

doi:10.3799/dqkx.2011.099

南沙海槽前陆盆地热流变结构

马辉^{1,2}, 许鹤华^{1*}, 施小斌¹, 陈爱华^{1,2}, 刘唐伟^{1,2}

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. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 为了研究南沙海槽前陆盆地深部岩石圈的热力学性质,在前人所做的地质与地球物理研究工作的基础上,结合各种岩石热力学流变参数,采用有限元分析方法,计算了现今构造逆冲之后和中中新世—全新世逆冲过程活跃时两种状态下的深部岩石圈二维温度场和流变结构。模拟计算表明,南沙海槽前陆盆地地幔热流贡献达60%~70%,大地热流受深部地幔控制。逆冲推覆构造作用使盆地逆冲推覆带地表热流显著升高了15%~25%,达到70~75 mW/m²。盆地沉积层温度在200℃以内,莫霍面温度420~500℃,地壳地温梯度25~30℃/km,盆地热岩石圈厚度为80 km左右,横向上变化幅度不大。南沙海槽前陆盆地深部岩石圈流变性具有明显的分层特性,为典型的“三明治”结构。盆地岩石圈综合强度由南沙海槽向逆冲推覆带方向呈下降趋势,盆地力学岩石圈厚度50 km左右,有效弹性厚度为30~32 km。通过模拟盆地深部岩石圈热流变结构,揭示了盆地深部岩石圈具有强地幔、弱地壳的流变学特征,表现为高强度块体。同时南沙海域地震活动与深部岩石圈热结构、热活动和岩石圈综合强度密切相关。地壳内热构造活动弱、岩石圈强度大可能是区域地震很少发生的重要原因。

关键词: 南沙海槽; 岩石圈; 温度场; 流变结构; 地震; 有效弹性厚度; 海洋地球物理。

中图分类号: P738.6 **文章编号:** 1000-2383(2011)05-0939-10 **收稿日期:** 2011-05-28

Lithospheric Thermal-Rheological Structure of Nansha Trough Foreland Basin in South China Sea

MA Hui^{1,2}, XU He-hua^{1*}, SHI Xiao-bin¹, CHEN Ai-hua^{1,2}, LIU Tang-wei^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to study the lithospheric thermodynamic properties of Nansha trough foreland basin, we simulate the deep lithosphere temperature field and rheological structure during the thrust faults tectonic activities from Middle Miocene to Holocene and after thrusting (static) in the basin using the finite element method, based on previous studies of geological and geophysical data together with a variety of rock thermodynamic parameters. Simulation results indicate that heat flow contribution from mantle reaches 60%—70% of surface heat flow which is controlled by deep mantle in Nansha trough foreland basin. Thrusting movements increase the surface heat flow in thrust-slip fault belts by 15%—25% to 70—75 mW/m². Our results also show that the temperature of sedimentary layer is less than 200℃, while the temperature at Moho varies from 420 to 500℃; crust geothermal gradient ranges from 25 to 30℃/km. And calculated thickness of thermal lithosphere is about 80 km, which varies slightly laterally. The lithosphere in Nansha waters shows obvious rheological stratification properties, as a typical “sandwich” structure. Horizontally, lithosphere strength decreases in the direction from Nansha trough to thrust belt (NW to SE). The thickness of mechanical lithosphere is about 50 km and the effective elastic thickness ranges from 30 to 32 km. The simulated thermal lithosphere rheological structure also reveals that lithosphere of Nansha basin has rheological characteristics of strong mantle and weak crust, acting as high-strength block. Earthquake activities of Nansha waters are closely related to thermal structure, thermal activity and integrated strength of lithosphere. The weak thermal activity in the crust and high lithosphere strength may be important reasons for rare earthquake occurrence in this area.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目 (No. KZCX2-YW-Q05-04); 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (No. 2007CB41170405); 国家高技术研究发展计划“863”课题 (No. 2008AA09Z306)。
作者简介: 马辉(1987—),男,硕士研究生,从事盆地构造分析及地球动力学演化数值模拟研究。* 通讯作者: 许鹤华, E-mail: xhhcn@scsio.ac.cn

Key words: Nansha trough; lithosphere; temperature field; rheological structure; earthquakes; effective elastic thickness (T_e); marine geophysics.

沉积盆地的沉积沉降、构造抬升剥蚀以及岩浆活动等浅部构造演化特征,不仅是上部地壳或基底脆性变形的结果,更主要是深部岩石圈地壳和上地幔的热活动及其流变性质作用的结果(Shi *et al.*, 2000; 欧新功等, 2006). 岩石圈热流变结构直接影响岩石的物理性质,控制着化学反应的类型和速度,制约着岩石圈的发展和演化(吴耀等, 2005),深入研究岩石圈热流变学结构有助于揭示构造应力场下岩石圈的变形行为以及盆地形成演化等动力学过程,是探讨建立盆地成因模式的基础. 深部热活动与油气的生成和运移息息相关,因此地热研究为盆地油气资源评价和勘探提供了基础. 近年来,一些学者就地震活动和岩石圈流变性质关系做了大量研究,推测地震活动与深部流变性质变化和热作用关系密切(Maggi *et al.*, 2000; Watts and Burov, 2003; Burov, 2010),而安美建和石耀霖(2007)认为岩石圈内部热活动是地震活动的重要动力源. 岩石圈有效弹性厚度(T_e)与岩石圈的热流变学结构和岩石圈结构关系密切,是岩石圈在地质时间尺度内对负载的响应,这反映了岩石圈抵抗变形的能力,是岩石圈综合强度的体现(Liu *et al.*, 2005). 模拟计算有效弹性厚度(T_e)可以量化评估岩石圈的综合强度并能有效地反应岩石圈热力学性质. 同时 T_e 是前陆盆地沉降与演化研究的一个重要内容,普遍认为大陆岩石圈最好的观测处是在逆冲褶皱冲负载作用发育的前陆盆地(Watts, 1992).

