

郑勇,李永东,熊熊. 华北克拉通岩石圈有效弹性厚度及其各向异性. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3576-3590. doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 11. 007.

Zheng Y, Li Y D, Xiong X. Effective lithospheric thickness and its anisotropy in the North China Craton. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11): 3576-3590, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 11. 007.

## 华北克拉通岩石圈有效弹性厚度 及其各向异性

郑 勇, 李永东, 熊 熊

大地测量与地球动力学国家重点实验室, 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

**摘 要** 华北克拉通是典型的克拉通破坏的区域, 研究该区域的岩石圈有效弹性厚度( $T_e$ )及其各向异性特征有助于了解华北克拉通的强度构造及破坏机制. 我们根据空间分辨率为  $30'' \times 30''$  的地形数据和由自由空气异常解算得到的完全布格重力异常数据, 利用 Fan 小波分析方法计算了两者之间的相关性, 并基于 Forsyth 理论和正交各向异性薄板模型计算了华北克拉通地区的岩石圈  $T_e$  和其各向异性分布情况. 结果表明: (1) 从各向同性  $T_e$  分布来看, 华北克拉通岩石圈在东部、中部和西部存在着明显的差异. 鄂尔多斯地块、江淮盆地的  $T_e$  值均较高; 华北克拉通、南北重力梯度带及鲁西隆起  $T_e$  值较低, 约  $10 \sim 25$  km; 郯庐断裂带两侧  $T_e$  有非常大的差异, 西侧的  $T_e$  明显小于东侧, 推测郯庐断裂带在华北克拉通破坏过程中起着非常重要的作用. (2) 从  $T_e$  的各向异性来看, 不同块体  $T_e$  各向异性的大小或方向存在差异, 并且研究区内地震大多分布在  $T_e$  各向异性大小或方向转变的区域. (3) 从地震波 SKS 各向异性和  $T_e$  各向异性的比较来看, 在华北克拉通西部阿拉善块体岩石圈变形趋于垂直连贯变形模式; 鄂尔多斯地区各向异性源自历史构造事件的“化石”各向异性; 山西裂谷带地区  $T_e$  的弱轴方向和 SKS 的快波方向平行, 而在山西裂谷带南部的秦岭—大别区域, SKS 快波方向和  $T_e$  弱轴方向相垂直, 这可能与地幔热物质上涌等作用有关. 此外,  $T_e$  各向异性与现今构造应力场间的相关性不明显, 体现出华北克拉通复杂的构造应力特征.

**关键词** 有效弹性厚度, 各向同性, 各向异性, 华北克拉通

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 11. 007

中图分类号 P541, P315

收稿日期 2012-09-28, 2012-10-30 收修定稿

### Effective lithospheric thickness and its anisotropy in the North China Craton

ZHENG Yong, LI Yong-Dong, XIONG Xiong

State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

**Abstract** The North China Craton (NNC) is a typical rejuvenated craton in the world. For this reason, the lithospheric effective elastic thickness ( $T_e$ ) and its anisotropy are important to understand the deformation mechanism of the NNC as well as its tectonic structures. In this work, we apply the Fan wavelet method to compute the coherence between the topography data with spatial resolution of  $30'' \times 30''$  and the Bouguer gravity anomalies derived by free air gravity anomalies, and further calculate the effective lithospheric thickness and its anisotropy based on Forsyth's theory and a orthogonal 2D thin plate model. The results show that: (1) Big isotropic  $T_e$  variations can be observed between the eastern, central and western parts of the NNC; high  $T_e$  regions mainly concentrate in the Ordos Block and Huanghe-Huaihe Basin; in central NNC, the

North-South Gravity Lineament and west part of Shandong province,  $T_e$  is relatively low, with typical value of 10~25 km; across the Tanlu fault,  $T_e$  varies dramatically, the  $T_e$  value in the west side of Tanlu fault is much smaller than that in the east side. Based on this phenomenon, we speculate that the Tanlu fault may play an important role during the deformation process of the North China Craton. (2) The pattern of  $T_e$  anisotropy distribute unevenly between different regions inside of the NNC, and the earthquakes mainly occurred in the areas where the directions and the magnitudes of  $T_e$  change dramatically. (3) Based on the comparison between the SKS seismic anisotropy and the  $T_e$  anisotropy, we argue that the deformation of the Alashan block in the western NNC is coupled from the deeper depth to the surface, and the  $T_e$  anisotropy in the Ordos block is belong to the fossil anisotropy which is originated from the historic tectonic movements. In the Shanxi rift, the directions of the weak  $T_e$  axis is parallel to the fast axes of SKS splitting data, and in the south end of the Shanxi rift zone and the Qinling-Dabie orogen, the two kinds of axes are perpendicular, based on the tectonic environment of these regions, we think this kind of coherency and discrepancy may due to the upwelling of the hot materials under the Shanxi rift zone. Generally speaking, the pattern of  $T_e$  anisotropy is not in good consistent with the tectonic stress field at present, which is an strong evidence that the tectonics in the NNC is very complex.

**Keywords** Effective elastic thickness, Isotropy, Anisotropy, North China Craton

## 1 引言

岩石圈的强度控制着大陆岩石圈对长期载荷的响应及其演化过程和空间构型,其分布特征对板内的隆升和沉降以及板块边界构造型式的演化具有重要的控制作用<sup>[1]</sup>. 大陆岩石圈对地质时间尺度内的长期载荷响应主要通过挠曲刚度( $D$ )或有效弹性厚度( $T_e$ )<sup>[2-12]</sup>来体现. 其中  $T_e$  与  $D$  的关系为:  $T_e = \sqrt[3]{12(1-\sigma^2)D/E}$ ,  $E$  为杨氏模量,  $\sigma$  为泊松比. 因此,岩石圈有效弹性厚度是表征岩石圈力学强度的参数之一. 岩石圈有效弹性厚度( $T_e$ )定义为一假想的、上覆于非黏性流体的、在相同载荷作用下产生与真实岩石圈相同弯曲的弹性板的厚度,表征了岩石圈在长期载荷( $>10^5$ 年)作用下抵抗变形的能力. 因此,岩石圈的  $T_e$  大小和分布状态对于了解大陆岩石圈的长期形变和流变结构,以及克拉通岩石圈在长期地质作用下的破坏的机制有重要的参考作用.

近几十年来,学者们对岩石圈的  $T_e$  进行了大量的研究<sup>[2,12-14]</sup>. 期间,为了解决岩石圈  $T_e$  偏小的问题,Forsyth<sup>[3]</sup>分析了岩石圈内部的密度异常对岩石圈载荷的影响,认为岩石圈挠曲均衡模型必须考虑内、外部载荷对岩石圈载荷的贡献才能得到精确的岩石圈  $T_e$  值. 所谓的外部载荷可以是来自外部的冰川、火山、沉积层;而来自内部的构造侵位、岩浆

侵入、地幔对流或者诸如上下层运动速率不一致而产生的内部边界拉力和洋脊向外的推力等构造边界载荷则属于内部载荷. 另外,不同方法获得的克拉通区域  $T_e$  相差很大<sup>[2,12]</sup>. McKenzie<sup>[9,15]</sup>强调侵蚀和沉积作用可以产生与地形不相关的载荷,建议使用自由空气异常数据,基于响应函数法求解  $T_e$ . 由于 McKenzie 的方法计算得到的大陆岩石圈包括古老的克拉通  $T_e$  值普遍小于 25 km,由此引发的争论不仅局限于不同研究方法得到的  $T_e$  值不同,并且进而促使学者们对岩石圈结构及运动学模型提出新的见解<sup>[16]</sup>. Pérez 等<sup>[10-11]</sup>和 Kirby 和 Swain<sup>[8,17]</sup>对自由空气响应函数法和布格相关性法的模型和公式进行统一和改进,分别在欧洲大陆和北美大陆采用这两种方法都取得了较为一致的结果. 基于这一改进方法,学者们对加拿大地盾<sup>[5-6]</sup>、澳大利亚克拉通<sup>[18]</sup>和南美大陆克拉通<sup>[19-20]</sup>  $T_e$  的研究也都获得了一致的结果.

