

doi:10.3799/dqkx.2017.524

# 台湾海峡及邻区剖面岩石圈有效弹性厚度及其构造意义

王明明, 吴健生\*

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

**摘要:** 台湾海峡及邻区地处欧亚板块与菲律宾海板块相互作用的构造前锋部位, 经历了挤压、剪切和伸展交替或并重的构造作用, 这种复杂应力环境下岩石圈的均衡调整对台湾地区的构造演化具有深远影响. 通过采用均衡响应函数法计算穿越台湾海峡及邻区剖面岩石圈的有效弹性厚度, 利用剥离法消除台湾海峡及东邻岛区较厚沉积层的影响, 得到了穿越台湾海峡地区剖面岩石圈弹性厚度的变化. 结合反演的莫霍面和居里面深度对剖面有效弹性厚度的构造意义进行了综合分析. 结果表明: 台湾海峡及邻区岩石圈有效弹性厚度变化范围为 22~8 km, 剖面有效弹性厚度整体上自西向东呈楔形递减趋势, 反映中国东部大陆岩石圈往东伸展减薄; 台湾岛附近有效弹性厚度出现局部向东倾斜增大的趋势, 可能与东侧菲律宾海板块的仰冲挤压有关. 有效弹性厚度与居里面具有较高相关性, 反映了有效弹性厚度受岩石圈热结构的影响.

**关键词:** 台湾海峡; 有效弹性厚度; 均衡响应函数; 岩石圈; 构造地质.

中图分类号: P312.3

文章编号: 1000-2383(2017)10-1707-08

收稿日期: 2017-04-23

## Lithosphere Effective Elastic Thickness and Its Tectonic Implications in Taiwan Strait and Its Adjacent Regions

Wang Mingming, Wu Jiansheng\*

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** Taiwan Strait and its adjacent regions are located in the tectonic interaction front of Eurasia plate and Philippine Sea plate, they have alternately or jointly undergone extrusion, shearing and stretching tectonic processes. The isostatic adjustment has a profound effect on the tectonic evolution of Taiwan region under the complex stress environment. In this paper, we calculated the lithosphere effective elastic thickness ( $T_e$ ) of Taiwan Strait and its adjacent regions by isostatic response function method, and eliminated the sediment effect by stripping method, then we attained the effective thickness changes along the profile across Taiwan Strait. The effective thickness changes and its tectonic significance were analyzed, combining inversion results of Moho depth and Curie depth. The results show that the lithosphere effective elastic thickness of Taiwan Strait and its adjacent regions range from 22 to 8 km. The continental lithosphere in eastern China shows thinning trend eastward by decreasing effective elastic thickness from west to east. The effective elastic thickness increasing eastward under Taiwan Island is likely to be associated with obduction extrusion of Philippine plate. A high correlation between effective elastic thickness and Curie depth reflects  $T_e$  is controlled by lithosphere temperature structure.

**Key words:** Taiwan Strait; effective elastic thickness; isostatic response function; lithosphere; tectonic geology.

研究区涉及台湾海峡的西邻陆区的中国东南沿海褶皱带、台湾海峡、台湾岛和台湾岛东邻菲律宾海区. 台湾海峡、台湾岛和台湾岛东邻菲律宾海是西太平洋大陆边缘的一部分, 作为欧亚板块和菲律宾海

板块的交汇处, 这里没有海沟俯冲带, 而是以菲律宾海板块往欧亚板块仰冲的方式来缩短, 并形成台湾岛. 地史上, 研究区经历了从中生代主动大陆边缘向新生代被动大陆边缘的转换, 受特提斯和太平洋域

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No.41541027); 中国海及邻域地质地球物理系列图项目(No.GZH200900504); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(No.2010AA09Z302).