国内对岩石圈热力学性质演化相关方面的研究,主要集中在华北、西北大陆和南海北部等区域(王良书等, 1996; 张健和宋海斌, 2001; Shi *et al.*, 2002; Zang *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2005; 刘绍文等, 2008),而对南海南部海域盆地岩石圈热流变学性质的研究较少. 南沙海槽前陆盆地是南海南部典型的挤压环境下形成的,流变学和热状态应有其特殊性,而热流变特征可能记录了盆地演化和岩石圈动力学信息. 本文试图通过模拟计算南沙海槽前陆盆地的热流变结构和有效弹性厚度,了解南沙海域的动力学演化特征,并探讨区域地震与深部岩石圈流变性质的关系. 南沙海槽前陆盆地是新生代沉积盆地,区域构造复杂,油气资源丰富,研究该区岩石圈流变结构可为我国未来进一步研究南海南部的构造和油气等海洋资源开发提供参考.

1 地质与地球物理背景

南沙海槽前陆盆地位于南海南沙群岛和沙巴陆架之间,其范围包括文莱—沙巴盆地陆坡逆冲推覆带和现在的南沙海槽盆地(吴世敏等, 2004),其地形和位置见图 1. 大地构造上,南沙海槽前陆盆地处于欧亚板块、太平洋—菲律宾板块和印—澳板块 3 大板块交汇中心,以及太平洋构造域与特提斯构造域的联结地带. 其地质构造复杂,油气等海洋资源也非常丰富(Zhou and Yao, 2009). 盆地西南以廷贾走滑断裂与曾母盆地相隔,向东北一直延伸到巴拉巴克断裂. 南沙海槽前陆盆地水深为 2 000~3 000 m,呈北东—南西向展布. 受新生代晚期加里曼丹岛逆时针旋转(Morley, 2002)和抬升作用(Hutchison, 2004)的影响. 南沙海槽前陆盆地内部发育中新世之后的挤压逆断层,逆冲断裂规模巨大,以近东西向和北东向生长性逆断层为主,并发育与之伴生的滚动背斜和挤压背斜,形成了南沙海槽南缘由 5~7 个平均长约 10 km 的推覆单元组成的褶皱逆冲推覆带(Hall, 2002; Morley, 2009). 根据挤压断层相关褶皱理论,对中国科学院南海海洋研究所南沙专项调查获得的 94N05 地震测线中的逆冲推覆构造进行研究分析,确定了数条前展式逆冲断层(Piggy-back

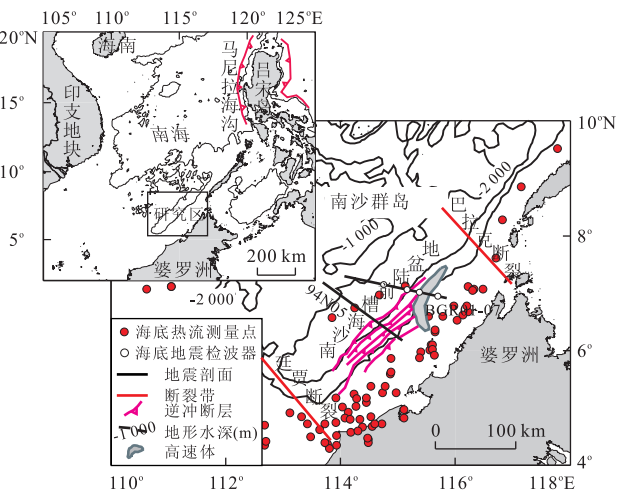


图 1 南沙海槽前陆盆地地理位置、区域构造及热流测点分布(构造和 BGR01-07 测线根据 Franke *et al.*, 2008; Hesse *et al.*, 2010 修改)

Fig. 1 Sketch map of tectonic and topographic map of Nansha trough foreland basin in South China Sea

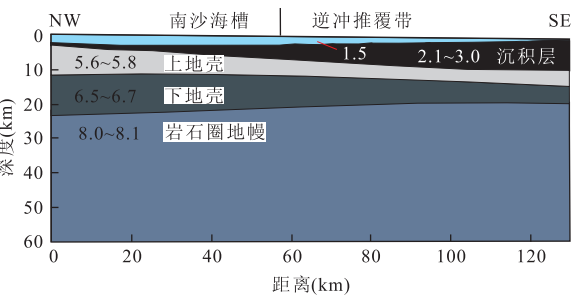


图 2 南沙海槽前陆盆地 94N05 测线的剖面地壳结构
Fig. 2 Crust structure of line 94N05 profile of Nansha trough foreland basin

图中数字为岩石圈各层地震 P 波速度,单位为 km/s,波速据苏达权等(1996)和 Franke *et al.* (2008)修改

thrust fault)发育的时间是由东南向西北逐渐变新,褶皱、逆冲断层发育在中中新世—第四纪. 逆冲和挤压构造使区域地壳缩短约 17 km,平均缩短速率约 1.4 mm/a (吴世敏等, 2009. 国家自然科学基金“*No. 40576025*”“南沙海槽前陆盆地构造演化和成因”结题报告). 这将作为下文中模拟逆冲挤压推覆作用对岩石圈热流变结构影响的构造活动背景.

多道反射地震、深部折射地震和重磁等地球物理资料揭示,盆地沉积基底为晚中生代和古近纪岩石,沉积盖层由三角洲相陆坡扇碎屑浊流沉积物和深海沉积组成. 靠近婆罗洲方向基底埋深较大,最深达到 9~10 km,向南沙海槽方向逐渐变浅,至南沙群岛海域基底埋深仅 1~3 km. 南沙海槽前陆盆地深部是陆缘减薄地壳,上地壳底部埋深 12~14 km, P 波波速为 5.6~5.8 km/s;下地壳厚度为 7~10 km, P 波速度为 6.5~6.7 km/s;全区地壳厚度为 18~24 km (苏达权等, 1996; Franke *et al.*, 2008). 总体而言,在南沙海槽区域地壳厚度小,向两侧其厚度逐渐增加(图 2).

2 岩石圈热流变结构方法

2.1 热模型

岩石圈热结构是指地球内部热量在壳幔的配分比例、热导率、生热率等热学参数在岩石圈中的分布特征及温度分布,对研究岩石圈热史、浅部盆地构造演化、区域地球动力学机制和含油气盆地演化过程都具有重要意义. 当岩石圈的组成、结构一定时,其流变性质和动力学性质主要受热状态影响 (Shi *et al.*, 2000).

