

南海东北部居里面特征及其石油地质意义*

赵俊峰^{1,2}, 施小斌², 丘学林², 刘海龄²

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 居里面是岩石中铁磁性矿物因温度升高达到居里点而由铁磁性变为顺磁性时的温度界面, 在这个面以下的岩石由于温度超过居里点而被认为几乎无磁性。1985 年中美双船地震扩展排列东剖面(ESPE)和 1993 年中日合作海底地震仪剖面(OBS93)均穿越南海东北部各主要构造带和盆地, 获得了完整的地震及重、磁资料。通过上述剖面的磁测异常反演出其磁居里面, 同时由热流探测资料计算其地温场并从中获取了热居里面(575 °C 等温面)数据(热居里面是笔者相对于磁居里面而提出的一个新概念, 即指由海底热流探测资料经地温场模拟而获得的居里面)。研究结果表明, 两种方法得到的居里面深度在很多地区并不一致, 表现出显著的差异。笔者认为造成这种差异的主要原因在于, 在有可能存在未知热事件的地区, 计算稳态地温场的前提条件并不成立, 因而由这种方法计算出来的热居里面在这些地区并不能真正反映居里面的深度, 从而形成了它与磁居里面的显著差异。通过计算研究区磁及热居里面并根据其差异可以快速判定该区下部是否存在 10Ma 以来的热侵事件以及是否有浅层热源, 这对于研究南海东北部新生代含油气盆地深部结构及沉积充填特征与烃源岩成熟生烃作用以及油气运聚成藏规律和油气资源潜力评价等, 均具有重要的油气地质意义和地球科学意义。

关键词: 南海东北部; 热居里面; 磁居里面; 热均衡模式; 石油地质意义

中图分类号: P738 ; P744 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)01-0126-06

Characteristics and petroleum geological significance of Curie point isotherm in the northeastern South China Sea

ZHAO Jun-feng^{1,2}, SHI Xiao-bin², QIU Xuelin², LIU Hailing²

(1. Dept. of Marine & Geophysics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Curie point isotherm is the temperature isotherm where ferromagnetic minerals in the rocks change from ferromagnetism into paramagnetism because the temperature increases to the Curie point. Below this isotherm, the rocks are thought to be almost non-magnetism because their temperature is higher than the Curie point. Sino-US two-ship expanding spread profiles eastern transect (ESPE) in 1985 and Sino-Japan Ocean Bottom Seismography profile in 1993 (OBS93) crossed the major structural belts and basins in the northeastern South China Sea. Integral gravity, magnetic, heatflow and seismic data were acquired along these profiles. Magnetic Curie point isotherm was obtained by inversion of the magnetic anomalies, and thermal Curie point isotherm (the 575 °C isotherm) was obtained according to the geothermal temperature field calculated from the heatflow survey data. The results showed that the two Curie point isotherms derived respectively from the prior two methods were inconsistent with significant differences in many regions. After analyzing their calculation principle, the authors believed that the reason for these differences was that the prerequisite calculating the stable-state geothermal temperature field was untenable in some areas with possible unknown underground heat events, then the thermal Curie point isotherm derived from this method would not show the actual Curie point isotherm in such areas. In order to explain these differences more clearly, the authors introduced the concept of thermal equilibrium, which showed that the two types of Curie point isotherm were consistent in thermal equilibrium region and inconsistent in thermal disequilibrium region. As a result, they could achieve the

收稿日期: 2009-08-13; 修订日期: 2009-09-14。卢冰编辑

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q05-04)和国家重点基础研究“973”计划项目(2007CB41170104)

作者简介: 赵俊峰(1971—), 男, 河南省郑州市人, 同济大学海洋学院博士, 主要从事非震物探方法研究与数据处理。E-mail: zjf_scsio@vip.163.com

*在本文研究及编写过程中, 得到了中国科学院边缘海地质重点实验室何家雄研究员的热情指导和大力帮助, 在此表示衷心的感谢!

magnetic and thermal Curie point isotherm first in some areas and distinguish the unknown underground heat events from their differences, which has important instructional significance and reference value for the study on regional tectonics, oil and gas geological conditions and resource predictions.