**作者简介:** 王明明(1987-), 男, 博士生, 主要研究方向为综合地球物理. ORCID: 0000-0001-6420-203X. E-mail: 10843wmm@tongji.edu.cn

\* **通讯作者:** 吴健生, ORCID: 0000-0002-5847-356X. E-mail: wujiansh@tongji.edu.cn

**引用格式:** 王明明, 吴健生, 2017. 台湾海峡及邻区剖面岩石圈有效弹性厚度及其构造意义. 地球科学, 42(10): 1707-1714.

两期构造作用影响,尤其是新生代的板缘裂陷和弧陆碰撞造山作用使得台湾海峡地区经历了水平方向伸展和垂直方向隆升,奠定了现今台湾海峡地区独特的构造格局.以台湾海峡盆地为中心的包括南海北部陆缘和东海在内的中国东南沿海地区在古新世—始新世期间处于统一的岩石圈伸展构造背景之下,而自晚始新世起,各自走上不同的演化道路.当前,在台湾海峡与西邻陆区间存在着长乐—南澳扭性断裂带,沿着断裂带发育有沿海火成岩带.前人研究发现,台湾海峡及年轻的台湾岛目前仍未处于均衡状态(Horng *et al.*, 1995, 1998; 陈彦杰等, 2006),那么研究区不同单元的均衡程度是什么状况?而且,在台湾海峡地区所处的这种挤压、剪切和伸展交替或并重作用的复杂应力环境下,岩石圈是如何进行均衡调整的?这是本文研究要解决的重要科学问题.Dorman and Lewis(1970)首次提出基于实际观测的地形和重力异常的“实验均衡”方法来研究地球的均衡状态,其优点是不需要预先假定某种均衡机制(如 Pratt 和 Airy),而是将地球对地形负载的响应看作是线性的,负载产生的重力异常响应可以表示为地形和均衡响应函数的卷积,是基于观测数据本身的一种均衡分析.基于实验均衡的岩石圈有效弹性厚度( $T_e$ )综合反映了岩石圈在热结构、流变结构和力学结构等综合因素下对负载的响应(刘保华等, 1998; 吴健生和张向宇, 2011; 吴健生等, 2016).分析研究有效弹性厚度对于研究岩石圈的流变学强度、热结构、揭示岩石圈深部构造、探索地球动力学机制和岩石圈层耦合关系等有重要意义(Forsyth, 1985; McNutt and Judge, 1990; 袁炳强等, 2002a; 胡敏章等, 2015).岩石圈有效弹性厚度的求取方法主要有均衡响应函数法(Dorman and Lewis, 1970; Kalnins *et al.*, 2009; 吴健生等, 2016)、莫霍面地形导纳法(杨亭等, 2012)、相关技术法(袁炳强等, 2002b; Mao *et al.*, 2012)、重力正演法(Calmant *et al.*, 1990; Filmer *et al.*, 1993; 赵俐红等, 2004, 2010)等,其中均衡响应函数法是最常用的方法.本文采用均衡响应函数法计算穿越台湾海峡及邻区一条长剖面的岩石圈有效弹性厚度,由此得到的计算结果结合反演的莫霍面和居里面深度及区域构造演化对其构造意义进行了综合分析.

## 1 剖面地球物理场特征

### 1.1 剖面位置

如图 1,剖面北起华南大陆向东南经过台湾海

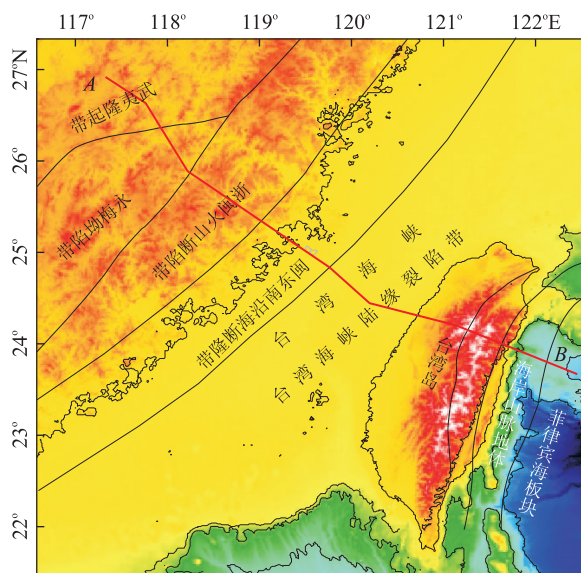


图 1 剖面位置

Fig.1 Profile position

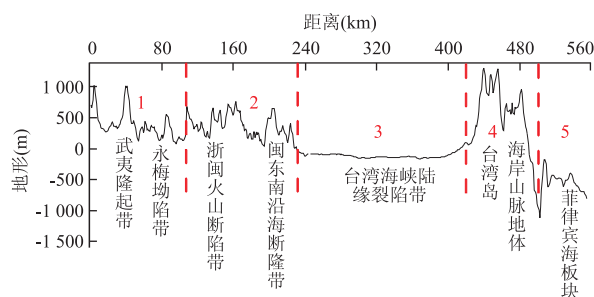


图 2 剖面地形

Fig.2 Topography profile

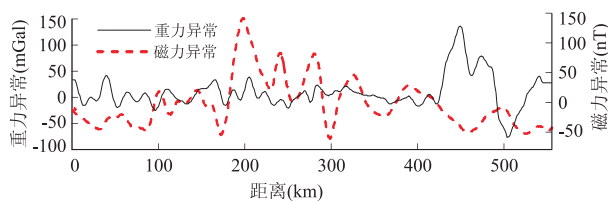


图 3 剖面重力与磁力异常

Fig.3 Gravity and magnetic anomalies profile

峡和台湾岛向西菲律宾海区延伸,从西往东依次经过的构造单元有武夷隆起带、永梅凹陷带、浙闽火山断陷带、闽东南沿海断隆带、台湾海峡陆缘裂陷带、海岸山脉地体及西菲律宾海等(张达, 2006),剖面全长 550 km.从剖面地形来看(图 2),华南大陆自西往东地形逐渐降低,台湾海峡水深较浅仅为 50~60 m,台湾雪山山脉和中央山脉高度超过 1 000 m,再往东向西菲律宾海盆地地形下降到 -500 m.

### 1.2 剖面重磁异常特征

从剖面重磁异常上可以看出(图 3),华南大陆

自由空间重力异常呈正负相间波状起伏,变化范围在 ± 50 mGal,磁异常由西部的负异常(幅值在 -40~ -70 nT)向东逐渐增大为 -40~ 0 nT,闽东南沿海断隆带附近磁异常增大到 140 nT 并呈波状起伏,自由空间重力异常为 0~ 30 mGal.海峡地区自由空间重力异常表现为中间高两侧低,西侧较东侧高,幅值为 -20~ 40 mGal,磁异常表现为两侧高中间低,幅值为 -50~ 25 nT.台湾岛自由空间重力异常表现为西高东低、两边高中间低的正异常,幅值从西部 140 mGal 向东减小到 75 mGal,磁异常为负异常,幅值为 -75 nT.台东纵谷自由空间异常为负异常,幅值达 -75 mGal,磁异常为 30 nT,向海盆自由空间重力异常逐渐增大到 45 mGal,磁异常减小为低缓负异常,幅值为 -65 nT.