虽然对于岩石圈  $T_e$  的研究取得了显著的成果,并且对岩石圈的性质和演化过程提出了重要的约束,但其研究结果大都假设  $T_e$  是各向同性的. 事实上,大陆岩石圈具有多层流变性,其物质组成的不均匀性能导致力学强度沿不同方位角和深度存在差异. 再者,岩石圈在构造演化历史中具有一定的“继承性”,受先存构造、温度、组分以及构造应力等影响,使其晶格排列在空间上有优势取向,使岩石圈抵

抗变形的能力沿不同方向而存在差异,即在同样载荷作用下,岩石圈的变形有优势取向, $T_e$ 存在各向异性.近年来不少学者通过不同的方法已经证实,在很多区域岩石圈  $T_e$  存在着明显的各向异性分布特征,如澳大利亚中部  $T_e$ . 具有明显的 NW—SE 弱向分布特征<sup>[21]</sup>, 东喜马拉雅—青藏高原的岩石圈  $T_e$ . 具有南北弱的特征<sup>[22]</sup>, 加拿大地盾  $T_e$ . 存在普遍的各向异性等<sup>[5]</sup>. 另外,在壳幔变形、岩石圈运动机制以及岩石圈的“继承性”等问题上也得到了深入的认识.因此,对岩石圈强度各向异性的研究,可以进一步加强加强对岩石圈的变形机制、动力学过程的了解.

华北克拉通地处欧亚大陆的东南部,是全球最古老的克拉通地块之一,其演化过程和空间构型一直是地球科学界关注的焦点.华北克拉通在中生代和新生代经历了大规模的岩石圈活化过程,即所谓的“华北克拉通破坏”过程,引起了国内外学者的广泛关注和争论<sup>[23-27]</sup>. 其独特的岩石圈应力场及构造运动格局,是世界上研究古老岩石圈减薄、改造、置换的最佳场所<sup>[28]</sup>. 目前,国内外对华北克拉通的大地构造、地壳、上地幔结构以及深部物质的动力过程主要从地球化学过程<sup>[29-30]</sup>、地震波速度结构、层析成像<sup>[31-33]</sup>等方面进行了大量的研究.基于这些研究,人们对于华北克拉通的破坏过程提出了多种模式,主要有两类模式,即热、化学侵蚀模式<sup>[34-36]</sup>和拆沉模式<sup>[37]</sup>. 然而,这些模式虽然各自能解释一部分现象,但也都存在一些难以解释的问题.

通常,大陆形变和动力学过程是地球构造动力学的直接体现,其变形过程必然与地下的驱动力以及地壳和岩石圈的强度有直接的关系.因此,对华北克拉通的岩石圈有效弹性厚度的研究将有助于了解华北克拉通的构造性质和破坏机理.目前的大多数研究虽然获得了一部分克拉通破坏的数据和构造信息,但是关于  $T_e$  的研究,特别是  $T_e$  各向异性的研究还比较少,难以对岩石圈的变形过程提供动力学上的定量约束,这在一定程度上阻碍了我们对于华北克拉通破坏机理的认识.此外,不同的克拉通破坏机理在岩石圈的物质运动和变形上存在着很大的差异,而这些运动状态和变形机制往往与地下岩石力学性质的各向异性有关.因此,研究华北岩石圈的力学强度和其各向异性特征对于了解华北克拉通的变形和破坏机制有着极为重要的意义.

本文基于小波分析方法来确定重力与地形间的相关性,计算获得华北克拉通岩石圈有效弹性厚度及其各向异性的二维精细结构,为理解大陆变形、克

拉通的形成和破坏机制等提供重要的参考依据.

## 2 方法及数据

### 2.1 小波相关性方法

岩石圈力学强度及其各向异性传统上通过多窗口谱分析技术<sup>[10,38-39]</sup>进行计算的.然而,多窗口谱分析技术存在窗口大小和分辨率相互制约的问题:如果窗口太小,不足以解析转换波长信息, $T_e$ 就会被低估;相反,如果窗口过大,则不能反映研究区域  $T_e$  的变化,降低空间分辨率.并且该方法局限于求取某一空间尺度内的平均  $T_e$ ,并不能得到二维  $T_e$  的详细分布信息.为了解决这一矛盾,Stark 等<sup>[40]</sup>提出使用小波分析法研究  $T_e$ ,其能对每一波数或尺度内的信号使用最佳窗口进行分析,使得计算二维  $T_e$  的空间分布成为可能. Kirby 和 Swain<sup>[7,17,41]</sup>使用既能解析各向同性信息又能解析各向异性信息的 Fan 小波分析技术,成功地计算了澳大利亚岩石圈  $T_e$  的各向异性,发现在克拉通地区壳幔强烈耦合,并且  $T_e$  的各向异性和地震波偏振方向存在很强的相关性,表明前寒武时期,地震波速各向异性和岩石圈  $T_e$  的各向异性是同源的. Tassara 等<sup>[42]</sup>用该方法得到了南美大陆  $T_e$  的详细分布信息, Audet 等<sup>[6,43]</sup>基于该方法计算了加拿大地盾及全球主要板块  $T_e$  的分布特征及其各向异性,结果表明  $T_e$  各向异性与构造分区、地震波各向异性都有较好的相关性,证实了小波分析方法的有效性和可靠性.

因此,本文使用基于小波分析的布格相关性法求解  $T_e$  及其各向异性.选取能同时解析地形和重力信号的振幅和相位信息的复 Morlet 小波对空间域的地形  $h(x)$  和布格重力异常  $b(x)$  作小波变换,分别得到在尺度  $s$ , 空间坐标  $x$  和方位角  $\theta$  上两个信号的小波系数  $\tilde{h}(s, x, \theta)$  和  $\tilde{b}(s, x, \theta)$ . 数值结果<sup>[8,17]</sup>表明,板的初始载荷间的相互关系以及重力噪声均可能影响最终结果的可靠性.因此,我们只取对内、外初始载荷的相互关系和重力噪声相对不敏感的小波相关性的实部进行计算,其表达形式如下:

$$\gamma_{\text{obs}}^2(s, x, \theta) = \frac{(\text{Re}\langle W_{bh}(s, x, \theta) \rangle_{\theta})^2}{\langle W_{bb}(s, x, \theta) \rangle_{\theta} \langle W_{hh}(s, x, \theta) \rangle_{\theta}}, \quad (1)$$

式中,  $\text{Re}\langle W_{bh}(s, x, \theta) \rangle_{\theta}$  是取  $\tilde{b}\tilde{h}^*$  平均后的实部.  $W_{bh}$  是  $b(x)$  与  $h(x)$  的互功率谱,  $W_{bb}$ 、 $W_{hh}$  分别是  $b(x)$ 、 $h(x)$  的自功率谱.  $\langle \rangle_{\theta}$  表示按角度平均,而不是小波系数本身的平均,即

$$\langle W_{ln}(s, x, \theta) \rangle_{\theta} = \frac{1}{N_{\theta}} \sum_{n=1}^{N_{\theta}} \{ \bar{b}(s, x, \theta) \bar{h}(s, x, \theta) \}_n, \quad (2)$$

式中,  $N_{\theta} = \text{int}(\Delta\theta/\delta\theta)$  是用于构建 Fan 小波的 Morlet 小波个数,  $\Delta\theta$  是 Fan 小波方位角范围,  $\delta\theta$  是邻近的 Morlet 小波方位角采样间隔. 当  $\Delta\theta = 180^{\circ}$  时, Fan 小波是准各向同性的; 当满足  $2\delta\theta \leq \Delta\theta < 180^{\circ}$  时, 则是各向异性的. 因此, 我们只需控制 Fan 小波的方位角叠加范围, 便可有效解析  $T_e$ . 各向同性和各向异性信息.

## 2.2 模型及反演

本文依照 Forsyth<sup>[3]</sup> 理论将岩石圈载荷分解为外部载荷和内部载荷, 内部载荷加载于 Moho 面, 假设各个方向挠曲刚度相同, 即可计算得到  $T_e$ . 各向同性的预测相关性. 对于各向异性情况, 我们采用正交各向异性薄板模型进行分析<sup>[39]</sup>, 假设岩石圈抵抗形变能力强轴与弱轴相互垂直. 若已知薄板模型各向异性参数  $[T_{ex}, T_{ey}, \beta]$ , 这里  $T_{ex} \perp T_{ey}$ , 由负载反卷积计算预测相关性. 将观测相关性与预测相关性用阻尼最小二乘法迭代拟合, 拟合误差如下:

$$\chi^2 = \sum \left( \frac{\gamma_{obs}^2 - \gamma_{pre}^2}{\epsilon_{obs}^2} \right), \quad (3)$$

式中,  $\gamma_{obs}^2$ 、 $\gamma_{pre}^2$ 、 $\epsilon_{obs}$  分别为观测相关性、预测相关性和观测误差. 拟合误差达到最小迭代结束.  $T_{ex}$ 、 $T_{ey}$  中较大的对应于岩石圈抵抗形变的强轴 ( $T_{max}$ ),  $T_{ex}$ 、 $T_{ey}$  中较小的对应于岩石圈抵抗形变的弱轴 ( $T_{min}$ ),  $\beta$  为  $x$  轴与  $T_{min}$  所成的夹角 (逆时针旋转为正).