岩石圈内热传导是热传递的主要机制,要定量

描述这种热传递过程并计算岩石圈深部温度分布,最好是从求解三维的稳态热传导方程出发. 这需要生热率、热导率以及大地热流等参数的三维分布数据. 然而由于南海实测热流点分布不均,岩石圈深部各热参数不易测量,上述要求很难达到. 本文采用基于有限元方法的商业软件 FEPG 来求解二维热传导方程,模拟计算南沙海槽前陆盆地深部温度场. 在基本模型中,岩石圈剖面划分为岩石圈地幔、下地壳、上地壳、逆冲推覆带、南沙海槽沉积这 5 个块体. 沿 94N05 测线的剖面的逆冲推覆带由 5 个逆冲推覆体组成,在模型中考虑了地壳的放射性生热、逆冲断层的摩擦生热和推覆体内的剪切变形生热. 为了达到模拟目的,我们采用 1 856 (26×56) 个 4 节点四边形单元对整个岩石圈剖面进行网格化(图 3). 类似 Zhou *et al.* (2003) 所采用的处理方式,本文取 Moho 面向下 60 km 等厚深度为岩石圈地幔,并作为热结构模型底界面. 模型上边界取实测海底表面沉积温度 4℃;取 1 300℃作为岩石圈温度底部边界. 要计算南沙海槽前陆盆地的温度结构,还需要了解大地热流、生热率(A)、热导率(K)的分布.

南海南部海域热流数据来源于前人钻井和海底热流探针测量数据 (Shi *et al.*, 2003), 我们将 94N05 地震测线剖面附近的实测热流值投影到测线上,得到沿测线分布的大地热流(图 4a). 南海南部的大地热流分布表明各盆地地表热流分布不均一,南沙海槽前陆盆地热流值较低,一般在 55~65 mW/m²,平均大地热流值约为 62 mW/m². 本文将模拟反演逆冲构造活动过程中热流分布,并对比分析逆冲过程中和逆推之后静态下深部热流变结构特征.

本文把南沙海域地壳分为沉积层、UTK 层(沉

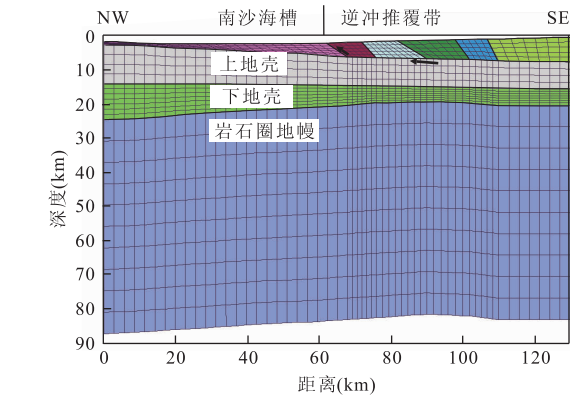


图 3 94N05 测线的剖面网格化(剖面位置见图 1)
Fig. 3 Map of grid of line 94N05 profile

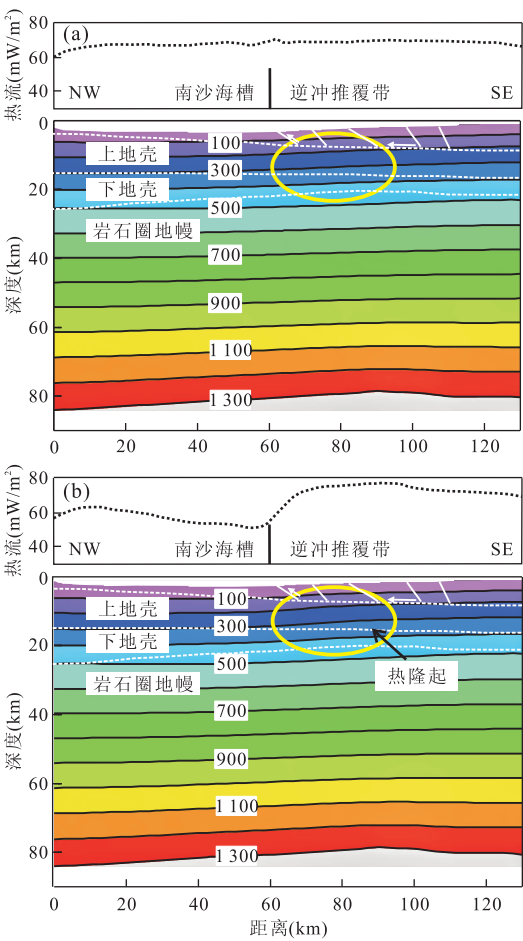


图 4 岩石圈现今静态(a)和考虑中新世—全新世逆冲推覆作用后(b)的温度场图

Fig. 4 Temperature fields of deep lithosphere including static (a) and thrusting in process (b)

图中黑色虚线为热流值;黑色实线为温度界面,单位为 $^{\circ}\text{C}$;白色实线代表逆冲断层;白色点线是岩石圈层圈界面;白色箭头代表逆冲断层活动方向

积基底到上地壳界面)以及下地壳 3 段,并分别计算生热率. 根据南海北部珠江口盆地钻井实测的平均生热率,近地表新生代沉积物的生热率为 $2.04\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Shi *et al.*, 2002). UTK 层生热率,采用基于全球统计数据得出的生热率随深度指数衰减的生热率变化模型来计算.

$$A(Z) = A_0 \exp(-Z/D), \tag{1}$$

其中, A_0 为地表生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$); D 是对数衰减量; Z 为特征深度 (km). 下地壳取常数值 $0.3\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$. 岩石圈上地幔生热率值很小 ($\sim 0.01\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$), 对整个区域的温度结构影响不大. 因此, 本文计算中不考虑其生热贡献.

岩石热传导率也是热结构模拟中一个很重要的岩石热物性参数. 岩石热导率可以在实验室对岩石

样品进行热导率测定,也可以在钻孔内进行原位测量,而对于地下较深的地质单元,直接获得热导率还有一定困难. 本文中新世代沉积物热导率采用南海北部海底钻井取样测定得到热导率为 $2.0\text{ W}/\text{mK}$ (Shi *et al.*, 2002). 深部地壳热导率无法实现采样测定,本文采用了最近国内外研究常用的热导率—温度关系式: $K = K_0/(1+CT)$, 式中 K_0 为表面热导率值, C 是拟合常数. 用于计算中的岩石圈各层 K_0 和 C 的赋值详见表 1.

表 1 热导率相关参数 K_0 和 C 值

Table 1 Parameter values K_0 and C associated with the thermal conductivity

层位	$K_0(\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1})$	$C(\text{K}^{-1})$
沉积层	2.0	0
UTK 层	3.0	1.5×10^{-3}
下地壳	3.0	1.5×10^{-3}
岩石圈上地幔	2.5	-4.0×10^{-3}

注:UTK 层、下地壳、岩石圈上地幔的 K_0 按文献 Liu *et al.* (2005).