Key words: Northeastern South China Sea; Thermal Curie point isotherm; Magnetic Curie point isotherm; Thermal equilibrium mode; Petroleum geological significance

南海东北部处于欧亚板块、太平洋-菲律宾板块和印度-澳大利亚板块交汇区,是北面的华南陆缘区经历多构造旋回的褶皱带在南海北部海域的自然延伸^[1-2]。独特的构造位置使该区自中生代以来经历了多期复杂的应力变迁,形成了复杂的发育演化史及地质地球物理特征,成为研究边缘海形成演化动力学和特提斯-太平洋构造域相互作用的关键地区之一^[1,3]。该区主构造带呈北东-北东东向展布^[4],从北往南分别为北部断阶带(万山-平潭断阶带)、北部坳陷带(珠一-厦澎湖坳陷带)、中央隆起带(东沙-澎湖隆起带)、南部坳陷带(珠二坳陷-潮汕坳陷)、

南部隆起带和中央海盆区(图 1)。

新生代以来,南海东北部具有典型构造活动区的基本地质地球物理特征,如广泛存在和发育火山岩浆活动、构造变形及深大断裂、频繁的地震活动以及明显的重、磁、热异常等^[1,5]。李平鲁等依据该区岩浆活动形成的时间及空间、岩石学、地球化学特征及同位素资料等综合识别出该区在新生代以来至少发育有 5 期火山岩浆活动^[5,6],分别对应于相应的构造运动事件,故导致该区大地热流值普遍偏高。同时,这些区域构造活动与沉积盆地发育演化及沉积充填特点,亦为该区常规油气资源的形成分