## 2 均衡响应函数的计算

实验均衡的思想是假设地球内部对地形负载的响应是线性的,地球重力场对这种负载的响应可表示为地形与均衡响应函数的二维褶积,实验均衡将地形与重力场紧密联系在一起,通过不断改进补偿模型可以对岩石圈弹性结构和应力状态作出较好估计(吴健生和张向宇,2011).

将岩石圈看作弹性板,它对地形负载的理论响应函数可表示为:

$$Z(\omega) = -2\pi G(\rho_c - \rho_w) \times \left[ e^{-\omega z} - \frac{(\rho_m - \rho_c)g}{(\rho_m - \rho_c)g + D\omega^4} e^{-\omega z} \right], \quad (1)$$

式中  $\rho_c$  为地壳平均密度;  $\rho_m$  为地幔平均密度;  $\rho_w$  为海水平均密度;  $z$  为均衡补偿深度;  $G$  为万有引力常量;  $g$  为重力加速度;  $D = ET_e^3/12(1 - \mu^2)$  为弹性板的刚度,其中  $T_e$  为有效弹性厚度,  $E$  为杨氏模量,  $\mu$  为泊松比,当  $D = 0$  时为艾利均衡;  $\omega$  为波数,  $\omega = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为地形波长.不同有效弹性厚度的理论均衡响应函数曲线如图 4,模型计算使用参数如表 1.

利用均衡响应函数的定义,实际重力异常与地形之间的均衡响应函数利用谱相关的方法可以表示为:

$$Z'(\omega) = \frac{S_g(\omega) \cdot S_h^*(\omega)}{S_h(\omega) \cdot S_h^*(\omega)}, \quad (2)$$

式中 \* 代表复共轭,  $Z'(\omega)$  为均衡响应函数,  $S_g(\omega)$  为重力异常谱,  $S_h(\omega)$  为地形谱.

由于台湾海峡地区沉积层较厚,为了减少沉积层负载对弹性厚度计算的影响,我们对沉积层(数据来源于美国国家地球物理数据中心, [http://www.](http://www.ngdc.noaa.gov/)

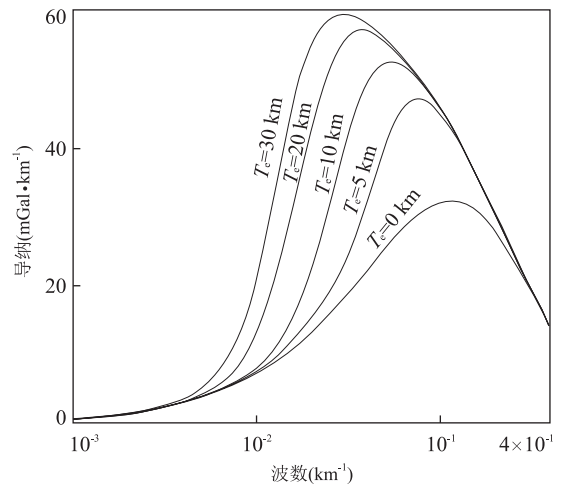


图 4 理论均衡响应函数曲线

Fig.4 Theoretical isostatic response function curve

表 1 模型计算中用到的参数

Table 1 Parameters used by the flexural model

参数	定义	值/单位
$D$	挠曲刚度	$N \cdot m$
$T_e$	有效弹性厚度	km
$\rho_w$	海水密度	$1\ 030\ kg/m^3$
$\rho_s$	沉积层密度	$2\ 000\ kg/m^3$
$\rho_c$	地壳密度	$2\ 670\ kg/m^3$
$\rho_m$	地幔密度	$3\ 270\ kg/m^3$
$g$	重力加速度	$9.8\ m/s^2$
$E$	杨氏模量	$8.0 \times 10^{10}\ Pa$
$\mu$	泊松比	0.25

ngdc.noaa.gov/) 采用剥离法(曹洁冰等,2005; Contreras and Osser, 2010)将地形沉积负载去除,然后计算去除沉积负载补偿后的地形和重力异常,根据去除沉积负载后的地形和重力异常,利用式(2)谱相关的方法可计算得到实际的均衡响应函数曲线,并与不同弹性厚度的理论均衡响应函数进行比较,对实际均衡响应函数与理论均衡响应函数对应频点进行拟合,取均方根差最小的拟合弹性厚度值为计算结果,可得到剖面岩石圈的有效弹性厚度变化.