## 2.3 数据

无论正演法还是反演法求解  $T_e$ , 均以地形和重力异常作为输入信号, 本文基于布格重力异常和地形的相关性法计算  $T_e$ , 地形数据来自 SRTM30\_PLUS V7.0<sup>[44]</sup> (图 1a). 研究区域为  $100^{\circ}\text{E} - 125^{\circ}\text{E}$ ,  $30^{\circ}\text{N} - 45^{\circ}\text{N}$ . 用到的地壳分层模型、地壳密度、地幔密度均由 Crust2.0 模型<sup>[61]</sup> 计算所得. 来自 V19.1 重力模型<sup>[45]</sup> 的自由空气异常经布格板校正到简单布格异常, 再使用 SRTM30\_PLUS V7.0 高程数字化模型做局部地形改正, 最后得到完全布格异常 (图 1b). 为了不损失角度信息, 所有以上数据经过插值, 使用 Mercator 投影到  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的标准网格用于计算.

## 3 各向同性 $T_e$ 结果及讨论

本文使用复小波变换代替傅里叶变换分析地形与重力在频率域的振幅及相位关系, 利用公式 (1) 和相关理论计算华北克拉通及邻近区域各向同性  $T_e$ . 在二维频率域, 选取 Fan 小波方位角范围  $\Delta\theta = 180^{\circ}$  时, 不同中心角的 Fan 小波解析同一信号信息一致, 在此情况下, Fan 小波是各向同性的<sup>[7]</sup>, 满足各向同性  $T_e$  研究的需要. 我们首先使用该 Fan 小波变换得到地形和布格重力信号的小波频谱, 依照 (1) 式得到二者的相关性, 经数值计算获得了华北克拉通地区  $T_e$  的分布特征.

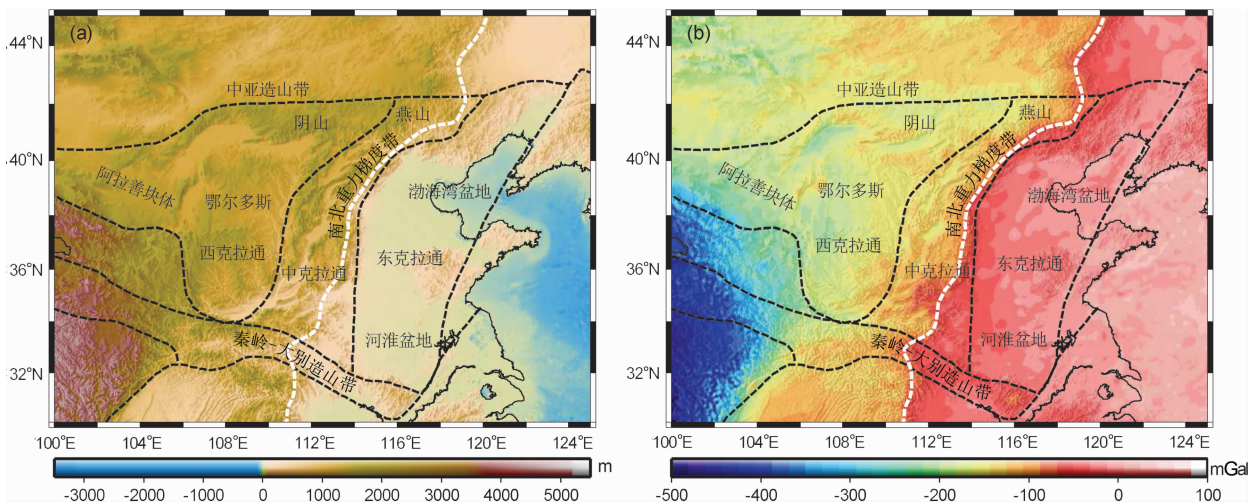


图 1 计算华北克拉通地区有效弹性厚度所用的数据: (a) 地形; (b) 布格重力异常

图中黑色虚线为华北克拉通不同区域的构造分界线, 白色虚线为南北重力梯度带.

Fig. 1 Data used for the computation of the North China Craton effective elastic thickness:

(a) Topography; (b) Bouguer anomaly

The dashed white line shows the North-South Gravity Lineament (NSGL). The major provinces are bounded with the black dashed lines.

### 3.1 剖面及不同区域 $T_e$ 反映的岩石圈特征

为了分析  $T_e$  结果的可靠性,我们选取了横穿几个典型区域的两条剖面,通过剖面逐点算例来分析其结果的稳定性和特征(图2). 两条剖面分别为:沿东西向的  $39^\circ\text{N}$  剖线和沿南北向的  $116^\circ\text{E}$  剖面. 从

图中可以看出,鄂尔多斯盆地、河淮盆地的岩石圈均衡转换波长  $>500$  km, 趋于区域补偿,表明这些地区岩石圈能抵抗长波长的构造变形,不可能受小尺度的构造变形而使其组构发生改变. 这与现今观测到的这些地区岩石圈厚度大、地震活动少、热流值低

