质大学(北京)姚长利教授、张贵宾教授,自然资源航空物探遥感中心黄旭钊教授、于长春教授,中国地质调查局武汉地调中心汪啸风研究员、中国科学院地质与地球物理研究所姜光政助理研究员,中国地质科学院地质研究所田忠华副研究员等专家在本文撰写过程中提供的指导与帮助;感谢海南省地质调查院谢顺盛高级工程师、蔡水库高级工程师在野外调查过程中的帮助;同时感谢两位匿名评审专家提供了宝贵的修改意见。

References

Bansal A R, Gabriel G, Dimri V P, Krawczyk C M. 2011. Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a modified centroid method for fractal distribution of sources: an application to aeromagnetic data in Germany. *Geophysics*, 76 (3): 11~22.

Bansal A R, Anand S P, Rajaram M, Rao V K, Dimri V P. 2013. Depth to the bottom of magnetic sources (DBMS) from aeromagnetic data of Central India using modified centroid

method for fractal distribution of sources. *Tectonophysics*, 603: 155~161.

Baranov V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22(2): 359 ~383.

Bian Zhaoxiang. 1958. Quaternary volcanoes in Hainan Island. *Research on Quaternary of China*, 1 (1): 250 ~ 251 (in Chinese).

Blakely R J. 1988. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 93(B10): 11817~11832.

Bouligand C, Jonathan M G, Richard J. 2009. Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114: 1 ~ 25.

Chao Huixia, Han Xiaohui, Yang Zhihua. 2016. New exploration of geotectonic characteristics of Hainan Island. *Earth Science Frontiers*, 23 (4): 200 ~ 211 (in Chinese with English abstract).

Chen Xinyue, Wang Yuejun, Fan Weiming, Peng Toupeng, Ge Tiehui. 2006a. Microstructure characteristics of NE trend ductile shear zones of southwestern Hainan: Constraints from ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. *Geochimica*, 35(5): 479~488 (in Chinese with English abstract).

Chen Xinyue, Wang Yuejun, Wei Mu, Fan Weming, Peng Toupeng. 2006b. Microstructure characteristics of the NW-trending shear zones of Gongai region in Hainan Island and its ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronological constraints. *Geotectonica et Metallogenia*, 30 (3): 312 ~ 319 (in Chinese with English abstract).

Chiozzi P, Matsushima J, Okubo Y, Pasquale V, Verdoya M. 2005. Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in central-southern Europe. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 152(4): 267~276.

Connard G, Couch R, Gemperle M. 1983. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in central Oregon. *Geophysics*, 48(3): 376~390.

Dalton C A, Bao X Y, Ma Z T. 2017. The thermal structure of cratonic lithosphere from global Rayleigh wave attenuation. *Earth and Planetary Science Letters*, 457: 250~262.

Gao Fanglei, Yang Xiaoqiang, Wu Aiguo, Fu Yangrong, Chen Yuwen. 2009. Characteristics of thermal springs and genesis of thermal underground waters in Hainan Island. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39 (2): 281 ~ 287 (in Chinese with English abstract).

Gao Wei, Shu Qing, Xie Shunsheng, Cai Shuiku. 2016. Aeromagnetic anomalies of Cenozoic volcanic structure in northern Hainan Island and its geological significance. *Geological Review*, 62(1): 235~247 (in Chinese with English abstract).

Guo Zhihong, Yu Changchun, Zhou Jianxin. 2003. The tangent technique of ΔT profile magnetic anomaly in the low magnetic latitude area. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 27(5): 391~394 (in Chinese with English abstract).

Hainan Geological Survey. 2017. *Regional Geology of the Hainan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 309~317 (in Chinese).

Hao Shujian, Gao Huagen, Wang Chunhua. 1982. Isothermal surface of Curie temperature around the Beijing area and its relation to earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 25 (3): 264~269 (in Chinese with English abstract).

Hemant K, Thébault E, Manda M, Ravat D, Maus S. 2007. Magnetic anomaly map of the world: merging satellite, airborne, marine and ground-based magnetic data sets. *Earth and Planetary Science Letter*, 260(1~2): 56~71.

Hou Zhongchu, Li Baoguo. 1985a. Power spectrum methods for direct estimating the depth to the bottom of magnetic source. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 7 (3): 179 ~ 187 (in Chinese with English abstract).