## 3 计算结果及分析

我们先将剖面地形分为了 5 个区段,利用剖面地形和自由空间重力异常(图 5),采用均衡响应函数法分段计算各区段的岩石圈有效弹性厚度值.为了得到沿剖面连续变化的有效弹性厚度值,我们分别采用 50 km、100 km、150 km 和 200 km 不同大小的滑动窗口沿剖面滑动求取实际均衡响应函数横向

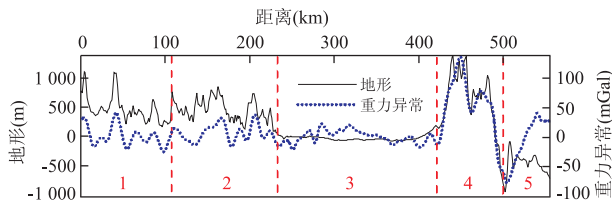


图 5 各区段地形和重力异常

Fig.5 Topography and gravity anomalies of each section

上的变化,对每个窗口计算的实际均衡响应函数与理论均衡响应函数进行拟合,取均方根差最小的有效弹性厚度值作为该窗口的计算结果。

从图 6a,6b 可以看出,区段 1 和区段 2 有效弹性厚度值分别为 22 km 和 18 km。根据地震资料该区域地壳平均厚度为 32~34 km,地壳 P 波平均速度  $V_p = 6.28 \sim 6.31$  km/s,地壳中部深度 18.8~23.5 km 处存在低速层,P 波速度为 5.7 km/s,低速层下是速度为 7.0 km/s 的下地壳,上地幔 P 波速度为 8.01~8.17 km/s(廖其林等,1988;陈祥熊等,2005)。区段 1 和区段 2 同属华南伸展大陆,华南大陆经历了从加里东运动到喜马拉雅运动长期多次复杂的地质构造演化,岩石圈厚度自西向东逐渐减薄,构造活动十分活跃(宫伟和姜效典,2017)。

从图 6c 可以看出,区段 3 台湾海峡地区有效弹

性厚度值为 12 km。台湾海峡沿北东方向延伸,长约 500 km,宽约 150 km,面积约  $6.3 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,西侧是闽浙大陆隆起,东侧是台湾中央山脉褶皱带。台湾海峡地区地壳厚度为 28 km,为大陆型地壳,具有 3 层地震波速结构,波速分别为地壳浅层 5.5~5.6 km/s,上地壳 6.1~6.3 km/s,下地壳 6.74~6.87 km/s(Wu *et al.*, 2007;董学发等,2016)。其可与华南大陆沿岸地壳结构对比。台湾海峡盆地西界为福建滨海断裂,东界为台湾屈尺—潮州断裂。台湾岛和台湾海峡在晚古生代与大陆是一体,同属古特提斯。新生代时,台湾海峡东部发生大陆边缘的裂陷,上新世发生弧陆碰撞,整个台湾岛的地形呈东高西低,与菲律宾板块的碰撞挤压有关。晚渐新世,南海开始扩张,南海板块沿巴拉望海槽和马尼拉海沟向东俯冲,南海中央海盆形成,导致台西南盆地沿着义竹断层断陷,形成陆缘断陷盆地。

从图 6d 可以看出,区段 4 台湾岛有效弹性厚度值为 15 km。台湾碰撞造山带是世界上最年轻的碰撞造山带之一。上新世吕宋岛弧的北段与古台湾发生弧陆碰撞作用,形成中央山脉造山带。台湾岛地区莫霍面深度为 23~32 km,西部海岸平原和山麓为 26 km,东部海岸山脉为 28 km,莫霍面在台湾岛中部深度增加,在中央山脉下方最深为 33 km,并向两