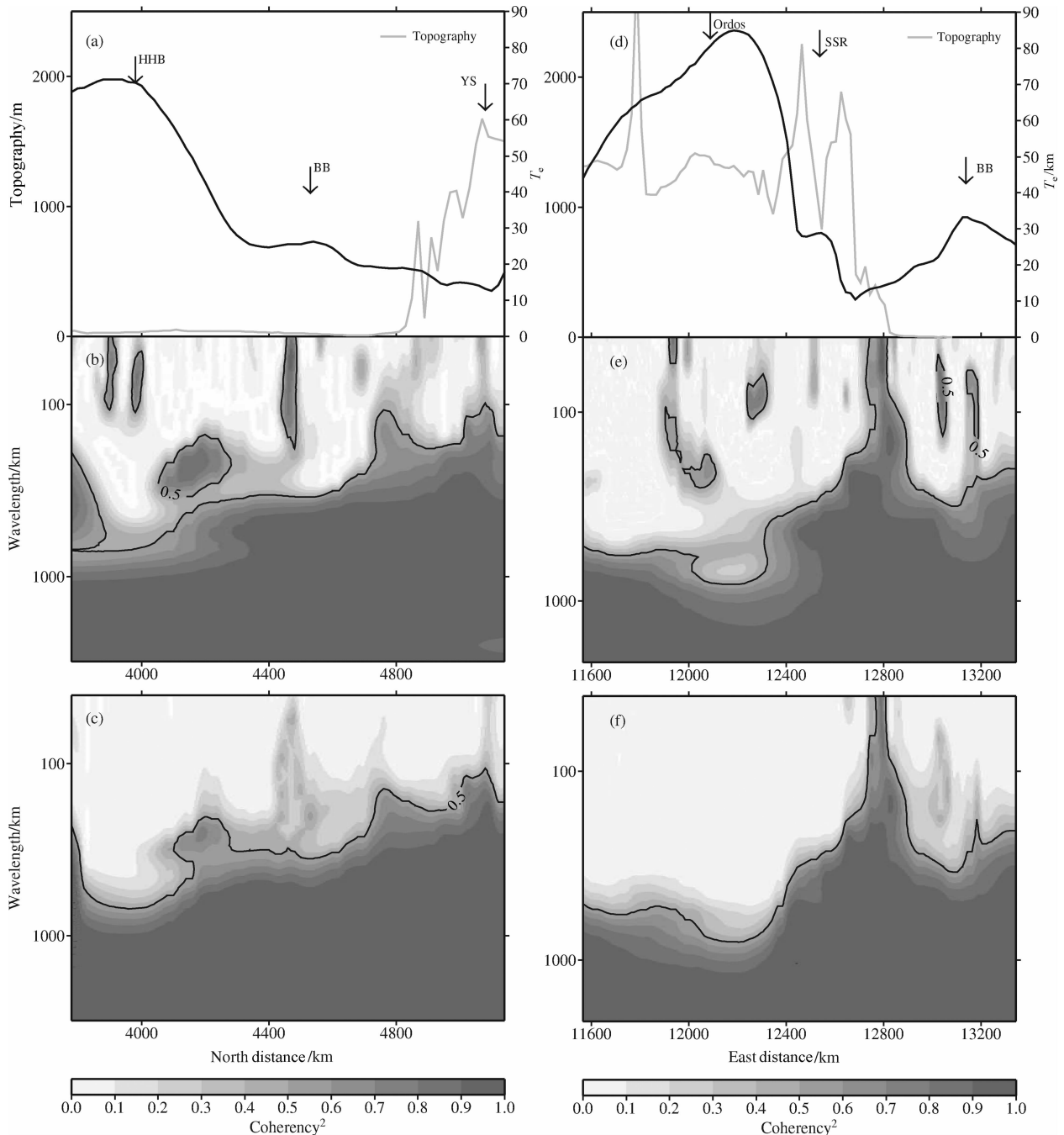


图2 沿  $39^\circ\text{N}$ (左列)和  $116^\circ\text{E}$ (右列)的两条剖面

(c, f)为预测相关性, (b, e)为观测相关性, (a, d)为剖面所对应的高程和反演获得的  $T_e$ .

图中缩写意义为: HHB, 河淮盆地; BB, 渤海湾盆地; YS, 燕山; SSR, 陕西—山西地堑.

Fig. 2 Cross sections along the  $39^\circ\text{N}$  (left panels) and  $116^\circ\text{E}$  (right panels)

(c, f) The best fitting predicted squared real coherency; (b, e) The observed Bouguer Coherency; (a, d) The  $T_e$  recovered by Bouguer coherence method (blue line), together with the topography across the transect (green line). Abbreviations are as follows: HHB, Hehuai Basin; BB, Bohai Bay Basin; YS, Yan Shan; SSR, Shaanxi-Shanxi Rift.

等特征都有较好的一致性。然而,太行山、渤海湾盆地均衡转换波长  $< 500$  km, 并且其在均衡波长  $> 100$  km 便发生均衡补偿效应,到 500 km 波长以上则能达到完全均衡。这些地区趋于局部补偿,容易受小尺度构造变形而引起岩石圈组构的变化,也是地震频发、热流值高的地区。从  $T_e$  各向同性分布(图 3)来看,华北克拉通不同块体  $T_e$  存在明显的差异,表现出各自典型的分布特征。

### 3.1.1 华北克拉通西部

华北克拉通西部的鄂尔多斯盆地  $T_e$  较高(30~65 km),岩石圈稳定,强度较大。块体内部南北向存在差异,其中南北两端  $T_e$  较高,中南部略低。这与地震波结果有良好的对应性:从地震波 P 波和 S 波波速比来看,南部的波速比和典型的前寒武纪地盾( $\sim 1.77$ )的波速比具有一致的特征<sup>[46]</sup>,因此,鄂尔多斯南部属于古老克拉通块体,保留了较高的力学强度。西华北克拉通西侧的北祁连至甘肃地陷、海原断裂一线  $T_e$  值均较低,且低值有向鄂尔多斯块体内部延伸的趋势,推测该区域受印度—欧亚板块碰撞和青藏高原隆升影响,断裂构造活跃、地震活动频繁,岩石圈整体强度较弱。鄂尔多斯块体北部与阿拉善块体相连的一侧具有明显的高值,而西华北克拉通东北端阴山周边则表现为一低值带, $T_e$  约 10~20 km,地震学也揭示阴山地区具有较低的波速比<sup>[47]</sup>,表明西华北克拉通北部两侧存在着明显的差异。在南部地区,各向同性  $T_e$  结果显示在秦岭中部存在  $T_e$  的高值区( $T_e \sim 30$  km),从地震学结果来看,背景噪声成像研究结果<sup>[48]</sup>显示在秦岭造山带下地壳和上地幔顶部没有明显的低波速带,因此,我们认为秦岭造山带下地壳和上地幔顶部区域不可能存在物质向东流动的通道,如果存在物质流动通道的话,应该位于岩石圈底部或者软流圈深度上。

### 3.1.2 华北克拉通中部

华北克拉通中部表现为沿太行山重力梯度带(即中国大陆南北重力梯度带一部分)走向的低值带, $T_e$  约 5~25 km,且  $T_e$  的低值近乎与太行山重力梯度带相重合。 $T_e$  分布特征由西克拉通到中克拉通有明显的渐变。地质学家认为中克拉通的形成与西部地块和东部地块在元古代的碰撞拼合有关<sup>[49]</sup>。新生代以来活跃的岩浆活动、强烈的地震活动性、广泛分布的伸展构造表明该区域属于华北克拉通内部主要的分界带。地震层析成像结果表明地幔过渡带内太平洋俯冲板块的前缘位置大致与中克拉通的太行山重力梯度带相对应<sup>[50]</sup>,地壳和上地幔的地震波

速度分布<sup>[31]</sup>也显示出山西裂谷带的低速带分布特征。因此,综合岩石圈有效弹性厚度、地震层析成像以及地质学结果等,我们认为该区域是华北克拉通破坏的主要分界线和起始区域,古太平洋板块俯冲的前缘及其激发的热物质上升流等构成了该地区构造活跃的深部动力背景,这与地质学上猜测的华北克拉通破坏机制有良好的一致性<sup>[51-52]</sup>。

### 3.1.3 华北克拉通东部

华北克拉通东部  $T_e$  的横向差异显著。郯庐断裂带两侧  $T_e$  差异尤其明显,西侧的  $T_e$  明显小于东侧。郯庐断裂带西侧南部的河淮盆地  $T_e$  约 30~50 km,北部鲁西隆起位于渤海湾盆地和河淮盆地之间, $T_e$  明显偏小(10 km 左右),由于该区域处于地震波速度的低速区域<sup>[31]</sup>,因此,可能与地幔软流圈物质上涌有关。渤海湾盆地  $T_e$  相对鄂尔多斯盆地、河淮盆地较低,约 20~30 km,与该区域地壳的下沉和减薄有较好的对应关系<sup>[53]</sup>。而郯庐断裂的东侧则相对较高,苏北地区和山东南部区域岩石圈有效弹性厚度在 70 km 以上。从地震层析成像的结果来看<sup>[31]</sup>,该区域和周边的海域上地幔速度较高,因此有一定的对应性。汪洋等<sup>[54]</sup>给出的以 1100 °C 等温面定义的中国大陆克拉通热岩石圈厚度、岩石圈总强度以及 Moho 面的温度也都反映出郯庐断裂南端的东西两侧分布特征具有明显的差别。华北平原和鲁西隆起及向北与渤海湾盆地间的过渡带为一东西向展布的低值带( $T_e < 20$  km),这可能与该地区广泛的中、新生代伸展构造有关<sup>[55]</sup>。

值得注意的是,从苏北等区域的面波的群速度和相速度成像结果显示该区域面波速度很低<sup>[31]</sup>,因此该区域存在着速度较低、厚度较大的低速沉积层。由于较厚沉积层的存在,特别是海域地区沉积层的存在,可能导致地形和重力异常的相关性与重力均衡有非常大的差异,导致岩石圈有效弹性厚度存在着较大的偏差。因此,郯庐断裂带以东区域的  $T_e$  偏高的现象可能与沉积层或重力噪声产生的干扰有关,可靠性相对较低。但无论怎样,郯庐断裂带两侧的  $T_e$  存在着明显差异这一现象是可靠的,我们将对其与华北克拉通的破坏机制之间的关系做一定的探讨和分析。

## 3.2 华北克拉通 $T_e$ 与构造的关系讨论

华北克拉通岩石圈  $T_e$  值高的陆核(鄂尔多斯盆地、河淮盆地)被  $T_e$  值低的构造活跃区、岩石圈强度薄弱区(太行山重力梯度带、秦岭—大别造山带)分割包围。华北岩石圈减薄时空不均一性主要反



映在以南北重力梯度带为界的东西部的差异<sup>[28,56-58]</sup>,而岩石圈减薄的中心地区对应于渤海湾盆地、冀中盆地等,这些地区均对应于  $T_e$  低值区、地表热流高值区<sup>[54]</sup>. 岩石圈在过去的构造事件中捕获、继承的力学强度会影响后来的岩石圈减薄、克拉通破坏的空间分布. 通常,岩石圈有效弹性厚度低的地区成为岩石圈后期演化过程中的构造薄弱区,当岩石圈受到热侵蚀、拆沉<sup>[29,59]</sup>、热对流<sup>[28]</sup>或者机械拉伸<sup>[56]</sup>等破坏机制作用时,必然使力学强度薄弱区成为优先破坏或者破坏程度明显的中心区域. 虽然对于具有多层流变学性质的大陆岩石圈,  $T_e$  的影响主要来自于壳幔耦合程度,但对华北克拉通东部而言,则可能很大程度上受控于地温梯度和古构造状态. 华北克拉通力学强度结构明显的不均匀分布不仅反映了显生宙不同区域的构造差异,还为稳定的大陆岩石圈的长期力学的继承性提供了证据.