- Hou Zhongchu, Li Baoguo. 1985b. Power spectrum methods for estimating the depths to the top and the bottom of magnetic source. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 7(4): 271~279 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhongchu, Li Baoguo. 1988. Estimating depths and thickness of rock stratum by using the power spectra of potential fields and their derivatives of different order. *Chinese Journal of Geophysics*, 31(1): 90~98 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhongchu. 1989. Method for calculating and compiling the map of curie-point surface. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 11(4): 306~311 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 44(5): 611~626 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xuzhi, Xu Mingjie, Xie Xiaolan, Wang Liangshu, Zhang Qinglong, Liu Shaowen, Xie Guoai, Feng Changge. 2006. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in Northeast China. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(6): 1674~1681 (in Chinese with English abstract).
- Idárraga J, Carlos A. 2018. Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior. *Geodesy and Geodynamics*, 9(1): 93~107.
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892~2910 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Ying, Liang Xirong, Liang Xinquan, Fu Jiangang, Wang Ce, Wen Shunv. 2017. Formation mechanism of East Asia continental margin extensional belt: Evidence from geochemistry study of Hainan mantle xenoliths. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(1): 157~182 (in Chinese with English abstract).
- Lachenbruch A H. 1978. Heatflow in the basin and range province and thermal effects of tectonic extension. *Pure and Applied Geophysics*, 117(1): 34~50.
- Li Chunfeng, Chen Bing, Zhou Zuyi. 2009. Deep crustal structures of eastern China and adjacent seas revealed by magnetic data. *Earth Science*, 39(12): 1770~1779 (in Chinese with English abstract).
- Li Chunfeng, Shi Xiaobin, Zhou Zuyi, Li Jiabiao, Geng Jianhua, Chen Bing. 2010. Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and their tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1229~1247.
- Li Chunfeng, Wang Jian, Lin Jian, Wang Tingting. 2013. Thermal evolution of the North Atlantic lithosphere: New constraints from magnetic anomaly inversion with a fractal magnetization model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(12): 5078~5105.
- Li Chunfeng, Lu Yu, Wang Jian. 2017. A global reference model of curie-point depths based on EMAG2. *Scientific Reports*, 7: 45129.
- Li Guirong, Liu Yizhong, Li Chengli. 2012. Buried depth inversions of the top and bottom of the magnetic geological bodies. *Petroleum Geology and Oil field Development in Daqing*, 31(6): 170~174 (in Chinese with English abstract).
- Li Sunxiong, Wei Changxin, Wang Yanhua, Hu Zailong, Chen Fangying. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications of the middle-high grade metamorphic rocks in the Diaoluoshan area, southeastern Hainan Island. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 798~807 (in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong. 2010. Principal characteristics of the lithosphere of China. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingyi, Sibuet J C, Hsu S K. 2005. Distribution of the East China Sea continental shelf basins and depths of magnetic sources. *Earth Planets Space*, 57: 1063~1072.
- Liu Guangxia, Zhang Xian, He Weimin, Chen Jingxiu, Tang Xifeng. 1996. Research on curie iso-geothermal surface in Bohai Sea and its adjacent region. *Seismology and Geology*, 18(4): 398~402 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tianyou, Zhu Wenxiao, Fang Xiaomei. 1987. An inversion method of the continual model on Curie surface. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 12(6): 647~656 (in Chinese with English abstract).
- Mayhew M A. 1982. Application of satellite magnetic anomaly data to Curie isotherm mapping. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 87: 4846~4854.
- Meng Xiangli. 2012. The velocity structure and structural feature of crust in the northern Hainan region. Master's thesis of East China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Nuri Dolmaz M, Ustaömer T, Hisarlı M Z, Orbay N. 2005. Curie point depth variations to infer thermal structure of the crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey. *Earth Planets Space*, 57: 373~383.
- Okubo Y, Graf R J, Hansen R O, Ogawa K, Tsu H. 1985. Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *Geophysics*, 50(3): 481~494.
- Pasyanos M E, Masters T G, Laske G, Ma Zhitu. 2014. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 2153~2173.
- Ravat D, Pignatelli A, Nicolosi I, Chiappini M. 2007. A study of spectral methods of estimating the depth to bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data. *Geophys. J. Int.*, 169(2): 421~434.
- Ruiz F, Introcaso A. 2004. Curie point depths beneath Precordillera Cuyana and Sierras Pampeanas obtained from spectral analysis of magnetic anomalies. *Gondwana Research*, 7(4): 1133~1142.
- Salem A, Green C, Ravat D, Hemant K, East P, Derek J F, Mogren S, Biegert E. 2014. Depth to Curie temperature across the central Red Sea from magnetic data using the de-fractal method. *Tectonophysics*, 624~625, 75~86.
- Shen Linwei, Yu Jinhai, O'Reilly S. Y, Griffin W L, Zhou Xueyao. 2018. Subduction-related middle Permian to early Triassic magmatism in central Hainan Island, South China. *Lithos*, 318~319, 158~175.
- Shen Ninghua. 1985. Introduction to principle and methods of Curie point calculation by aeromagnetic data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, (2): 89~98 (in Chinese with English abstract).
- Shuey R T, Schellinger D K, Tripp A C, Alley L B. 1977. Curie depth determination from aeromagnetic spectra. *Geophysical Journal International*, 50(1): 75~101.
- Spector A, Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293~302.
- Tanaka A, Okubo Y, Matsubayashi O. 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics*, 306(3): 461~470.
- Thébault E, Christopher C, Ciaran D, et al. 2015. International geomagnetic reference field. The 12th Generation Earth Planets and Space Lett., 67~79.
- Turcotte D L, Schubert G. 2002. *Geodynamics*. Cambridge University Press.
- Wang Bingzhu, Xu Shixin. 1999. A new method for Curie interface depth inversion using ΔT anomaly. *Oil Geophysical Prospecting*, 34(2): 137~147 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Li Chunfeng. 2018. Curie point depths in Northeast China and their geothermal implications for the Songliao Basin.