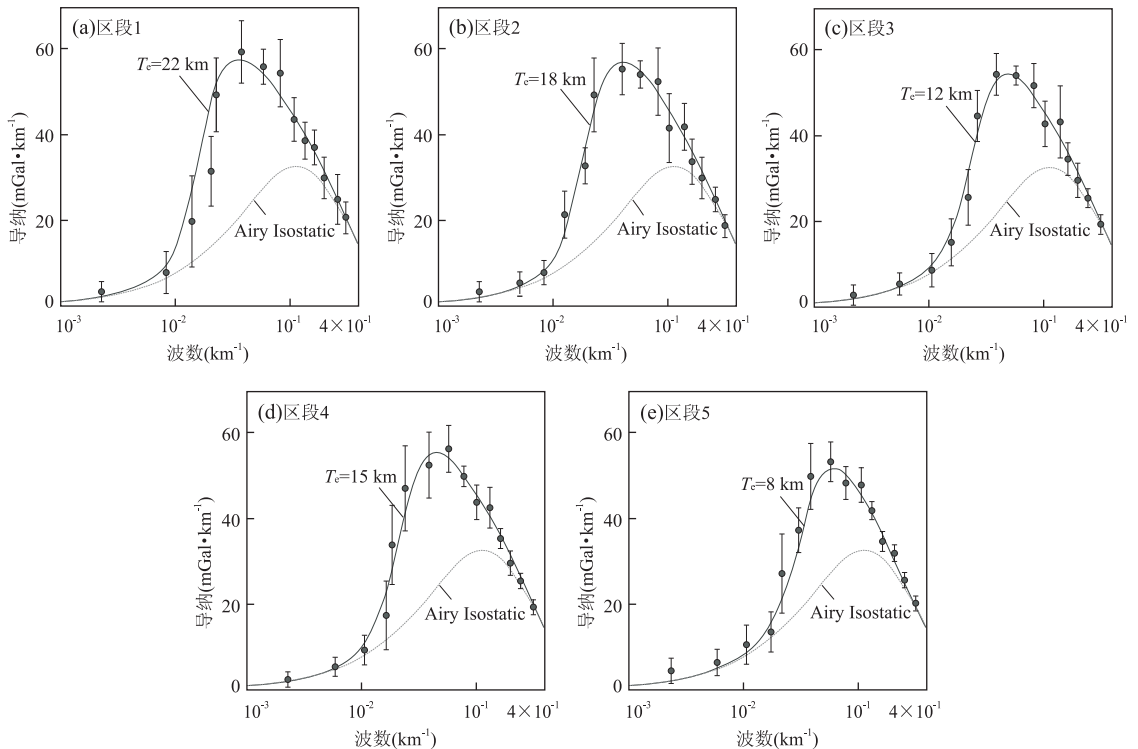


图 6 各区段均衡响应函数

Fig.6 Isostatic response function of each section



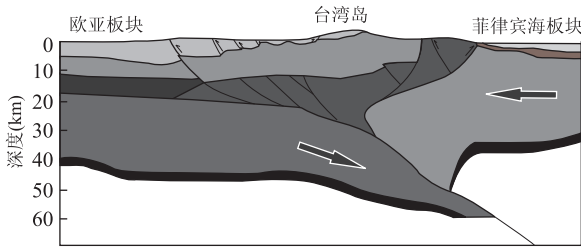


图 7 台湾岛深部构造示意

Fig.7 Deep geological structure of Taiwan Island  
据曾佐勋等(2013)修改

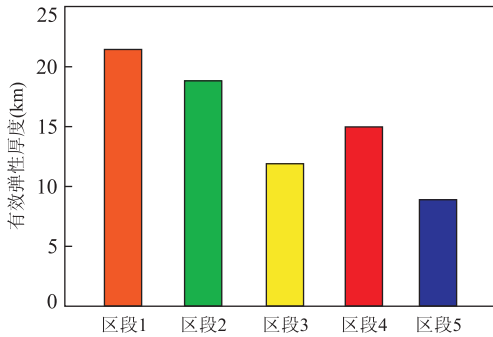


图 8 各区段岩石圈有效弹性厚度值  
Fig.8  $T_e$  values of different sections

侧变薄,往东变化梯度较快,台湾岛东部靠近菲律宾海地区莫霍面深度值最小(韩波等, 2014).GPS 监测结果显示台湾岛现在仍发生着构造变形和隆升,有些位置的上升速度达到  $2 \sim 3 \text{ cm/a}$  (Yul and Chen, 1994).根据对台湾地区重力资料的研究(Horng *et al.*, 1995),台湾地区的自由空间重力异常与地形非常相似,而布格重力异常与地形却明显不相关,台湾地区还未处于均衡状态.

从图 6e 可以看出,区段 5 西菲律宾海盆的有效弹性厚度值为 8 km.西菲律宾海盆沉积层较薄,只有几十米,菲律宾海区莫霍面深度仅为  $12 \sim 14 \text{ km}$ .深海钻探结果显示其最老的沉积物是始新统,地壳为洋壳性质,海盆内转换断层发育.菲律宾海板块的吕宋岛弧与台湾发生斜交碰撞,碰撞作用最早发生于台湾北部,目前仍在台湾南部进行,菲律宾海板块在台湾岛东北面发生沿着琉球海沟向欧亚板块的俯冲消亡,而在台湾岛南部欧亚板块沿着马尼拉海沟俯冲到菲律宾海板块之下.菲律宾海板块与台湾岛在海岸山脉仰冲挤压,未形成深海沟.菲律宾海板块在台湾岛东侧海岸山脉发生仰冲挤压,在西部欧亚板块则沿着屈尺—潮州断裂俯冲,台湾岛受东西两侧双应力影响(图 7).图 8 为各区段岩石圈有效弹性厚度值.

#### 4 有效弹性厚度变化及其构造意义

笔者利用滑动窗口方法沿剖面进行滑动计算,得到沿剖面连续变化的岩石圈有效弹性厚度值( $T_e$ )(图 9).从岩石圈有效弹性厚度变化可以看出,台湾海峡及邻区岩石圈有效弹性厚度总体变化趋势为西厚东薄,变化范围为  $22 \sim 8 \text{ km}$ .中国东部大陆内部在中生代燕山期发生岩石圈减薄,新生代时东部沿海地区岩石圈发生伸展减薄(邢集善等, 2007),岩石圈厚度自西向东呈楔形变化.岩石圈有效弹性厚度的变化与岩石圈自西向东伸展减薄的总体变化趋势相一致.台湾海峡地区岩石圈有效弹性厚度呈中间低两侧高,可能与海峡盆地中部的伸展断裂有关.台湾海峡盆地是在白垩系大陆边缘裂陷盆地基础上张裂形成的,其在古新世—始新世期间为断陷盆地,到晚渐新世—上新世受台湾岛隆升前陆作用形成叠合盆地.上新世晚期,吕宋岛弧北端与台湾岛发生斜向碰撞挤压形成海岸山脉,弧陆碰撞引起的强烈剪切与挤压使欧亚板块在屈尺—潮州断层带俯冲(刘少峰和李思田, 1996; Kao *et al.*, 1998; 刘振湖等, 2006).台湾岛岩石圈有效弹性厚度出现局部增大,可能与菲律宾海板块在台湾岛东部的仰冲挤压有关,造山带在侧向挤压下,地壳处于弹性应力状态(何建坤和刘金朝, 2002).同时欧亚板块在西部的俯冲也会使台湾岛岩石圈有效弹性厚度增大,如 Kudo *et al.* (2001)在研究日本岛弧的岩石圈有效弹性厚度时发现,西南日本岛弧岩石圈有效弹性厚度的突然增大与菲律宾板块俯冲造成双板片叠加有关,俯冲板块使得岛弧岩石圈有效弹性厚度增大数公里.台湾岛经弧陆碰撞造山形成,东部菲律宾海板块与台湾岛在海岸山脉处于挤压应力状态,西部欧亚板块正沿着屈尺—潮州断裂进行俯冲,所以我们认为台湾岛未达到均衡补偿状态是由于受东部菲律宾海板块水平方向的仰冲挤压和西部欧亚板块的俯