此外,郯庐断裂带两侧的岩石圈有效弹性厚度有明显差异这一现象可能为华北克拉通破坏提供一定的判定依据. 从地震学层析成像上看,郯庐断裂带上地幔下部存在着低速异常区,存在着强度小的可能,这可能为软流圈物质的上升提供了一个可能的通道,这些热物质在上升后,逐渐地通过热和化学侵蚀作用对华北克拉通岩石圈进行剥蚀,从而导致了华北克拉通岩石圈的减薄和拉伸<sup>[23]</sup>. 而郯庐断裂带作为华北和华南两大块体碰撞形成的深大断裂带,

自中生代以来,已经发生了近 500 km 的左旋走滑运动<sup>[60]</sup>,从而造成东西两侧的物质性质和地质构造上存在很大差异. 西侧的河淮盆地和华北平原、渤海湾盆地由于受到岩石圈的减薄和拉伸作用,其岩石圈厚度较小<sup>[33]</sup>,从而  $T_e$  比较低;东侧胶东区域属于大别块体的构造部分<sup>[60]</sup>,受华北克拉通减薄和拉伸的影响很小,主要受到南北向的挤压作用<sup>[61]</sup>,因此岩石圈可能相对较厚;在苏北区域, Li<sup>[61]</sup> 推测该区域可能发生了地壳的拆沉,华南的地壳覆盖在华北

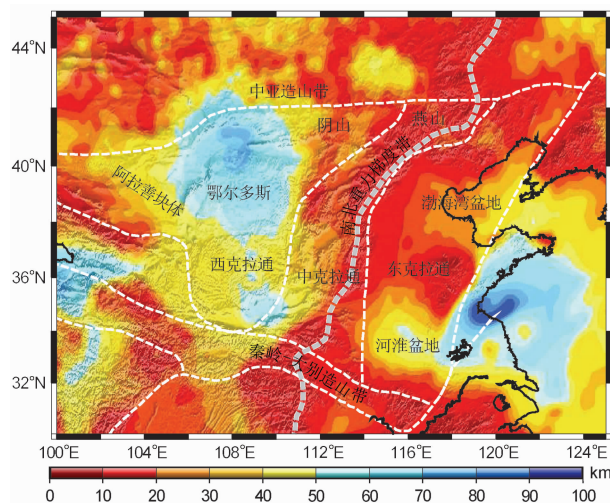


图 3 华北克拉通各向同性有效弹性厚度

Fig. 3 The isotropic effective elastic thickness of the North China Craton

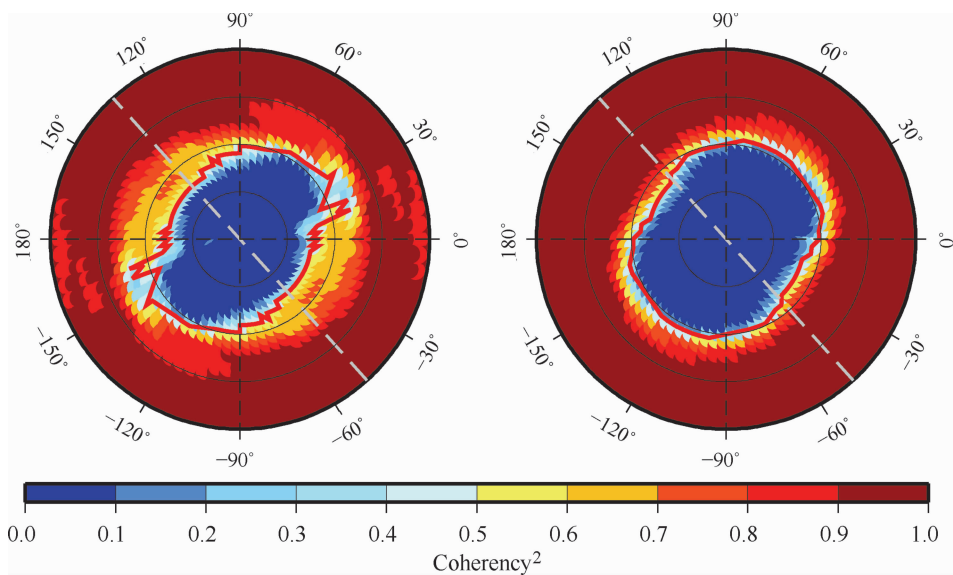


图 4  $T_e$  各向异性单点算例

二维观测相关性(左)与预测相关性(右)极坐标示意图,波长沿径向方向递增,黑色同心圆为波长等值线,红色等值线为转换波长等值线.

Fig. 4 Example of  $T_e$  anisotropy

Observed 2D Bouguer coherency (left) and predicted 2D coherency (right) shown as stereographic polar plots. Black contours show wavelengths, wavelengths increase radially. Red contour shows Bouguer coherency transition wavelength.

的岩石圈之上,一定程度上保留了古华南板块地壳强度大的特征,再加上受华北克拉通活化造成的岩石圈拉伸影响小,从而造成了胶东、黄海和苏北等区域相对较高的  $T_e$  分布特征。

## 4 各向异性结果及讨论

各向同性的岩石圈有效弹性厚度提供了华北克拉通及周边区域整体的强度分布特征。同时,在岩石圈长期的变形和演化过程中,由于一些矿物本身(如斜方辉石、云母等)存在着地震波各向异性的特征,如果出现定向的排列,就能够产生明显的各向异性,即晶格择优取向(LPO);另外,具有某种不同波速的单一各向同性矿物由于熔融、流动、变形等,也会体现出各向异性特征,即形态择优取向(SPO)。这些岩石矿物的定向排列或者流动不仅会导致地震波的各向异性,也会导致地下物质在抵抗形变的能力上呈现各向异性的特性,从而存在  $T_e$  的各向异性。虽然这些复杂的机制可能导致我们并不能完全区分各向异性是源自于各向同性矿物质的不均匀性还是岩石矿物质的各向异性,但可以肯定的是,形变过程与各向异性间的联系,使了解岩石圈各向异性结构成为研究地球内部动力学过程最有效的路径。本文利用前文所述的小波分析方法来确定重力与地形间的相关性,计算了华北克拉通岩石圈有效弹性厚度及其各向异性的二维精细结构。基于该各向异性结构,进一步探讨华北克拉通岩石圈力学各向异性与岩石圈的融合、变形、再活化间的关系,以及多幕式构造运动的空间复杂性及其深部动力学机制。

### 4.1 单点各向异性特征

为了验证  $T_e$  各向异性的特征,我们取北京点(116.5°E, 39.9°N)进行分析,计算和分析了理论与观测的二维各向异性相关性。结果如图4所示。由图可见,随角度和波长的变化,相关性分布特征存在差异,转换波长也存在差异,意味着  $T_e$  在不同方向上分布是不同的,即岩石圈抵抗变形的能力在不同方向上存在差异。基于这一特征,我们取  $T_e$  最小轴为该点的各向异性方向(图4中灰色虚线),依次逐点反演研究区内的各个数据点,从而得到华北克拉通地区  $T_e$  的各向异性分布图(图5)。

### 4.2 华北克拉通 $T_e$ 各向异性及其可能的构造涵义

和各向同性强度分布类似,东、中、西华北克拉通  $T_e$  各向异性分布存在着明显差异(图5)。以中部克拉通为分界,西部克拉通内部  $T_e$  弱轴以近西北—