结合边界条件、大地热流、热导率、生热率等控制参数和稳态热传导方程(公式 1),可以计算得到南海海槽前陆盆地深部岩石圈热结构和热流分布.

2.2 岩石圈流变结构模拟

以上述方法计算获得岩石圈温度场为基础,通过分层流变学来计算岩石圈随深度变化的力学强度,并以此深入研究盆地演化和岩石圈动力学特征. 与早期的艾利模型和弹性板模型相比,岩石圈分层流变学模型拟合的结果更符合岩石圈实际情况,热流变模型强调岩石圈并不是一个线弹性体,而是强度与深度变化相关的复杂流变体. 岩石圈非线性弹塑性分层流变学性质与其自身组成成分、温度、压力以及应变速率有关.

岩石圈强度是由它本身组成岩石的脆性和韧性决定的,或者是由控制岩石脆性变形的偏应力 σ_b 和使岩石圈韧性变形的偏应力 σ_d 来确定 (Shi *et al.*, 2000). 当岩石圈温度和压力相对较低,偏应力 σ_b 小于 σ_d ,且岩石圈深部岩石以脆性变形为主时,满足线性摩擦破裂准则 (Ranalli and Murphy, 1987).

$$\sigma_b = \sigma_1 - \sigma_3 = \beta(\rho_c - \rho_w)gz, \tag{2}$$

其中, σ_1 和 σ_3 分别为最大与最小主压应力; g 为重力加速度; z 为深度; ρ_c 是地壳密度; ρ_w 为海水密度. 本文假定孔隙流体处于静水压力状态; β 为断层类型参数,可以为 3, 1.2, 0.75, 分别对应于逆冲断层、走滑断层、正断层. 如果考虑岩石圈组成和密度的不

均一性,上式可以改写为(Shi *et al.* , 2000):

$$\sigma_b = \sigma_1 - \sigma_3 = \beta(gz)(1 - \lambda) \int_0^z \rho(z) dz, \quad (3)$$

其中, λ 为孔隙流体压力与上覆压力比; $\rho(z)$ 为随深度变化的岩石密度. 根据 Franke *et al.* (2008) 重力异常处理结果和地震资料数据,取海水密度为 $1\,030\text{ kg/m}^3$,上地幔岩石圈密度为 $3\,350\text{ kg/m}^3$,上地壳和下地壳平均密度分别取 $2\,600$ 和 $2\,930\text{ kg/m}^3$.

而当岩石圈温度、压力相对较大,偏应力 σ_b 大于 σ_d 时,岩石发生稳态蠕变韧性变形. 在应变速率一定的情况下,岩石圈强度随温度升高而迅速下降,满足幂指数定律(Ranalli and Murphy, 1987; Burov and Diament, 1992):

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A}\right)^{1/n} \exp\left(\frac{Q}{nRT}\right), \quad (4)$$

其中, σ_d 是韧性变形屈服极限; $\dot{\epsilon}$ 是应变速率,南沙海域岩石圈应变速率没有实测数据,地质尺度的应变速率范围 $10^{-11} \sim 10^{-17}\text{ s}^{-1}$ (Shi *et al.* , 2000),本文取 10^{-14} s^{-1} ; A 和 n 是蠕变参数; Q 为激活能; R 为气体常数,等于 $8.134\,47\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$; T 为岩石绝对温度,由上述温度场决定.

岩石圈综合强度由一定深度的流变性质最弱部分的岩石偏应力大小确定. 在偏应力 σ_b 等于 σ_d 时,称为岩石圈脆韧转换带(BDT),脆韧性转换带是岩石圈各层强度最大的区域. 以超基性矿物为主的岩石圈上地幔比富硅质地壳的抗蠕变性高得多. 受岩石圈地壳厚度和地温梯度控制,岩石圈中可能存在多个脆韧性转换带(BDT)(Williams *et al.* , 2011). 岩石圈总强度随深度变化的规律可以定义为(Williams *et al.* , 2011):

$$S = \int_0^{T_m} z(\sigma_1 - \sigma_3) dz, \quad (5)$$

其中, T_m 是力学岩石圈界面深度,通常定义岩石圈强度 $10 \sim 50\text{ MPa}$ 的深度,且对应于 $900 \pm 100\text{ }^\circ\text{C}$ 之间的等温层,本文取 10 MPa 作为力学强度界面; S 是厚度; T_m 的岩石圈总强度(Zhou *et al.* , 2003).

岩石圈力学性质由组成岩石的矿物决定,岩石矿物性质又与构造、温度、压力、应变速率等有关,而流变参数能反应岩石矿物所处温度、压力等特征,所以流变参数的选择尤为重要. 我们把区域岩石圈分为上地壳、下地壳和岩石圈上地幔 3 层,各层流变参数如表 2 所示.

2.3 有效弹性厚度

岩石圈有效弹性厚度(T_e)定义为岩石圈板块中实际应力分布所产生弯矩相等的理论弯曲弹性薄

表 2 岩石圈各层流变参数(据 Fernández and Ranalli, 1997)

Table 2 Flow law parameters of lithosphere					
层位	材料	$A(\text{MPa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1})$	n	$Q(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	
上地壳(沉积层)	石英岩	1×10^{-6}	2.8	150	
下地壳	石英闪长岩	3.2×10^{-3}	3.2	270	
岩石圈上地幔	橄榄岩	3.2×10^4	3.5	535	

板厚度,标志着在地质时间尺度内岩石承受超过 100 MPa 压力时发生弹性行为和蠕变行为转变的深度(付永涛等,2000). 大范围内岩石圈板块在水平作用力和垂向负载作用下产生弯曲,这种弯曲靠岩石圈板块内的弹性应力支撑,与这种支撑应力等效的岩石圈板块厚度即岩石圈有效弹性厚度. 作为一个有效定量研究岩石圈力学性质的工具,如果不考虑岩石圈弯曲,有效弹性厚度(T_e)等于力学岩石圈厚度(T_m),而考虑岩石圈弯曲时, T_e 相对 T_m 会显著减小(Williams *et al.* , 2011). 有效弹性厚度并不对应于一个等温面或者物理界面,而反映现今岩石圈抵抗变形的能力和岩石圈脆性、韧性、弹性流变性质的综合强度(McNutt, 1990).