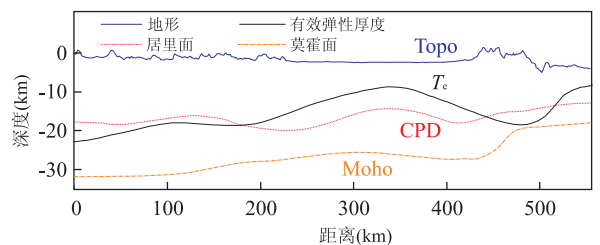


图 9 有效弹性厚度与居里面和莫霍面深度剖面  
Fig.9 Changes of  $T_e$ , Curie depth and Moho depth

冲作用造成,两侧板块在台湾岛构成双侧应力,目前这 2 种作用仍在进行。

从岩石圈有效弹性厚度与反演的居里面(Curie Point Depth, 简称 CPD)和莫霍面深度(Moho depth, 用 Moho 表示)的对比可以看出(图 9),岩石圈有效弹性厚度与居里面和莫霍面都有自西向东逐渐抬升的趋势,这与中国东部大陆岩石圈厚度自西向东逐渐伸展减薄相一致。深度上有效弹性厚度与居里面更为接近,较莫霍面要浅。有效弹性厚度与居里面的起伏具有较高的相关性,说明有效弹性厚度受岩石圈热结构的控制(Bechtel *et al.*, 1990; 袁炳强等, 2002a)。台湾海峡地区有效弹性厚度与居里面在中部都出现隆起,且有效弹性厚度比居里面要浅,可能与台湾海峡地区下部软流圈的上涌有关,同时受岩石圈拉张形成断裂影响,海峡地区岩石圈强度进一步减弱。台湾海峡及东邻岛区有效弹性厚度在居里面之上,厚度较浅,也是发育有新生代盆地的反映。这里居里面埋深极值处出现在台湾岛西部,有效弹性厚度极值处出现在台湾岛东部,反映了仰冲叠合增厚产生的效果在有效弹性厚度和居里面埋深的表现上有空间的差异,而两者之间恰好是莫霍面增深的梯度带。台湾海峡及其邻域岩石圈受到多期构造作用影响,既有水平方向伸展和挤压,也有垂向上的隆升和沉降,使岩石圈有效弹性厚度区域上呈现差异。

## 5 结论

(1)台湾海峡及邻区岩石圈有效弹性厚度变化范围为 22~8 km,呈现自西向东楔形递减的趋势,反映了中国东部大陆岩石圈厚度自西向东伸展减薄的总体趋势。有效弹性厚度变化与居里面深度较为接近,两者相关性较高,反映有效弹性厚度与岩石圈热结构有关,是岩石圈热状态的反映。

(2)台湾岛附近岩石圈有效弹性厚度出现局部向东倾斜增大的趋势,可能与东侧菲律宾海板块的仰冲挤压有关,西侧欧亚板块俯冲造成的板片叠加也对台湾岛岩石圈有效弹性厚度增大起一定作用。

(3)台湾海峡及邻区岩石圈有效弹性厚度的变化反映了现今台湾海峡地区的岩石圈强度是在经历了中生代—新生代的挤压、剪切和伸展等多种构造作用叠加后的表现。

致谢:感谢杨丽教授为本文提出的宝贵意见,感谢匿名审稿专家给出的修改建议使得文章水平进一步提高,感谢编辑部对本文的大力支持!