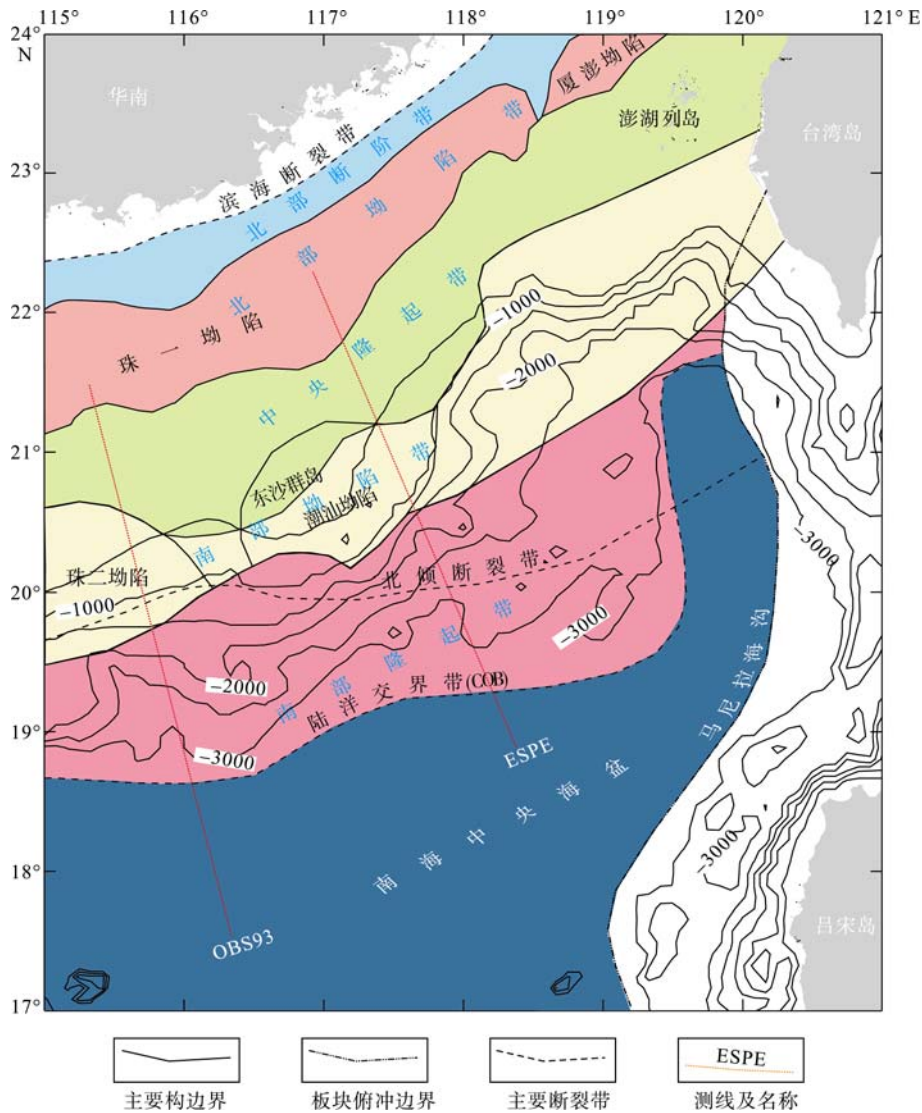


图 1 测线位置及大地构造分区图^[4]
Fig. 1 Location of survey lines and geotectonic divisions^[4]

布和非常规油气资源浅埋藏渗漏型天然气水合物形成及运聚成藏等,奠定了良好的物质基础与油气成藏的基本地质条件。

1985 年中美双船地震扩展排列剖面(ESP)^[7]和 1993 年中日合作海底地震仪剖面(OBS93)^[7]均穿越南海东北部地区各主要构造带,不仅获得了 ESP 地震剖面和 OBS 地震剖面,同时亦进行了重磁测定,获得了质量较好的重磁资料。地震解释及重磁研究表明,在南海北部陆坡区局部存在纵波速度大于 $7.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的透镜状下地壳高速体,并且其在平面上的分布范围与南海东北部磁静区的展布范围有密切关系^[2]。近来的研究成果亦证实^[2,8],该下地壳高速体的纵横波速比值及泊松比均具有洋壳的特征,但其地壳结构又与现代洋壳不同,推测其可能是残存的古洋壳或者是壳幔混合岩体,亦是南海东北部磁静区形成的重要原因。因此,深入分析南海东北部所获双船地震扩展排列剖面(ESP)和海底地震仪 OBS 地震剖面以及磁居里面和热居里面展布特征,对研究南海形成演化与沉积盆地结构及沉积充填特征,乃至对油气生、储盖及运聚成藏的控制作用等,均具有十分重要的地质意义。

1 居里面地质意义及其计算

1.1 居里面的地质意义

居里面又称居里等温面,是岩石中铁磁性矿物因温度升高达到居里点而由铁磁性变为顺磁性时的温度界面。在地质上,通常把居里面做为地球表面磁性层的底界面,在这个面以下的岩石由于温度超过居里点而被认为几乎无磁性。由于居里面既是温度界面又是磁性界面的分水岭,因此,其对沉积盆地结构、沉积充填特征,尤其是地温场及大地热流的影响和制约均非常深刻,进而对油气资源等流体矿产以及其他与磁性有关固体矿产的形成与分布等,均会产生十分重要的作用和影响。须强调指出的是,由于不同矿物的居里点温度略有差异,本研究在计算中一般选取其均值 575°C 为居里点温度。

1.2 磁居里面深度的计算

磁居里面即传统地质意义上所说的居里面,是指由磁力探测资料根据一定的模型反演计算得到的居里面深度。本研究数据采用中美双船扩展排列东剖面(ESPE)和中日海底地震仪探测剖面(OBS93)作业时所获磁测数据。首先对实测磁异常进行化极,而后采用差值场法对实测磁异常进行深源场和浅源场的分离,上延高度取 10km ,把分离后的区域场做

为深源场的效应,采用空间域连续模型居里面反演法分别反演计算出两条剖面的居里面深度^[9]。

假定居里面深度 $H(\quad)$ 由平均深度 D 和相对于平均深度的起伏 $h(\quad)$ 之和组成, \quad , 分别为计算点的横向坐标和垂向坐标,可以表示为:

$$H(\quad)=D+h(\quad)$$

对于 2 维问题,可以方便地计算出该磁性界面在空间某点引起的磁位 $u(x, z)$, 其中 x, z 分别为计算点的横向坐标和垂向坐标,对其求负梯度可得总磁场异常 T , 将 T 离散化,并将 h 表示为有限项傅里叶级数:

$$h_j = A_0 + \sum_{i=1}^K A_i \cos\left(\frac{2\pi j \Delta x_Q}{L} l\right) + \sum_{i=1}^K B_i \sin\left(\frac{2\pi j \Delta x_Q}{L} l\right),$$