计算岩石圈 T_e 的方法很多,如导纳法、相关性法和正演法等(付永涛等,2000; 赵俐红等,2004). 岩石圈壳、幔状态(去耦或耦合)对区域岩石圈有效弹性厚度 T_e 有一定影响(Burov and Diament, 1995). 在岩石圈热流变结构的基础上,岩石圈壳幔解耦时岩石圈有效弹性厚度可以利用类似于多层弹性板模型来确定,多层弹性板的弹性厚度 T_e 可以由下式确定(Burov and Diament, 1995).

$$T_e = \left(\sum_{i=1}^n \Delta h_i^3\right)^{1/3}, \quad (6)$$

其中, Δh_i 是第 i 层的力学厚度分量. 例如,如果岩石圈壳幔去耦,地壳力学厚度为 h_1 ;地壳厚度为 h_c ;地幔厚度埋深为 h_2 ,则:

$$T_e = [h_1^3 + (h_2 - h_c)^3]^{1/3} \approx \max(h_1, h_2 - h_c). \quad (7)$$

如果地壳有效弹性厚度 h_1 等于 $h_2 - h_c$,则 $T_e = 1.26(h_2 - h_c)$;如果 h_1 只有地幔部分分量的一半大,则 $T_e = 1.04(h_2 - h_c) \approx h_2 - h_c$. 而当地幔地壳耦合的岩石圈($h_1 > h_c$), T_e 等于地幔埋深深度 h_2 (Burov and Diament, 1995). 利用这种方法并结合板内地震资料求得欧亚大陆岩石圈的有效弹性厚度与利用挠曲模型得到的正演结果进行对比,发现两者是一致的,表明这种方法是可行的(Cloetingh and Burov, 1996; Liu *et al.* , 2005). 本文也将利用这种方法以及南沙海槽前陆盆地热流变结构对区域有效弹

性厚度和岩石圈性质进行研究。

3 结果与讨论

本文采用上述二维热传导等公式及相关数据参数,计算分析了南沙海槽前陆盆地深部热流特征和热流变结构。结果表明:现今南沙海槽前陆盆地地表热流均值为 62 mW/m^2 ,说明区域处于热恢复状态。南沙海槽前陆盆地地幔热流值处于 $35 \sim 42 \text{ mW/m}^2$ 之间,占大地热流比例 $60\% \sim 70\%$;地壳贡献热流在地表大地热流中所占比例相对较小,最多不超过 38% 。说明南海南部大陆边缘盆地热流主要来自于深部地幔的贡献,区域地表热流受地幔热流控制。对比图 4a、4b 中热流变化特征:经中中新世—全新世构造逆冲后,地表热流发生了变化,其中南沙海槽以北(包括盆地)的大地热流均值在 60 mW/m^2 左右;而盆地前陆区大地热流显著升高,普遍达到 $70 \sim 75 \text{ mW/m}^2$,挤压逆冲构造活动使南沙海槽前陆盆地逆冲推覆挤压带区域的大地热流升高了 $15\% \sim 25\%$ 。从图 4a 来看,逆冲推覆带形成且热恢复后,南沙海槽前陆盆区域热流变化并不明显,逆冲构造作用导致的加厚地壳(包括沉积层)生热贡献很小。所以导致热流升高的热源主要来自于逆冲构造发育时推覆体之间摩擦和内部剪切变形作用贡献,地壳增厚也起一定的作用。

从岩石圈温度结构来看(图 4a、4b),新生代沉积温度在 200°C 以内,地温梯度约为 28°C/km ,上地壳底部温度介于 $300 \sim 380^\circ\text{C}$,主要与界面埋深有关;莫霍面温度大部分在 $420 \sim 500^\circ\text{C}$ 之间变化,最小值在盆地中部前陆逆冲推覆体下,向两侧温度逐渐升高;地温梯度 $25 \sim 30^\circ\text{C/km}$;热岩石圈厚度约为 80 km ,底部界面深度在 $80 \sim 85 \text{ km}$ 之间,变化幅度不大。很明显,深部热结构与地壳结构和大地热流密切相关。分析对比现今逆冲之后静态与逆冲过程中的深部岩石圈温度场发现,后者逆冲前缘可见逆冲推覆造成从沉积层底部到地幔顶部较为明显的热隆起构造(图 4b),逆冲挤压作用普遍使地壳内温度场造成一定扰动,而岩石圈地幔未受影响仍处于热稳定状态,这可能是因为逆冲断层主要发育在盆地浅部数公里厚的中新世沉积层以及构造活动规模较小。同时区域热隆起也促使局部逆冲构造更加强烈,并使逆冲推覆带地表热流显著升高。

类似于台湾前陆盆地流变结构研究(Zhou *et al.*, 2003),本文同时考虑了挤压和拉伸应力背

景。对浅层变形而言,前者在逆冲推覆带占主导作用,而拉伸作用在沉积盆地起主导地位。根据 Burov and Diament(1995)流变理论计算沿 $94\text{N}05$ 测线的剖面表征岩石圈强度的应力包络面(YSE)。受逆冲推覆构造活动规模限制,逆冲断层活跃期和现今深部岩石圈流变结构十分相似,如图 5 所示。岩石圈流变结构图显示,岩石圈流变结构自上而下可分为 3 个脆性层和对应的 3 个韧性变形层,具有明显的流变分层特性,为典型的“三明治”结构。在张性应力状态下的南沙海槽区域,岩石圈各脆性厚度为 $9, 5, 8$ 和 12 km ,分别对应于上地壳、下地壳和上地幔。在压性应力环境下,地壳脆性破裂带范围大幅度减小,综合强度由南沙海槽到逆冲推覆带方向呈下降趋势,上地壳脆性层厚度 $5 \sim 6 \text{ km}$,逆冲推覆带下部地壳丧失了力学强度,完全表现为韧性(图 $5b_4, 5b_5$),这可能是地壳内热构造隆起作用的结果。压力环境下岩石圈上地幔脆性层厚度变化不大,平均约 10.6 km (图 5)。从图中可以看出南沙海槽前陆盆地深部力学岩石圈厚度为 $50 \sim 53 \text{ km}$,对应于 900°C 的温度界面。