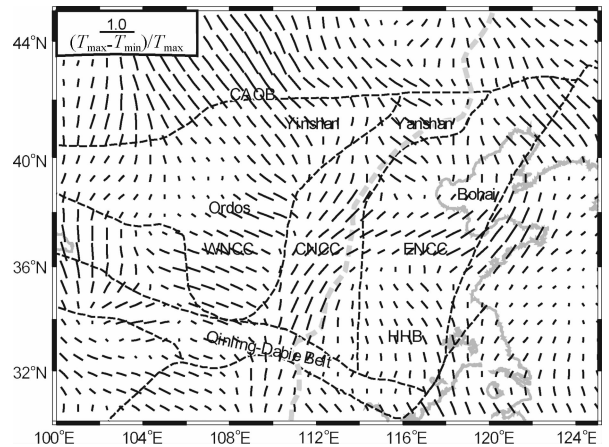


图5 华北克拉通有效弹性厚度各向异性

图中黑色轴线所指方向为  $T_{\min}$  方向,长度为各向异性比率  $(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$  的大小。地名缩写:CAOB—中亚造山带;WNCC、CNCC、ENCC分别为西华北克拉通、中华北克拉通和东华北克拉通,HHB—河淮盆地。

Fig. 5 Map of the mechanical anisotropy of the elastic lithosphere in the North China Craton

The direction is along shows the weak axis ( $T_{\min}$ ), the length is scaled as  $(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$ . Abbreviations are as follows: CAOB—Central Asian Orogenic Belt; WNCC, CNCC, ENCC—Western North China Craton, Central North China Craton and East North China Craton respectively; HHB—Huanghe—Huaihe Basin.

东南方向为主,在鄂尔多斯内部较强,西部的阿拉善较小,而西缘地区则转向近南北方向。中部克拉通各向异性呈现明显的平行于裂谷走向的特征,只有在北部的阴山、大同一带方向发生变化,由南北向逐渐转向近西北—东南方向;东部克拉通没有整体的特征,在渤海湾、河淮盆地有明显的差异。下面分别对其进行介绍和分析。

#### 4.2.1 华北克拉通西部地区

克拉通西端的阿拉善块体  $T_e$  各向异性方向以东北—南西向为主。鄂尔多斯地块各向异性方向转向北西—南东向,其内部各向异性特征显著,并且各向异性具有整体一致性。地震学研究表明鄂尔多斯地块地壳结构简单和地壳平均速度较高<sup>[62]</sup>,反映了鄂尔多斯地块内部变形弱的稳定构造特征。另外,较低的地表热流<sup>[63]</sup>和整体刚性特征<sup>[64]</sup>都意味着鄂尔多斯地区  $T_e$  各向异性不可能由现今构造运动产生。我们推测稳定的西克拉通强烈的各向异性特征是继承了最后一次大规模构造运动遗留在岩石圈中的“化石”的各向异性所致<sup>[65]</sup>,岩石圈优先沿  $T_e$  弱轴方向进行均衡补偿,这与青藏高原东北缘物质运移方向一致。鄂尔多斯东南缘以北西西—南东东为主,到达陕西—山西地堑逐渐转向东北—南西向,这



与鄂尔多斯周缘的剪切变形方向一致,有可能预示着鄂尔多斯的逆时针旋转与除河套裂谷带之外的周边裂谷带有效弹性厚度的弱轴相关.由鄂尔多斯地块内部  $T_1$  各向异性的一致性及其周缘构造域各向异性的逐渐转变可以推测,在中新生代以来中国大陆的构造运动中,鄂尔多斯地块不是这些运动的主要动力源,但却对这些运动及该区域的地震活动性影响很大<sup>[66]</sup>.

#### 4.2.2 华北克拉通中部地区

中部克拉通  $T_1$  各向异性整体分布特征与西克拉通完全不同,呈北东—南西向,与陕西—山西地堑、太行山、吕梁山的走向大致一致,低阻的电性结构<sup>[66]</sup>、低的地震波速度结构<sup>[31]</sup>均说明该地区的变形可能与滑脱剪切变形有关.另外,由西克拉通到中克拉通各向异性分布特征的转变可以说明克拉通岩石圈的再活化范围不可能延伸至西边的鄂尔多斯地块,Zhao<sup>[67]</sup>基于剪切波分裂研究结果也表明岩石圈再活化的范围局限于中克拉通及其以东地区.  $T_1$  各向异性在中克拉通的北部转向北西—南东向.由于北部区域有大同火山群,  $T_1$  各向异性方向的突变可能与该地区的深部动力学机制相关.

#### 4.2.3 华北克拉通东部地区

东克拉通地区各向异性方向与中部和西部明显不同.河淮盆地  $T_1$  各向异性特征与周缘地区完全不同,表现为北西—南东向的整体各向异性特征,各向同性  $T_1$  也显示为轮廓分明的刚性块体,说明河淮盆地整体一致的各向异性特征源于岩石圈中的“化石”各向异性.毗邻河淮盆地的郯庐断裂带南段的两侧,  $T_1$  各向异性方向存在明显差异,西侧河淮盆地呈北西—南东向,东侧由南北向向东逐渐转向北东—南西向.郯庐断裂两侧各向同性  $T_1$  整体呈西弱东强态势,而其南段两侧的各向同性与各向异性不同的分布特征说明郯庐断裂东西两侧的不同块体在华北华南块体碰撞的过程中保留了大尺度的各向同性和各向异性信息.另外,Tommasi 和 Vauchez<sup>[68]</sup>认为郯庐断裂的伸展可能继承和利用了华北克拉通岩石圈内部先存的薄弱带,而从我们的结果看,郯庐断裂是不同构造块体的拼合带.沿断裂走向向北,西侧的华北平原和鲁西隆起岩石圈强度明显降低,各向异性特征展现为北东—南西向,向北延续至渤海湾盆地,向东到胶东半岛各向异性方向并没有明显的转变.郯庐断裂是形成于华北—扬子板块碰撞(245—200 Ma)过程中重要的岩石圈规模的剪切带<sup>[69]</sup>,而嵇少丞等<sup>[28]</sup>通过山东胶东半岛、河北涿鹿

等地发现 225—205 Ma 的碱性岩体推断构造伸展作用于晚三叠纪在这些地区已经开始.因此,我们推断这些地区的一致的  $T_1$  各向异性特征可能主要来自于晚三叠纪以来的构造伸展作用.郯庐断裂带再向北至渤海湾盆地,  $T_1$  各向异性方向主要以北东—南西向为主,向西和向北逐渐偏向北西—南东向.因此,郯庐断裂力学强度及其各向异性明显的分段性可能反映华北—扬子板块碰撞、太平洋板块俯冲等动力学背景、机制的不一致.郯庐断裂南端东西两侧明显的不同力学强度特征可能暗示扬子板块和华北克拉通在碰撞前经历了不同的构造、热事件,在后来的演化过程中,大尺度的力学属性得以保留.

#### 4.3 $T_1$ 各向异性与 SKS 地震波各向异性的比较

SKS 地震波各向异性是描述地球介质各向异性的主要工具之一.诸多研究表明 SKS 波各向异性能为我们提供地幔矿物质的晶格择优取向和强度各向异性信息<sup>[70-72]</sup>.而  $T_1$  的各向异性反映的是岩石圈整体力学强度的各向异性,其方向指示的是岩石圈抵抗形变最弱的方向.两种不同信息源的各向异性结果均是地幔、岩石圈当今构造格局或过去构造历史的写照.因此,  $T_1$  各向异性与 SKS 波各向异性的比较对理解不同岩石圈层对岩石圈强度贡献的比重、岩石圈的变形机制以及构造演化历史等都非常重要.

本文将 Zhao 的 SKS 结果<sup>[67,73]</sup>与  $T_1$  各向异性进行了对比(图 6).比较研究发现华北克拉通西端、东接鄂尔多斯地块的阿拉善块体 SKS 与  $T_1$  各向异性大致呈垂直相关.依照岩石圈垂直连贯变形模式,地震波快轴方向垂直于岩石圈形变的压缩方向,而此方向也是单位地形加载所能引起最大变形的方向<sup>[21]</sup>,是岩石圈力学强度最弱的方向,即  $T_1$  的弱轴方向.因此,二者的近似垂直关系说明该地区各向异性可能源于垂直连贯变形过程中地幔橄榄石晶格排列的优势取向.鄂尔多斯地块  $T_1$  弱轴与 SKS 快轴呈近平行关系,由于各向同性  $T_1$  显示鄂尔多斯属于强度高的稳定大陆块体,当前的应力场分布特征显示鄂尔多斯  $T_1$  各向异性与现今构造应力场没有明确的相关性,因此,其  $T_1$  各向异性可能来自历史构造事件残留的各向异性.