其中 K 为最大谐波数, L 为剖面长度, Δx_Q 为基波长度, l 为计算长度, $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$, 其中, M 为观测值个数, N 为离散个数。上式中 A_i, B_i 为傅里叶系数, 令

$A_0 = C_1, A_1 = C_2, \dots, A_k = C_{k+1}, B_1 = C_{k+2}, \dots, B_k = C_{2k+1}$, 则其未知系数 C 的总个数为 $(2K+1)$ 。

利用观测值与模型体的理论值偏差的平方和取极小来求得 $(2K+1)$ 个未知的傅里叶系数并将其代回上述 h_j 的方程中即可求出相对于平均深度 D 的起伏,进而可求出居里面深度 $H(\quad)$ 。

1.3 热居里面深度的计算

热居里面是笔者相对于上述磁居里面而提出的一个新概念,即指由海底热流探测资料经地温场模拟而获得的居里面(575°C 等温面)^[10]。本研究热流资料是将 ESPE 和 OBS93 两条研究剖面附近收集到的位置不规则的热流探测点^[11]垂直投影到相应剖面上获得的。

笔者根据热流资料分别对上述两条剖面进行了一维稳态下的地壳温度场模拟^[10-11],模型厚度为 100km ,上边界取地表常年平均温度 13°C ,下边界取热流边界,计算时通过调整下边界热流值,使得地表计算得到的热流值与实测热流值接近。“热”岩石圈底界为“干”玄武岩的固相线的绝对温度 $T=1050+3z(\quad)$, 其中 z 为计算深度(km)。数值模拟所采用的主要参数见表 1。

笔者从上述地温场模拟结果中提取 575°C 等温线做为上述两条研究剖面的热居里面。

1.4 两种居里面深度的比较

图 2 是 ESPE 剖面磁居里面和热居里面深度计算结果,图 3 是 OBS93 剖面磁居里面和热居里面深度计算结果。从中可以明显的看出。

1) 磁居里面和热居里面深度在不同地段具有不同的关系, 有些地段二者相一致, 有些地段磁居里面高于热居里面, 而有些地段则相反。

2) 北倾断裂带和陆洋交界带(Continent-Ocean Boundary, COB)在这里扮演着比较重要的角色, 似乎具有某种控制作用, 在这些断裂带两侧, 磁居里面和热居里面深度的关系发生了明显的变化。

表 1 一维稳态温度场数值模拟主要参数热导率和生热率
Tab. 1 Main parameters for numerical simulation of 1-D stable-state geothermy temperature field

	热导率($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	生热率($\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
沉积层	2.00	2.04
上地壳	3.15	根据波速与生热率关系
中下地壳	2.50	
地幔	3.40	