- Journal of Asian Earth Sciences, 163: 177~193.
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1990. Compilation of heat flow data in China continental area (2nd edition). Seismology and Geology, 12(4): 351~366 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. Seismology and Geology, 30(32): 25~31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, Wang Jiyang. 1990. Basic Characteristics of the Earth's Temperature Distribution in China. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Ma Daquan, Jiang Dahai. 1991a. Geology of Hainan Island (Series 2). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Ma Daquan, Jiang Dahai. 1991b. Geology of Hainan Island (Series 3). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Yang, Cheng Suhua. 2011. Thermal state and rheological strength of the lithosphere beneath the eastern China. Geotectonica et Metallogenia, 35(1): 12~23 (in Chinese with English abstract).
- Wen Shunyü, Pang Chongjin. 2018. Petrogenesis of the Late Permian Daling intrusion on Hainan Island: constraints from in-situ zircon Hf isotopes. Journal of Guilin University of Technology, 38(04): 61~69 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2014. Characteristics of China continent magnetic basement depth. Chinese Journal of Geophysics, 57(12): 3981~3993 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yanyun, Li Zhankui. 2016. Characteristics of Chinese Curie continent point isotherm. Chinese Journal of Geophysics, 59(10): 3604~3617 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Ma Daquan, Zhang Yeming, Fu Taian, Xie Caifu. 2006. Genesis of Qiongzong granolite: constraints of rare earth element geochemistry. Geology and Mineral Resources of South China, (2): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Ma Daquan, Zhang Yeming, Xu Caifu. 2007. Origin and geological significance of granulites from Qiongzong complex. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(1): 39~45 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanshu, Shi Xuefa. 2007. Hainan mantle plume and the formation and evolution of the South China Sea. Geological Journal of China Universities, 13(2): 311~322 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Guangce. 1984. Basaltic petrology of Quaternary in the north of Hainan Island. Earth Science, 24(1): 63~72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Feifei, Wang Yuejun, Chen Xinyue, Fan Weiming, Zhang Yanhua, Zhang Guowei, Zhang Aimei. 2011. Triassic high-strain shear zones in Hainan Island (South China) and their implications on the amalgamation of the Indochina and South China Blocks: Kinematic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. Gondwana Research, 19(2011): 910~925.