在中华北克拉通地区,  $T_1$  各向异性和 SKS 结果的关系由南向北变化很大.在燕山和大同火山带区域,SKS 结果和  $T_1$  各向异性结果都很复杂,既存在相互平行,又存在相互垂直的现象.导致这种分布现象的原因可能是由于该区域新构造运动很活跃,

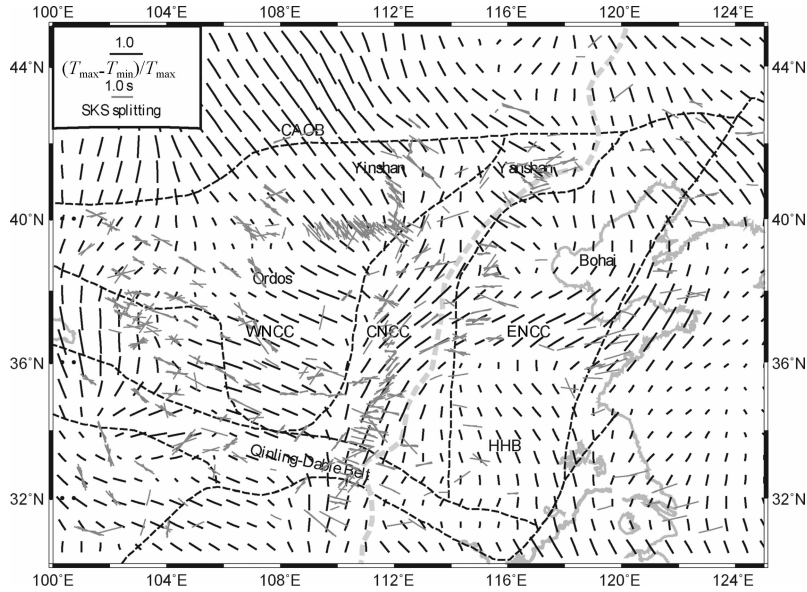


图 6 华北克拉通  $T_c$  各向异性(黑色条棒)与 SKS 各向异性<sup>[67,73]</sup>(灰色条棒)的关系

Fig. 6 Comparison between the  $T_c$  anisotropy (black bars) and SKS splitting<sup>[67,73]</sup> (gray bars) in the North China Craton

存在着岩浆活动和物质上升流,这些活跃的构造不仅对 SKS 的波速产生了影响,也对  $T_c$  的分布有很强的控制作用.其具体的差异和影响的探讨超出了本文的范围,需要进一步的工作进行分析.在山西裂谷带中部和南部, $T_c$  弱轴方向和 SKS 快波方向有很好的一致性,都是近东北—西南方向;而中华北克拉通南部直到秦岭—大别造山带之间,两者之间相互垂直.根据该区域的地质构造和动力学特征,我们认为两种各向异性之间的异同体现了如下的动力学背景:由于古太平洋板块的俯冲作用,其俯冲板片前端已经接近山西裂谷带地区下部,激发了软流圈物质的上涌<sup>[52]</sup>,该上涌物质沿着山西裂谷带已有的裂隙和破裂带上升,并沿裂谷带向南北扩展<sup>[23]</sup>,热物质的流动导致了上地幔物质的形态各向异性(SPO),从而导致了 SKS 快轴的近东北—西南的分布特征.同时,由于裂谷带的强度比较低,造成了山西裂谷带和邻近区域  $T_c$  的弱轴沿裂谷走向排列的分布态势.所以在山西裂谷带中南部 SKS 快轴和  $T_c$  的弱轴分布平行.而在秦岭—大别和山西地堑以南地区(黄河以南), $T_c$  弱轴与 SKS 快轴近似垂直.由于地震学的观测表明,在秦岭—大别的岩石圈地区可能不存在物质流动的通道<sup>[50]</sup>,因此,该区域岩石圈变形模式可能属于垂直连贯变形模式.结合 SKS 各向异性和  $T_c$  各向异性在南北部均存在差异,可能预示中华北克拉通的南北部各向异性源于不同的深部变形机制,克拉通再活化的范围还没波及到南部区域.

#### 4.4 $T_c$ 各向异性与现今构造应力场分布的比较

若保留的重力结构反映的是岩石圈的当前应力状态,例如在板块的汇聚带, $T_c$  各向异性方向则与最大压应力的方向以及剪切变形诱发的地震各向异性方向一致,反映的是岩石圈中应力场分布特征<sup>[74]</sup>.为了探讨华北克拉通地区  $T_c$  各向异性结构是否与现今地壳形变一致,我们将  $T_c$  各向异性与现今地壳应力场<sup>[75]</sup>作比较(图 7).发现研究区内阿拉善地块  $T_c$  各向异性与地壳应力场的最大压应力方向平行,而除阿拉善地块以外,其它地区  $T_c$  各向异性与地壳应力场的最大压应力方向没有明显关系.阿拉善地块  $T_c$  各向异性与 SKS 近似垂直,说明该地区岩石圈变形机制的确为垂直连贯变形模式,壳幔强烈耦合, $T_c$  各向异性反映的是现今构造应力场.其它区域无明显相关性则可能暗示了这些区域受历史地质构造活动的影响较大,力学强度的各向异性继承或有部分继承了历史构造事件残留的各向异性.由于上地幔在岩石圈强度的贡献中也占有不少比重,地壳应力场与岩石圈整体强度的各向异性呈现出的一致,也可能说明这些区域地壳与地幔存在解耦,各向异性的主要来源可能是上地幔,而非地壳.另外,由图 7 中的  $T_c$  各向异性大小和方向的变化与地震活动性的分布,结合各向同性  $T_c$ ,不同块体  $T_c$  各向异性的大小或方向存在差异,并且研究区内地震大多分布在  $T_c$  各向异性大小或方向发生转变的区域.这可能说明  $T_c$  各向异性整体一致的刚性块体有利于应力的传输或转移,使应力积累到

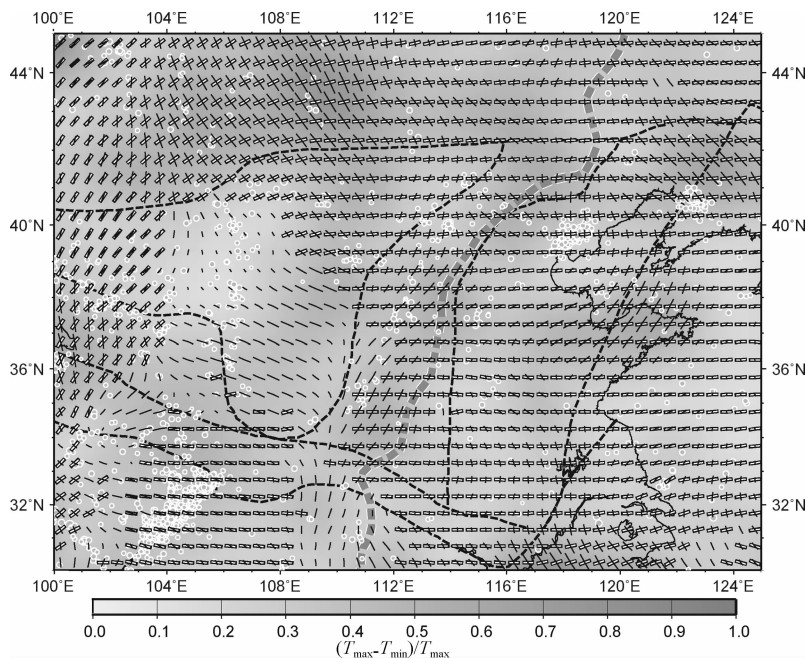


图7  $T_e$  各向异性大小及  $T_e$  各向异性(黑色条棒)与现今构造应力场分布<sup>[75]</sup>(空心条棒)的关系  
图中白色圆圈为 1973 年以来 3 级以上地震的震中位置(源自国家地震科学数据共享中心; <http://data.earthquake.cn>).

Fig. 7 The magnitude of  $T_e$  anisotropy defined by  $(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$  and correlations between  $T_e$  anisotropy (black bars) and directions of maximum horizontal compressive stress<sup>[75]</sup> (white bars)

White circles show the  $M \geq 3$  earthquakes occurred since 1973 (data are downloaded from website: <http://data.earthquake.cn>).