计算得到南沙海槽前陆盆地有效弹性厚度在 $30 \sim 32 \text{ km}$ 之间(公式 6),逆冲推覆构造活动导致逆冲推覆带弹性厚度值比南沙海槽盆地 T_c 小 2 km 左右。与南海北部海域深部岩石圈估算的有效弹性厚度相比(11 km)偏大(Lin and Watts, 2002),原因可能是深部岩石圈上地幔没有实测数据约束而直接赋值产生,考虑到计算的有效弹性厚度值在合理范围之内,仍然可以用来评估岩石圈综合强度。当有效弹性厚度 T_c 大于地壳厚度和脆韧性转换深度(BDTD)时,岩石圈地幔对岩石圈总强度的贡献将大于上部地壳贡献,此时岩石圈上地幔橄榄岩的流变学性质控制了整个岩石圈流变属性;若 T_c 小于地壳厚度且接近壳内脆韧性转换深度,则地壳提供了整个岩石圈的力学强度,此时地壳内长英质物质的流变学控制了岩石圈的流变学行为(刘绍文等, 2008)。南沙海槽前陆盆地岩石圈流变学特征表明,南沙海域岩石圈有效弹性厚度值均大于相应的地壳厚度和壳内脆韧性转换深度(图 5)。这就说明盆地岩石圈上地幔具有较高的强度,提供了岩石圈的大部分强度。岩石圈综合强度大,具有强地幔、弱地壳的流变学特征,表现为高强度块体。

地震活动程度也可以反映岩石圈的综合强度,它是岩石圈脆性层发生不稳定摩擦破裂滑动的非弹性变形的现象。Maggi *et al.* (2000)等认为大陆地震

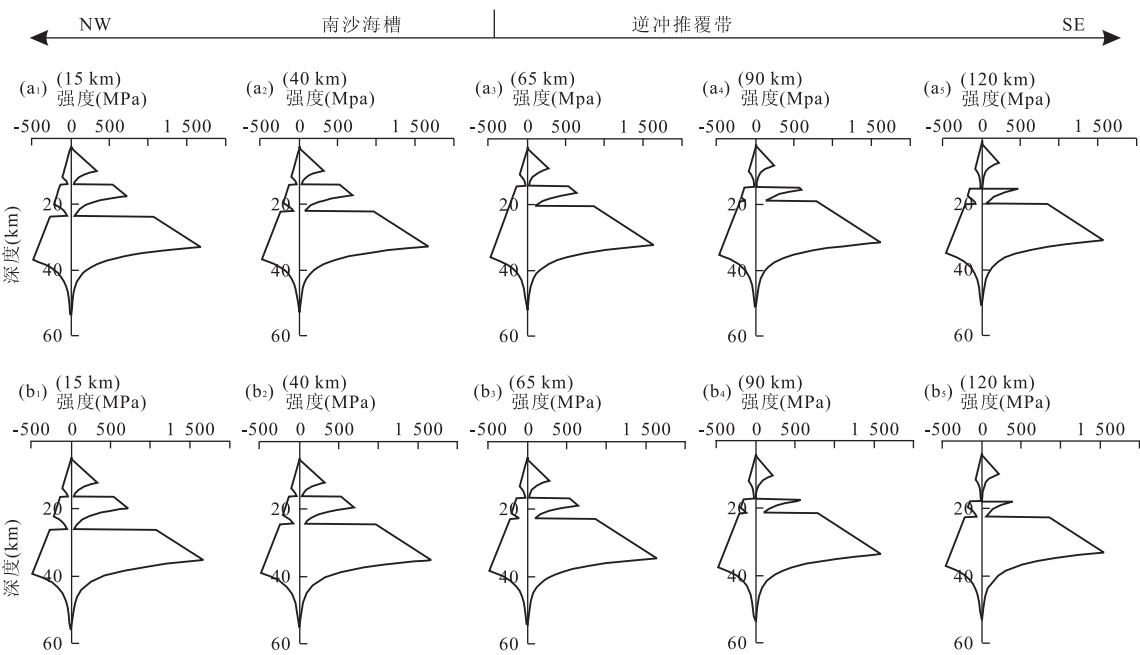


图 5 现今静态的(上)和逆冲推覆过程中(下)的岩石圈流变结构

Fig. 5 Rheological structures of deep lithosphere including static (upper) and thrusting in process (lower)

都发生在地壳内部,地幔内无地震(与俯冲有关的深部地幔地震除外),发震层厚度 T_s 变化范围为 10~40 km,大陆岩石圈中地震深度通常在 25 km 以内,大陆岩石圈的强度由地壳的 T_s 决定. Watts and Burov(2003)则指出 T_s 是反映历史时间尺度内岩石圈最上部脆性层的应力状态及强度,并以地震和断裂等构造活动来表现非弹性形变的深度,而 T_e 却是体现岩石圈的综合强度,反映岩石圈在地质时间尺度(>1 Ma)内对负载的响应,包括脆性、弹性及韧性层对岩石圈强度的贡献. 总之,地震发震深度 T_s 与有效弹性厚度 T_e 是相对独立的. 在南沙海域历史上记录的地震活动很少,近 50 年来,仅在南沙海槽前陆盆地西南方向靠近婆罗洲岛陆架(114.59E,5.41N)发生过一次 4.4 级小地震,震源深度为 33~38 km(<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml>),区域 T_s 相比 T_e 要大一些;另一方面,南沙海域地壳厚度只有 18~22 km,显然地震发生在岩石圈上地幔的上部脆性带. 出现这种情况的原因有:(1)虽然 GPS 数据表明南沙海域持续受来自南部的挤压构造作用(Simons *et al.*, 2007),但是由于盆地浅部中新世沉积地层在受挤压发生逆冲推覆过程中应力可以缓慢地释放,逆冲推覆带深部下地壳完全表现为韧性流变性质,使地壳内发生地震的可能性大大降低;(2)岩石圈地幔上部流变性质为脆性,在地幔和地壳持续受挤压的应力

都在脆性地幔中积累释放,使地幔脆性层破裂发生地震;(3)从模拟计算的热流变结构来看,南沙海槽前陆盆地深部岩石圈热结构稳定、热构造活动表现较弱且有效弹性厚度(T_e)较大,盆地区岩石圈较稳定且强度高,可能是造成区域地震活动小且少的重要原因. 区域地震活动受岩石圈热流变性质影响,地震发震深度 T_s 与有效弹性厚度 T_e 既有区别又有联系,不能一概而论.