## References

- Bechtel, T. D., Forsyth, D. W., Sharpton, V. L., et al., 1990. Variations in Effective Elastic Thickness of the North American Lithosphere. *Nature*, 343 (6259): 636–638. doi:10.1038/343636a0
- Calmant, S., Francheteau, J., Cazenave, A., 1990. Elastic Layer Thickening with Age of the Oceanic Lithosphere: A Tool for Prediction of the Age of Volcanoes or Oceanic Crust. *Geophysical Journal International*, 100(1): 59–67. doi:10.1111/j.1365–246X.1990.tb04567.x
- Cao, J. B., Zhou, Z. Y., Wu, N. Y., et al., 2005. Lithospheric Characteristics and Effective Elastic Thickness of Western Zengmu Basin, South China Sea: Constraints from Tectonic Modeling. *Geotectonica et Metallogenia*, 29 (3): 377–384 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. X., Lin, S., Li, Z. N., et al., 2005. Preliminary 1-D Model of Crust Velocity Structure in Fujian-Taiwan Region. *Earthquake*, 25(2): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Song, G. C., Chen, Z. N., 2006. River Erosion Model of Unisostasy Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 51 (7): 865–869 (in Chinese).
- Contreras, R. E., Osses L. A., 2010. Lithospheric Flexure Modelling Seaward of the Chile Trench: Implications for Oceanic Plate Weakening in the Trench Outer Rise Region. *Geophysical Journal International*, 182(1): 97–112. doi:10.1111/j.1365–246X.2010.04629.x
- Dong, X. F., Tang, Z. C., Chen, Z. D., et al., 2016. Geochemical Characteristics of the Basic and Magnesian Metamorphic Rocks in Longyou Area, Zhejiang Province and Their Tectonic Setting. *Earth Science*, 41 (8): 1322–1333 (in Chinese with English abstract).
- Dorman, L. M., Lewis, B. T., 1970. Experimental Isostasy: 1. Theory of the Determination of the Earth's Isostatic Response to a Concentrated Load. *Journal of Geophysical Research*, 75(17): 3357–3365.
- Filmer, P. E., McNutt, M. K., Wolfe, C. J., 1993. Elastic Thickness of the Lithosphere in the Marquesas and Society Islands. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 98 (B11): 19565–19577. doi: 10.1029/93JB01720
- Forsyth, D. W., 1985. Subsurface Loading and Estimates of the Flexural Rigidity of Continental Lithosphere. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 901 (B14): 12623–12632. doi:10.1029/JB090iB14p12623
- Gong, W., Jiang, X. D., 2017. Thermal Evolution History and Its Genesis of the Ailao Shan-Red River Fault Zone in the Ailao Shan and Day Nui Con Voi Massif during

- Oligocene-Early Miocene. *Earth Science*, 42(2): 223 — 239 (in Chinese with English abstract).
- Han, B., Zhang, X. H., Yang, J. Y., et al., 2014. Gravity Field in Taiwan Area and Its Relation with Moho Features. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(5): 67—72 (in Chinese with English abstract).
- He, J. K., Liu, J. Z., 2002. Lower-Crust Ductile Flow and Its Dynamical Relation with Syn-Collision Crustal Extension in Orogenic Belt. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(4): 483—496 (in Chinese with English abstract).
- Horng, Y. Y., Yih, H. Y., Lin, C. H., et al., 1995. Gravity Survey of Taiwan. *Journal of Physics of the Earth*, 43(6): 685—696. doi:10.4294/jpe1952.43.685
- Horng, Y. Y., Yih, H. Y., Wu, F. T., et al., 1998. Two-Dimensional Crustal Structures of Taiwan from Gravity Data. *Tectonics*, 17(1): 104—111. doi: 10.1029/97TC02697
- Hu, M. Z., Li, J. C., Li, H., et al., 2015. The Lithosphere Effective Elastic Thickness and Its Tectonic Implications in the Northwestern Pacific. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(2): 542—555 (in Chinese with English abstract).
- Kalnins, K. M., Watts, A. B., 2009. Spatial Variations in Effective Elastic Thickness in the Western Pacific Ocean and Their Implications for Mesozoic Volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1—2): 89—100. doi:10.1016/j.epsl.2009.06.018
- Kao, H., Shen, S. J., Ma, K. F., 1998. Transition from Oblique Subduction to Collision: Earthquakes in the Southernmost Ryukyu Arc-Taiwan Region. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 103(B4): 7211—7229. doi: 10.1029/97JB03510
- Kudo, T., Yamaji, A., Furumoto, M., et al., 2001. Effective Elastic Thickness of Island Arc Lithosphere under Japan. *Island Arc*, 10(2): 135—144.
- Liao, Q. L., Wang, Z. M., Wang, P. L., et al., 1988. Explosion Seismic Study of the Crustal Structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou Region. *Acta Geophysica Sinica*, 31(3): 270—280 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. H., Wu, J. L., Xin, B. S., et al., 1998. Study on Topographic Compensation Model of the Okinawa Trough. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(6): 70—75 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Li, S. T., 1996. Formation Mechanism of Foreland Basin. *Earth Science*, 21(1): 57—62 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Wang, Y. M., Wang, H. R., 2006. Characteristics and Evolutions of Geologic Structures in the Taiwan Strait Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(5): 69—75 (in Chinese with English abstract).
- Mao, X. L., Wang, Q., Liu, S., et al., 2012. Effective Elastic Thickness and Mechanical Anisotropy of South China and Surrounding Regions. *Tectonophysics*, 550—553(4): 47—56. doi:10.1016/j.tecto.2012.05.019
- McNutt, M. K., Judge, A. V., 1990. The Superswell and Mantle Dynamics beneath the South Pacific. *Science*, 248(4958): 969—975. doi:10.1126/science.248.4958.969
- Wu, J. S., Wang, M. M., Cai, J. X., 2016. Lithosphere Effective Elastic Thickness Calculation and Analysis of East China Sea to Philippine Sea. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 44(6): 969—973 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. S., Zhang, X. Y., 2011. Model Analysis for Influence Factors of Isostatic Response Function Method. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 39(11): 1705—1709 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y., Chang, C., Zhao, L., et al., 2007. Seismic Tomography of Taiwan: Improved Constraints from a Dense Network of Strong-Motion Records. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(B08312): 582—596. doi:10.1029/2007JB004983
- Xing, J. S., Yang, W. R., Xing, Z. Y., et al., 2007. Deep-Seated Structure Characteristics of Eastern and Its Relation with Metal Mineralization-Concentrated Region. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 114—130 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Fu, R. S., Huang, J. S., 2012. On the Inversion of Effective Elastic Thickness of the Lithosphere with Moho Relief and Topography Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(11): 3671—3680 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, B. Q., Yvette, H. D., Cheng, S. Y., et al., 2002a. The Estimation of the Effective Elastic Thickness of the Continental Lithosphere and Its Geological Significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 269—272 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, B. Q., Yvette, H. D., Wang, P., et al., 2002b. Effective Lithosphere Elastic Thickness of Southeastern Part of Arctic Ocean-Eurasia Continental-Pacific Ocean Geoscience Transect. *Earth Science*, 27(4): 397—402 (in Chinese with English abstract).
- Yul, S. B., Chen, H. Y., 1994. Global Positioning System Measurements of Crustal Deformation in the Taiwan Arc-Continent Collision Zone. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 5(S1—2): 55—64.
- Zeng, Z. X., Wu, D. B., Wang, J., et al., 2013. Short-Term and Medium-Term Prediction and Rheo-Tectonic Analysis for Nantou Earthquake ( $M_s$  6.7). *Earth Science Frontiers*, 20