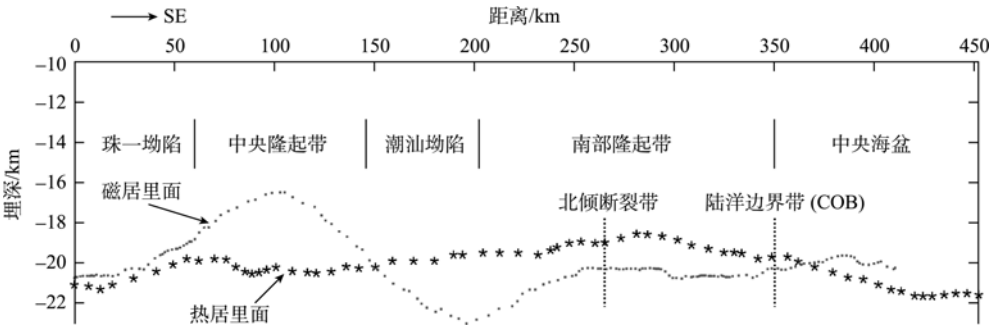


图 2 ESPE 剖面居里面深度
Fig. 2 Curie point isotherm of ESPE

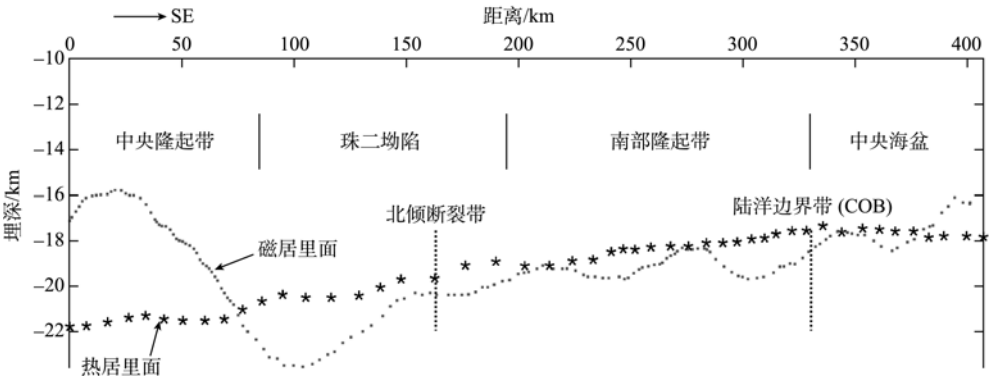


图 3 OBS93 剖面居里面深度
Fig. 3 Curie point isotherm of OBS93

从理论上来说, 无论是磁居里面还是热居里面, 它们反映的其实是地下同一个温度界面, 即居里等温面, 那么, 二者为什么会在很多区域及地段表现出明显的差异呢?

2 磁、热居里面深度差异的原因与热均衡概念的提出

2.1 差异的原因

显然, 磁居里面可以直接反映地球表面磁性层的底界面, 无论什么原因, 只要底界面发生了变化, 我们在地表探测的磁异常都会即时地反映出来。因此, 由实测磁异常得到的磁居里面是能够真实、客观地反映居里面深度变化的^[10]。但热居里面却不同, 它是通过稳态的温度场模型调整底界热流值以拟合地表实测热流而得到的, 其前提条件是地壳深部的热流必须通过某种形式传导到地表并由地表热流探

测到。这个前提条件对于有些地区可能是没有问题的, 但是在以下两种情形下却并不成立, 由此模拟计算出的热居里面当然无法反映真正的居里面变化。

1) 地壳深部存在晚中新世以来(根据 Nissen S S 等 1995 年的研究结果^[7]及作者的初步估算^[10], 这个时间跨度应小于 10Ma)快速热侵入事件。此时, 地壳深部温度场结构已经被改变, 但是由于其深部热流传导到地表需要一定的时间, 在未传到地表前地表热流探测无法反映这些热侵入事件。在这种情形下, 磁居里面要高于热居里面。

2) 存在影响明显的地壳浅层热源。此时, 地表探测得到的热流值将明显高于单纯由深部慢源供热产生的热流值, 由这些探测热流建立的温度场显然与深部温度场实际状况不符。在这种情形下, 磁居里面要低于热居里面。

反过来, 我们可以计算某些区域的热居里面和

磁居里面深度并利用它们的差异推测其可能的地下热状况,这对于研究油气盆地中油气的生、运、聚和储层的成岩-空隙演化及烃源岩成熟度均有重要的指导意义。

2.2 热均衡概念的提出

为了更直观清晰的说明上述造成磁居里面和热居里面深度差异的原因,我们引入了热均衡的概念^[10]。所谓热均衡是指深部幔源热流经过一定地质时期、通过某种方式传导到了地表并可以由地表热流探测到,整个过程可以由一个稳态温度场模型描述;与之相对应的是热不均衡,是指由于存在未知的地下热状况(典型的如深部快速热侵或浅层热源),

使得地表探测热流无法通过一个稳态温度场模型真实反应整个地温场状况。可见,其核心问题是稳态温度场模型的适用性:热均衡状态时,可以用稳态温度场模型描述整个地温场结构,此时,热居里面和磁居里面深度一致;热不均衡状态时,由于无法用稳态温度场模型描述整个地温场结构,由此得到的热居里面当然无法真实反应真正的居里等温面,它与磁居里面自然就会存在差异。图4是热均衡示意图,其中的热不均衡状态采用典型的底部快速热侵事件为代表,可见,由于其深部热流尚未影响到地表,地表探测热流根本无法感知到深部真实状况,与热均衡状态形成鲜明对比。