盆地形成演化的地球动力学过程受盆地热状态和岩石圈流变性质控制,因而开展盆地的热流变学研究也能揭示盆地成因动力学过程和构造热演化过程(Toussaint *et al.*, 2004). 很多学者认为南沙海槽是南海扩张停止后古南海向婆罗洲陆块深部俯冲遗留下来的古海沟,导致南海扩张停止的原因,一方面可能是印-澳板块向巽他陆块挤压碰撞作用和南沙海槽底部的海底火山发育(Hutchison, 2004, 2010);另一方面从深部岩石圈热流变结构角度来看,南沙海槽前陆盆地地岩石圈综合强度大,在南沙地块与婆罗洲发生碰撞时,强度很大的刚性岩石圈板块在向婆罗洲陆块深部俯冲接触过程中会产生非常大的摩擦阻力,这可能是导致南海扩张和古南海向婆罗洲深部俯冲终止的一个影响因素. 但是,这需要今后在该区进一步开展地质、地球物理深部勘探、地球动力学物理模拟和数值模拟等方面的综合工作. 另外,南沙海槽前陆盆地逆冲推覆带深部地壳的流

变性质完全表现为韧性,可能也会影响南沙海域的演化,在建立盆地演化动力学模型时,需要合理考虑该层对盆地形成演化的影响。

4 结论

(1)南沙海槽前陆盆地的大地热流相对较低,平均值约为 62 mW/m^2 ,深部地幔热流 $35 \sim 42 \text{ mW/m}^2$,地幔热流贡献达 $60\% \sim 70\%$,大地热流受深部地幔控制。莫霍面温度 $420 \sim 500^\circ\text{C}$,地温梯度 $25 \sim 30^\circ\text{C/km}$ 。热岩石圈厚度约为 80 km ,横向上变化幅度不大。

(2)模拟逆冲推覆过程中南沙海槽前陆盆地热流变性质揭示:逆推构造活动使逆冲推覆带区大地热流显著升高 $15\% \sim 25\%$,达到 $70 \sim 75 \text{ mW/m}^2$;同时逆冲挤压作用造成地壳内部出现区域性的热隆起构造,反过来热隆起也促进了局部逆冲推覆构造活动。

(3)南沙海槽前陆盆地深部岩石圈流变性质具有明显的脆韧分层特性,为典型的“三明治”结构。岩石圈综合强度由南沙海槽向逆冲推覆带方向呈下降趋势,上地壳脆性层厚度约 $5 \sim 6 \text{ km}$;下地壳脆性层为 3 km 并向前陆区迅速减薄,到逆冲推覆带流变性质完全表现为韧性。南沙海域力学岩石圈厚度为 50 km 左右,有效弹性厚度为 $30 \sim 32 \text{ km}$,岩石圈具有强地幔、弱地壳的流变学特征,表现为高强度块体。

(4)南沙海域地震活动与深部岩石圈热结构、热活动和有效弹性厚度(T_e)密切相关,研究揭示地壳内热结构活动弱和深部岩石圈强度大可能是区域地震很少发生的重要原因。

References

- An, M. J., Shi, Y. L., 2007. Three-dimensional temperature field of Chinese continental crust and upper mantle. *Science in China (Ser. D)*, 37(6): 736—745 (in Chinese).
- Burov, E. B., 2010. The equivalent elastic thickness (T_e), seismicity and the long-term rheology of continental lithosphere: time to burn-out “crème brûlée”? *Tectonophysics*, 484(1—4): 4—26. doi: 10. 1016/j. tecto. 2009. 06. 013
- Burov, E. B., Diament, M., 1992. Flexure of the continental lithosphere with multilayered rheology. *Geophysical Journal International*, 109 (2): 449—468. doi: 10. 1111/j. 1365—246X. 1992. tb00107. x
- Burov, E. B., Diament, M., 1995. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere: what does it really mean? *Journal of Geophysical Research*, 100 (B3): 3905—3927. doi: 10. 1029/94JB02770
- Cloetingh, S., Burov, E. B., 1996. Thermomechanical structure of European continental lithosphere: constraints from rheological profiles and EET estimates. *Geophysical Journal International*, 124(3): 695—723. doi: 10. 1111/j. 1365—246X. 1996. tb05633. x
- Fernández, M., Ranalli, G., 1997. The role of rheology in extensional basin formation modelling. *Tectonophysics*, 282(1—4): 129—145. doi: 10. 1016/S0040—1951(97) 00216—3
- Franke, D., Barckhausen, U., Heyde, I., et al., 2008. Seismic images of a collision zone offshore NW Sabah/Borneo. *Marine and Petroleum Geology*, 25(7): 606—624. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2007. 11. 004
- Fu, Y. T., Li, J. L., Zhou, H., et al., 2000. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere. *Geological Review*, 46(2): 149—159 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Hesse, S., Back, S., Franke, D., 2010. The structural evolution of folds in a deepwater fold and thrust belt: a case study from the Sabah continental margin offshore NW Borneo, SE Asia. *Marine and Petroleum Geology*, 27(2): 442—454. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2009. 09. 004
- 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
- Hutchison, C. S., 2010. The North-West Borneo trough. *Marine Geology*, 271(1—2): 32—43. doi: 10. 1016/j. marpetgeo. 2010. 01. 007
- Lin, A., Watts, A. B., 2002. Origin of the West Taiwan basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin. *J. Geophys. Res.*, 107 (B9): 2185. doi: 10. 1029/2001JB000669
- Liu, S. W., Wang, L. S., Gong, Y. L., et al., 2005. Thermal-rheological structure of the lithosphere beneath Jiyang depression: its implications for geodynamics. *Science in China (Ser. D)*, 48(10): 1569—1584. doi: 10. 1360/02yd0286
- Liu, S. W., Wang, L. S., Jia, C. Z., et al., 2008. Thermal-