- Zhang Peiqin, Zhao Qunyou. 1996. Methods of the magnetic direction transform of aeromagnetic anomalies with differential inclinations in low magnetic latitudes. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 18(3): 206~214 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xian, Zhao Li. 2007. An analysis of the power spectrum for computing field source depths of magnetic bodies of different scales. Geophysical & Geochemical Exploration, 31: 53~56 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Guofeng, Liu Huichuan, Qian Xin, Zhang Aimei, He Jingwen, He Huiying, Wang Yuejun. 2018. Petrogenesis of Late Permian I-type granites in SE Hainan Island and its tectonic implication for paleotethyan evolution, (4): 1321~1332 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jieshou, Cai Xuelin, Cao Jiamin, Yan Zhongqiong. 2006. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas. Geology in China, 33(4): 794~803 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 边兆祥. 1958. 海南第四纪火山. 中国第四纪研究, 1(01): 250~251.
- 晁会霞, 韩孝辉, 杨志华. 2016. 对海南岛大地构造特征的新探索. 地学前缘, 23(4): 200~211.
- 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 彭头平, 葛铁辉. 2006a. 琼西南 NE 向韧性剪切带构造特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 地球化学, 35(5): 479~488.
- 陈新跃, 王岳军, 韦牧, 范蔚茗, 彭头平. 2006b. 海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 大地构造与成矿学, 30(3): 312~319.
- 高芳蕾, 杨小强, 吴爱国, 傅杨荣, 陈育文. 2009. 海南岛温泉特征与地下水热水成因. 吉林大学学报: 地球科学版, 39(2): 281~287.
- 高维, 舒晴, 谢顺胜, 蔡水库. 2016. 琼北新生代火山构造的航磁异常特征及其地质意义. 地质论评, 62(1): 235~247.
- 郭志宏, 于长春, 周坚鑫. 2003. 低磁纬度区 ΔT 剖面磁异常场源深度计算的切线法. 物探与化探, 27(5): 391~394.
- 海南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志 - 海南志. 北京: 地质出版社, 309~317.
- 郝书俭, 高华根, 王春华. 1982. 京津唐地区居里等温面及其与地震的关系. 地球物理学报, 25(3): 264~269.
- 侯重初, 李保国. 1985a. 直接计算磁性下界面深度的功率谱法. 物探计算技术, 7(3): 179~187.
- 侯重初, 李保国. 1985b. 计算磁性体上顶与下底深度的功率谱法. 物探计算技术, 7(4): 271~279.
- 侯重初. 1989. 居里等温面深度图的计算与制作方法. 物探化探计算技术, 11(4): 306~311.
- 侯重初, 李保国. 1988. 利用位场及其高阶导数的功率谱计算岩层的深度与厚度. 地球物理学报, 31(1): 90~98.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版). 地球物理学报, 44(5): 611~626.
- 胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安, 王良书, 张庆龙, 刘绍文, 解国爱, 冯昌阁. 2006. 中国东北地区航磁特征及居里等温面分析. 地球物理学报, 49(6): 1674~1681.
- 姜光政, 高珊, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第四版). 地球物理学报, 59(8): 2892~2910.
- 蒋英, 梁细荣, 梁新权, 付建刚, 王策, 周云, 温淑女. 2017. 海南岛陆缘扩张带形成及新生代岩石圈动力学机制: 来自幔源包体的地球化学证据. 大地构造与成矿学, 41(1): 157~182.
- 李春峰, 陈冰, 周祖翼. 2009. 中国东部及邻近海域磁异常数据所揭示的深部构造. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 39(12): 1770~1779.
- 李桂荣, 刘益中, 李成立. 2012. 磁性地质体顶底界面埋藏深度反演. 大庆石油地质与开发, 31(6): 170~174.
- 李孙雄, 魏昌欣, 汪焰华, 胡在龙, 陈方颖. 2016. 海南岛东南部吊罗山地区中深变质岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 40(4): 798~807.
- 李廷栋. 2010. 中国岩石圈的基本特征. 地学前缘, 17(3): 1~13.
- 刘光夏, 张先, 贺为民, 沈京秀, 唐喜凤. 1996. 渤海及其邻区居里等温面的研究. 地震地质, 18(4): 398~402.
- 刘天佑, 朱文孝, 方晓梅. 1987. 一种连续模型的居里等温面反演方法. 地球科学——武汉地质学院学报, 12(6): 647~656.
- 孟祥丽. 2012. 琼北地区地壳速度结构与构造特征. 东华理工大学硕士学位论文.
- 申宁华. 1985. 用航磁数据计算居里点深度的原理及方法. 物探化探计算技术, (2): 89~98.
- 汪炳柱, 徐世新. 1999. 利用 ΔT 异常反演居里等温面深度的一种新方法. 石油地球物理勘探, 34(2): 137~147.