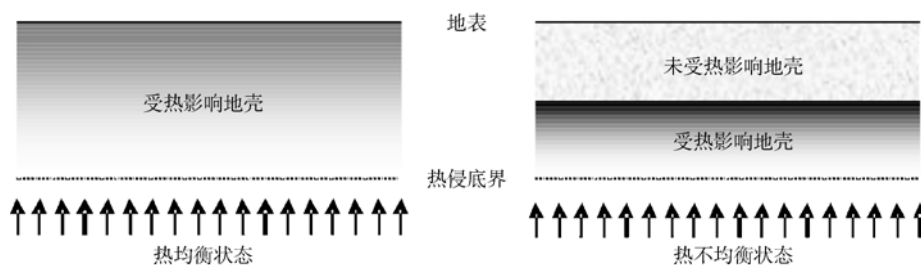


图4 热均衡模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of thermal equilibriums

笔者将它分别应用到 ESPE 和 OBS93 剖面,可以发现,剖面的不同区域及地段具有不同的热均衡状态。

1) ESPE 剖面:

珠一坳陷:热居里面与磁居里面一致,处于热均衡状态。这表明该区地下不存在具有明显影响的未知热状况。

中央隆起带:磁居里面显著高于热居里面,处于热不均衡状态,且可能存在晚中新世以来的快速热底侵事件。

潮汕坳陷:磁居里面显著低于热居里面,处于热不均衡状态,且可能存在具有明显影响的浅部热源。

南部隆起带:以北倾断裂带为界,北侧磁居里面显著低于热居里面,处于热不均衡状态,且可能存在具有明显影响的浅部热源;南部二者基本一致,处于热均衡状态,地下不存在具有明显影响的未知热状况。

中央海盆:磁居里面逐渐高于热居里面且这种差异逐渐增大,表明其处于热不均衡状态,且可能存在晚中新世以来的快速热底侵事件。

2) OBS93 剖面:

中央隆起带:与 ESPE 剖面中央隆起带情况类似。

珠二坳陷:以北倾断裂带为界,北部与 ESPE 剖面潮汕坳陷情况类似,南部与 ESPE 剖面中央隆

起带情况类似。

南部隆起带:与 ESPE 剖面中央隆起带情况类似。

中央海盆:与 ESPE 剖面中央海盆情况类似。

从两条剖面的居里面深度及其分布特征对比可以看出,它们在同一构造单元或主构造带上均具有类似的热均衡状态及其分布特征,这也从一个侧面反映了南海东北部盆地构造所具有的南北分带、东西分块的特征。

3 石油地质意义

根据地热资料和磁测资料可以计算某些区域的热居里面和磁居里面深度,通过分析两者的差异性,并根据热均衡原理预测其深部可能存在的地温场及大地热流分布状况和沉积盆地的热结构特征。在此基础上,笔者分析探讨了区域上地壳深部热作用对沉积盆地地温场及大地热流分布的控制作用,乃至对油气生、储、盖与运聚成藏等基本石油地质条件的重大影响和制约^[12]。

南海北部离散型陆缘盆地在新生代主要发育有三套生烃源岩^[1-2]:断陷期早期始新统—深湖相烃源岩;断陷晚期渐新统河流沼泽相、滨海沼泽相煤系烃源岩及半封闭浅海相烃源岩;裂后坳陷期中新统及上新统底部浅海及半深海相烃源岩。它们的

发育和展布主要取决于盆地区域构造发育演化条件与沉积充填特征。在盆地发育形成的三个阶段: 断陷-断拗发育阶段、拗陷发育阶段和差异性热沉降阶段, 来自地壳深部及盆地底部的加热作用, 对烃源岩有机质成熟生烃作用、油气成因类型及烃类产物、油气藏形成与分布等都会产生重要的影响。

从烃源岩成熟生烃到圈闭聚集成藏的过程中, 油气运移是连接油气生成和聚集成藏的纽带, 其主要的运聚动力主要来自地压场、流体势场及地温场等^[1-2], 尤其是盆地深部热结构所控制的地温场往往能促使烃源岩成熟生烃, 产生异常高温超压作用, 进而影响和决定了油气生、运、聚、散的最终结果, 最终导致和控制了油气藏的形成与破坏^[12-13]。