(6): 162—171 (in Chinese with English abstract).

Zhang, D., 2006. Wuyi-Taiwan Corridor Mineralization, Deep Process and Resource Potential. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Zhao, L. H., Jiang, X. D., Jin, Y., et al., 2004. Effective Elastic Thickness of Continental Lithosphere in Western China. *Earth Science*, 29(2): 183—190 (in Chinese with English abstract).

Zhao, L. H., Jin, X. L., Gao, J. Y., et al., 2010. The Effective Elastic Thickness of Lithosphere in the Mid-West Pacific and Its Geological Significance. *Earth Science*, 35(4): 637—644 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

曹洁冰, 周祖翼, 吴能友, 等, 2005. 曾母盆地西部岩石圈特性与有效弹性厚度: 来自构造模拟的约束. 大地构造与成矿学, 29(3): 377—384.

陈祥熊, 林树, 李祖宁, 等, 2005. 福建—台湾地区一维地壳速度结构的初始模型. 地震, 25(2): 61—68.

陈彦杰, 宋国城, 陈昭男, 2006. 非均衡山脉的河流水力侵蚀模型. 科学通报, 51(7): 865—869.

董学发, 唐增才, 陈忠大, 等, 2016. 浙江龙游地区基性及镁质变质岩的地球化学特征及其构造环境. 地球科学, 41(8): 1322—1333.

宫伟, 姜效典, 2017. 哀牢山—红河断裂带哀牢山—大象山段渐新世—早中新世热史演化及成因. 地球科学, 42(2): 223—239.

韩波, 张训华, 杨金玉, 等, 2014. 台湾地区重力场特征及莫霍面反演. 海洋地质与第四纪地质, 34(5): 67—72.

何建坤, 刘金朝, 2002. 下地壳流变与造山带同挤压期地壳伸展的动力学关系. 地球物理学报, 45(4): 483—496.

胡敏章, 李建成, 李辉, 等, 2015. 西北太平洋岩石圈有效弹性厚度及其构造意义. 地球物理学报, 58(2): 542—555.

廖其林, 王振明, 王屏路, 等, 1988. 福州—泉州—汕头地区地

壳结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 31(3): 270—280.

刘保华, 吴金龙, 辛柏森, 等, 1998. 冲绳海槽海底地形的补偿模式研究. 海洋学报, 20(6): 70—75.

刘少峰, 李思田, 1996. 前陆盆地形成的力学机制. 地球科学, 21(1): 57—62.

刘振湖, 王英民, 王海荣, 2006. 台湾海峡盆地的地质构造特征及演化. 海洋地质与第四纪地质, 26(5): 69—75.

吴健生, 王明明, 蔡家新, 2016. 东海—菲律宾海剖面岩石圈有效弹性厚度计算及分析. 同济大学学报(自然科学版), 44(6): 969—973.

吴健生, 张向宇, 2011. 均衡响应函数法影响因素的模型分析. 同济大学学报(自然科学版), 39(11): 1705—1709.

邢集善, 杨巍然, 邢作云, 等, 2007. 中国东部深部构造特征及其与矿集区关系. 地学前缘, 14(3): 114—130.

杨亭, 傅容珊, 黄金水, 2012. 利用 Moho 面起伏及地表地形数据反演岩石圈有效弹性厚度的莫霍地形导纳法 (MDDF). 地球物理学报, 55(11): 3671—3680.

袁炳强, Yvette, H. D., 程顺有, 等, 2002a. 大陆岩石圈有效弹性厚度的计算及其地质意义. 地球学报, 23(3): 269—272.

袁炳强, Yvette, H. D., 王平, 等, 2002b. 北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面东南段岩石圈有效弹性厚度. 地球科学, 27(4): 397—402.

曾佐勋, 吴达兵, 王杰, 等, 2013. 台湾南投地震 ( $M_s$  6.7) 短期预测、中期预测和流变构造分析. 地学前缘, 20(6): 162—171.

张达, 2006. 武夷—台湾走廊带成矿作用、深部过程与资源潜力. 北京: 地质出版社.

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, 29(2): 183—190.

赵俐红, 金翔龙, 高金耀, 等, 2010. 中西太平洋海山区的岩石圈有效弹性厚度及其地质意义. 地球科学, 35(4): 637—644.