王钧,黄尚瑶,黄歌山,汪集旻. 1990. 中国地温分布的基本特征. 北京:地震出版社.

汪集旻,黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). 地震地质,12(4):351~366.

汪集旻,胡圣标,庞忠和,何丽娟,赵平,朱传庆,饶松,唐晓音,孔彦龙,罗璐,李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. 科技导报,30(32):25~31.

汪啸风,马大铨,蒋大海. 1991a. 海南岛地质(二)岩浆岩. 北京:地质出版社.

汪啸风,马大铨,蒋大海. 1991b. 海南岛地质(三)构造地质. 北京:地质出版社.

汪洋,程素华. 2011. 中国东部岩石圈热状态与流变学强度特征. 大地构造与成矿学,35(1):12~23.

温淑女,庞崇进. 2018. 海南岛晚二叠世大岭岩体岩石成因:锆石原位 Hf 同位素制约. 桂林理工大学学报,38(04):61~69.

熊盛青,丁燕云,李占奎. 2014. 中国陆域磁性基底深度及其特征. 地球物理学报,57(12):3981~3993.

熊盛青,杨海,丁燕云,李占奎. 2016. 中国陆域居里等温面深度特

征. 地球物理学报,59(10):3604~3617.

徐德明,马大铨,张业明,付太安,谢才富. 2006. 琼中麻粒岩的成因:稀土元素地球化学制约. 华南地质与矿产,(2):1~5.

徐德明,马大铨,张业明,谢才富. 2007. 琼中麻粒岩的成因及地质意义. 岩石矿物学杂志,26(1):39~45.

鄢全树,石学法. 2007. 海南地幔柱与南海形成演化. 高校地质学报,13(2):311~322.

曾广策. 1984. 海南岛北第四纪玄武岩岩石学. 地球科学,24(1):63~72.

张培琴,赵群友. 1996. 低纬度区航磁异常变倾角磁化方向转换方法. 物探化探计算技术,18(3):206~214.

张先,赵丽. 2007. 功率谱用于计算不同尺度磁性体场源深度的分析. 物探与化探,31:53~56.

赵国锋,刘汇川,钱鑫,张爱梅,何景文,何慧莹,王岳军. 2018. 琼东南晚二叠世 I 型花岗岩成因及其构造指示. 地球科学,(4):1321~1332.

朱介寿,蔡学林,曹家敏,严忠琼. 2006. 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义. 中国地质,33(4):794~803.

High precision aeromagnetic characteristics and Curie depth analysis of the Hainan Island

GAO Wei^{*1)}, GUO Zhihong¹⁾, ZHOU Jianxin¹⁾, MENG Qingkui¹⁾, SHU Qing¹⁾, WANG Chun²⁾

1) *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing, 100083;*

2) *China University of Geosciences, Beijing, 100083*

** Corresponding author: gw551121@163.com*

Abstract

Analysis of high precision aeromagnetic data and inversion of Curie isothermal surface in the Hainan Island are of great significance for the study of its deep thermal structure and the adjacent South China Sea continental margin. In this study, the magnetic anomaly characteristics and spatial distribution of the different tectonic units in the island are analyzed by pole and extension processing of aeromagnetic anomaly data. On this basis, the Curie depth distribution is calculated by the power spectrum method inversion. Based on the regional geological evolution, geothermal value, Moho and lithospheric depth changes and seismic sounding profiles of the Hainan Island, the following conclusions are drawn: ① the characteristics of aeromagnetic anomaly in Hainan Island mainly show nearly E-W and NE trend. The nearly EW magnetic anomaly belt is interrupted and disturbed by the NE anomaly belt, indicating that the near E-W trending structural belt is obviously earlier than the NE-trending structural belt. ② The depth of Curie isothermal surface varies from 16 to 34 km, with an average depth of 24 km. The depth of the Qiongbai Cenozoic volcanic-sedimentary basin is obviously deeper, roughly equal to the depth of Moho, and the deepest reaches to 35 km; the corresponding geothermal flow value is relatively lower. ③ The Curie isothermal depth in the Qiongzong-Wanning and the Dongfang-Changjiang folded regions is obviously shallower, the shallowest is only 16 km, which is obviously lower than the Moho depth in this area, and has relatively higher regional heat flow value. ④ Based on the estimation results of this paper and the results of previous studies, it is shown that the lithospheric thickness of the Hainan Island is 55~90 km, which is a typical rootless and thinned lithosphere. The temperature of Moho in the Hainan Island is 600~900 °C, and the locally abnormally high Moho temperature may be related to the heat supplied by the replacement of the ancient lithospheric mantle by the asthenospheric mantle in this area.

Key words: Hainan Island; aeromagnetic anomalies; power spectrum method; Curie point isotherm; deep thermal structure