- rheological structure of continental lithosphere beneath major basins in central-western China: implications for foreland basin formation. *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 113—122 (in Chinese with English abstract).
- Maggi, A., Jackson, J. A., McKenzie, D., et al., 2000. Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere. *Geology*, 28(6): 495—498. doi: 10. 1130/0091—7613 (2000) 28<495: EFDEET>2. 0. CO;2
- McNutt, M., 1990. Flexure reveals great depth. *Nature*, 343: 596—597. doi:10. 1038/343596a0
- Morley, C., 2002. A tectonic model for the tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 347(4): 189—215. doi:10. 1016/S0040—1951 (02)00061—6
- Morley, C. K., 2009. Growth of folds in a deep-water setting. *Geosphere*, 5 (2): 59—89. doi: 10. 1130/GES00186. 1
- Ou, X. G., Jin, Z. M., Xia, B., et al., 2006. Prediction of thermal conductivity of underground rocks from P-wave velocity of ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 564—568 (in Chinese with English abstract).
- Ranalli, G., Murphy, D. C., 1987. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 132(4): 281—295. doi:10. 1016/0040—1951(87)90348—9
- Shi, X. B., Qiu, X. L., Xia, K. Y., et al., 2003. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3): 265—277. doi:10. 1016/S1367—9120(03)00059—2
- Shi, X. B., Zhou, D., Qiu, X. L., et al., 2002. Thermal and rheological structures of the Xisha trough, South China Sea. *Tectonophysics*, 351(4): 285—300. doi:10. 1016/S0040—1951(02)00162—2
- Shi, X. B., Zhou, D., Zhang, Y. X., 2000. Lithospheric thermal-rheological structures of the continental margin in the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 45(22): 2107—2112. doi: 10. 1007/BF03183537
- Simons, W. J. F., Socquet, A., Vigny, C., et al., 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: resolving Sundaland motion and boundaries. *Journal of Geophysical Research*, 112: B06420, doi:10. 1029/2005JB003868
- Su, D. Q., Huang, C. L., Xia, K. Y., 1996. The crust in the NanSha trough. *Scientific Geologica Sinica*, 31(4): 410—415 (in Chinese with English abstract).
- Toussaint, G., Burov, E., Avouac, J. P., 2004. Tectonic evolution of a continental collision zone: a thermomechanical numerical model. *Tectonics*, 23(6): TC6003. doi:10. 1029/2003TC001604
- Wang, L. S., Li, C., Yang, C., 1996. The lithospheric thermal structure beneath Tarim basin, western China. *Acta Geophysica Sinica*, 39(6): 794—803 (in Chinese with English abstract).
- Watts, A. B., Burov, E. B., 2003. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(1—2): 113—131. doi:10. 1016/S0012—821X(03)00289—9
- Watts, A. B., 1992. The effective elastic thickness of the lithosphere and the evolution of foreland basins. *Basin Research*, 4 (3—4): 169—178. doi: 10. 1111/j. 1365—2117. 1992. tb00043. x
- Williams, J., Ruiz, J., Rosenberg, M. A., et al., 2011. Insolation driven variations of mercury's lithospheric strength. *Journal of Geophysical Research*, 116: E01008. doi:10. 1029/2010JE003655
- Wu, S. M., Zhou, D., Liu, H. L., 2004. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha block, South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 23—28 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y., Jin, Z. M., Ou, X. G., et al., 2005. Lithospheric thermal structure beneath the area of the Chinese continental scientific drilling site (CCSD). *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2): 439—450 (in Chinese with English abstract).
- Zang, S. X., Li, C., Ning, J. Y., et al., 2003. A preliminary model for 3-D rheological structure of the lithosphere in North China. *Science in China (Ser. D)*, 46(5): 461—473. doi: 10. 1360/03yd9040
- Zhang, J., Song, H. B., 2001. The thermal structure of main sedimentary basins in the northern margin of the South China Sea. *Journal of Geomechanics*, 7 (3): 238—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. H., Jiang, X. D., Jin, Y., et al., 2004. Effective elastic thickness of continental lithosphere in western China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 183—190 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Yao, B. C., 2009. Tectonics and sedimentary basins of the South China Sea: challenges and progresses. *Journal of Earth Science*, 20 (1): 1—12. doi: 10. 1007/s12583—009—0001—8
- Zhou, D., Yu, H. S., Xu, H. H., et al., 2003. Modeling of thermo-rheological structure of lithosphere under the foreland basin and mountain belt of Taiwan. *Tectonophysics*, 374(3—4): 115—134. doi:10. 1016/S0040—1951(03)00236—1

附中文参考文献

安美建,石耀霖,2007. 中国大陆地壳和上地幔三维温度场. 中国科学(D辑),37(6):736—745.

付永涛,李继亮,周辉,等,2000. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究综述. 地质论评,46(2):149—159.

刘绍文,王良书,贾承造,等,2008. 中国中西部盆地区岩石圈热一流变学结构及其对前陆盆地成因演化的意义. 地质前缘,15(3):113—122.

欧新功,金振民,夏斌,等,2006. 利用超高压变质岩的 P 波速度估算地下岩石的热导率. 地球科学——中国地质大学学报,31(4):564—568.

苏达权,黄慈流,夏戡原,1996. 论南沙海槽的地壳性质. 地质科学,31(4):409—415.

王良书,李成,杨春,1996. 塔里木盆地岩石层热结构特征. 地球物理学报,39(6):794—803.

吴世敏,周蒂,刘海龄,2004. 南沙地块构造格局及其演化特征. 大地构造与成矿学,28(1):23—28.

吴耀,金振民,欧新功,等,2005. 中国大陆科学钻探(CCSN)主孔地区岩石圈热结构. 岩石学报,21(2):439—450.

张健,宋海斌,2001. 南海北部大陆架盆地热结构. 地质力学学报,7(3):238—244.

赵俐红,姜效典,金煜,等,2004. 中国西部大陆岩石圈的有效弹性厚度研究. 地球科学——中国地质大学学报,29(2):183—190.

《地球科学——中国地质大学学报》
2011 年 第 36 卷 第 6 期 要目预告

基于层序地层学和地震沉积学的高精度三维沉积体系分析:以渤中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组为例	朱红涛等
海原—六盘山地区活动构造的活动时间厘定:来自光释光测年的限定	肖 骏等
越流含水层中抽水井附近非达西流两区模型近似解析解	文 章等
微生物席成因构造(MISS)形态组合的古环境意义:以华北南缘中—新元古代为例	汤冬杰等
中国东海的 ²⁴ Ra	门 武等
新疆西克尔地区碳酸盐岩层系垂向裂缝层控发育模式	刘显凤等
南堡凹陷混源油分布与主力烃源岩识别	李素梅等
东营凹陷生油增压成因证据	郭小文等
优质烃源岩评价标准及其应用:以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例	卢双舫等