再者, 盆地深部的热作用对油气储集层亦有重要的影响。根据油气储层形成的地质条件、沉积充填背景及主要控制因素, 南海东北部新生代盆地主要油气储层可划分为碎屑岩储层和碳酸盐岩生物礁滩储层两大类^[1-2]。影响这些不同类型储层的储集物性好坏的成岩作用及成岩后生作用等, 亦受到其深部地温场及大地热流的控制和制约, 高温环境下储集层易发生成岩后生变化, 而常温环境下储集层成岩作用及成岩后生作用较稳定^[14]。

总之, 深入研究区域上磁居里面和热居里面展布的差异性及其热事件, 对含油气盆地深部热结构类型与地温场及大地热流分布的控制和制约作用等, 对于全面系统地分析盆地油气运聚成藏规律及基本成藏地质条件和油气资源潜力评价与预测等,

均具有十分重要的油气地质意义和实际的油气勘探意义。

4 主要结论与认识

1) 计算了研究区所选两条剖面的磁及热居里面, 发现两种方法所得的居里面深度并不一致, 而且这种差异的大小在不同地区也不一样。

2) 分析了造成磁居里面与热居里面深度差异的原因, 引入了热均衡的概念, 认为热居里面在热均衡地区和磁居里面是一致的, 而在非热均衡地区, 由于存在地壳深部热流体的强烈上侵活动, 热居里面则无法真实反映居里等温面, 其与磁居里面的差异是客观存在的。因此, 这种非热均衡作用的结果造成了两种居里面的差异。

3) 通过计算研究区磁及热居里面并根据其差异可以快速判定该区下部是否存在 10Ma 以来的热侵事件以及是否有浅层热源, 这对于研究南海东北部新生代含油气盆地深部结构及沉积充填特征与烃源岩成熟生烃作用以及油气运聚成藏规律和油气资源潜力评价等, 均具有重要的油气地质意义和地球科学意义。

4) 研究结果表明, 南海东北部几个主要的成油构造中, 珠一拗陷处于热均衡状态, 其深部不存在具有明显影响的未知热活动; 珠二拗陷和潮汕拗陷磁居里面显著低于热居里面, 处于热不均衡状态, 推测地下可能存在具有明显影响的浅部热源, 会对盆地油藏品质及运聚规律产生一定的影响。

参考文献

- [1] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 4, 34-63, 68-70.
- [2] 龚再生, 李思田, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-5, 9-26, 96-106, 251-256, 385-405.
- [3] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 255-260.
- [4] 夏戡原, 黄慈流, 张毅祥, 等. 南海东北部与台湾间的构造及海洋地球物理研究[R]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2004.
- [5] 何家雄, 施小斌, 阎贫, 等. 南海北部边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 129-135.
- [6] 李平鲁, 梁慧贤. 新生代岩浆活动与盆地演化、油气聚集的关系[J]. 广东地质, 1994, 9(2): 23-34.
- [7] NISSEN S S, HAYES D E, YAO BOCHU, et al. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea[J]. J Geophys Res, 1995, 100(B11): 22447-22483.
- [8] 阎贫. 海底地震仪记录中的横波. 海洋地质与第四纪地质. 1998, 18(1): 115-118.
- [9] 刘天佑, 等. 海洋重磁资料处理系统[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2000.
- [10] 赵俊峰. 南海东北部高磁带及磁静区地球物理场特征与南海构造演化的关系[D]. 上海: 同济大学海洋学院, 2006.
- [11] 施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海热流特征及其构造意义. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 63-73.
- [12] 何家雄, 陈胜红, 刘海龄, 等. 南海北部边缘盆地区域地质与油气运聚成藏规律及特点[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(5): 91-98.
- [13] 何家雄, 夏斌, 王志欣, 等. 南海北部边缘盆地西区油气运聚成藏规律与勘探领域及方向[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 12-18.
- [14] 何家雄, 李明兴, 陈伟煌, 等. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(6): 29-43.