块体周边的  $T_e$  相对较弱、 $T_e$  各向异性大小或方向发生改变的区域,有助于地震的孕育。当然,若岩石圈的强度过小,岩石圈变形趋于塑性变形,  $T_e$  各向异性很弱,则不利于应力的积累,发生地震的可能性也较小。

## 5 结论

我们通过地形和重力的相关性,利用 Fan 小波方法解算了华北克拉通有效弹性厚度,并首次得到了该区域的  $T_e$  各向异性分布,研究分析了不同地区  $T_e$  及其各向异性的分布特征,及其与克拉通破坏的关系,最后比较分析了  $T_e$  各向异性与地震学 SKS 各向异性及现今构造应力场之间的关系,得到以下几点结论:

(1) 华北克拉通不同块体  $T_e$  存在明显的差异。鄂尔多斯地块、河淮盆地的  $T_e$  值均较高,中克拉通、南北重力梯度带及鲁西隆起  $T_e$  值较低,约 10~25 km。从大体上看,  $T_e$  的低值区对应于地质时期发生过多次构造事件的断裂带、裂谷带以及块体边界,  $T_e$  的高值区对应于冷的、古老的大陆块体。并且,在鄂尔多斯块体以南的秦岭—大别造山带  $T_e$  不存在明显的低值区,暗示该地区岩石圈内不存在可供物

质流动的通道。东部华北克拉通  $T_e$  的横向差异显著,特别在郯庐断裂带两侧,有非常大的差异,西侧的  $T_e$  明显小于东侧。综合考虑地震层析成像以及地质学等结果,我们认为郯庐断裂带在华北克拉通的再活化过程中,起着非常重要的作用,可能是“热侵蚀”或者“折沉”模式中热物质上升的主要通道。

(2) 不同块体  $T_e$  各向异性的大小或方向存在差异,并且研究区内地震大多分布在  $T_e$  各向异性大小或方向转变的区域。这可能说明  $T_e$  各向异性整体一致的刚性块体有利于应力的传输或转移,使应力积累到块体周边的  $T_e$  相对较弱、 $T_e$  各向异性大小或方向发生改变的区域,有助于地震的孕育。

(3) 通过  $T_e$  各向异性与 SKS 各向异性比较研究表明,华北克拉通西部阿拉善块体岩石圈变形趋于垂直连贯变形模式,各向异性源自地幔橄榄石晶格的优势取向。鄂尔多斯地区各向异性源自历史构造事件的“化石”各向异性。克拉通东部的  $T_e$  的各向异性南北向存在差异,河淮盆地  $T_e$  各向异性具有整体一致性,说明它和鄂尔多斯地块类似,都属于稳定的克拉通块体,各向异性源自历史构造事件的“化石”各向异性。河淮盆地以北至渤海湾盆地的东克拉通地区  $T_e$  各向异性呈现大体一致的走向,各向异性可能主要来自于晚三叠纪以来的构造伸展作

用. 克拉通中部  $T_e$  各向异性相比东西部有明显的转变, 各向异性的分布特征可能与太平洋板块的俯冲导致的中—新生代克拉通的再活化有关.

(4) 华北克拉通  $T_e$  各向异性与现今构造应力场间不存在明显的相关性.

不过, 虽然本文的结果给出了华北克拉通及其附近区域的强度构造和各向异性分布特征, 在一定程度上给出了华北克拉通破坏的约束和可能的机制, 但由于岩石圈有效弹性厚度是长时间地质构造所展示的一种性质, 对时间的敏感度不是太高, 因此, 无法判断华北克拉通破坏过程的具体快慢, 因此也就难以定量给出判断华北克拉通破坏是以“热侵蚀”为主还是以“拆沉”模式为主. 回答这些问题还有待于进一步的地球物理和地质学观测的约束和研究, 如近期的一些地球物理学结果<sup>[76-78]</sup>, 将能为我们提供进一步的约束.

**致谢** 我们对匿名审稿人表示感谢, 他们的意见为本文的改进起了重要作用. 在本文的计算和完成过程中, 澳大利亚的 Swain 博士和 Kirby 博士提供了很多的帮助, 并在程序的编制、结果的分析方面提出了很多宝贵的意见; 此外, 中国科学院测量与地球物理研究所许厚泽院士等对本工作提供了很多指导和意见, 在此对他们深表谢意. 文中图件使用 GMT<sup>[79]</sup> 绘制.

## 参考文献 (References)

[1] Watts A B, Zhong S. Observations of flexure and the rheology of oceanic lithosphere. *Geophysical Journal International*, 2000, 142(3): 855-875.

[2] Bechtel T D, Forsyth D W, Sharpston V L, et al. Variations in effective elastic thickness of the North American lithosphere. *Nature*, 1990, 343(6259): 636-638.

[3] Forsyth D W. Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(B14): 12623-12632.

[4] Audet P, Mareschal J C. Variations in elastic thickness in the Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226(1-2): 17-31.

[5] Audet P, Mareschal J C. Anisotropy of the flexural response of the lithosphere in the Canadian Shield. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31: L20601.

[6] Audet P, Mareschal J C. Wavelet analysis of the coherence between Bouguer gravity and topography: application to the elastic thickness anisotropy in the Canadian Shield. *Geophysical Journal International*, 2007, 168(1): 287-298.

[7] Kirby J K, Swain C J. Mapping the mechanical anisotropy of the lithosphere using a 2D wavelet coherence, and its

application to Australia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 158(2-4): 122-138.

[8] Kirby J F, Swain C J. A reassessment of spectral  $T_e$  estimation in continental interiors: The case of North America. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B08401.

[9] McKenzie D. Estimating  $T_e$  in the presence of internal loads. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 2438.

[10] Pérez-Gussinyé M, Lowry A R, Watts A B, et al. On the recovery of effective elastic thickness using spectral methods: examples from synthetic data and from the Fennoscandian Shield. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: B10409.

[11] Pérez-Gussinyé M, Watts A B. The long-term strength of Europe and its implications for plate-forming processes. *Nature*, 2005, 436(7049): 381-384.

[12] Grotzinger J, Royden L. Elastic strength of the Slave craton at 1.9 Gyr and implications for the thermal evolution of the continents. *Nature*, 1990, 347(6288): 64-66.

[13] Banks R J, Parker R L, Huestis S P. Isostatic compensation on a continental scale: local versus regional mechanisms. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1977, 51(2): 431-452.

[14] McNutt M K, Parker R L. Isostasy in Australia and the evolution of the compensation mechanism. *Science*, 1978, 199(4330): 773-775.

[15] McKenzie D, Fairhead D. Estimates of the effective elastic thickness of the continental lithosphere from Bouguer and free air gravity anomalies. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B12): 27523-27552.

[16] Maggi A, Jackson J A, McKenzie D, et al. Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere. *Geology*, 2000, 28(6): 495-498.

[17] Kirby J F, Swain C J. An accuracy assessment of the Fan wavelet coherence method for elastic thickness estimation. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9: Q03022.

[18] Swain C J, Kirby J K. An effective elastic thickness map of Australia from wavelet transforms of gravity and topography using Forsyth's method. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33: L02314.

[19] Kirby J F, Swain C J. Improving the spatial resolution of effective elastic thickness estimation with the Fan wavelet transform. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(9): 1345-1354.

[20] Pérez-Gussinyé M, Swain C J, Kirby J F, et al. Spatial variations of the effective elastic thickness,  $T_e$ , using multitaper spectral estimation and wavelet methods: examples from synthetic data and application to South America. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2009, 10: Q04005.

[21] Simons F J, van der Hilst R D, Zuber M T. Spatio-spectral localization of isostatic coherence anisotropy in Australia and its relation to seismic anisotropy: Implications for lithospheric deformation. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 2250.

- [22] Rajesh R S, Stephen J, Mishra D C. Isostatic response and anisotropy of the Eastern Himalayan-Tibetan Plateau: A reappraisal using multitaper spectral analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30: 1060.
- [23] Menzies M, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 2007, 96(1-2): 1-21.
- [24] Xu Y G, Chung S L, Ma J L, et al. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in the western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *The Journal of Geology*, 2004, 112(5): 593-605.
- [25] Xu Y G, Huang X L, Ma J L, et al. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147(6): 750-767.
- [26] Zheng J P, O'reilly S Y, Griffin W L, et al. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton, eastern China. *International Geology Review*, 1998, 40(6): 471-499.
- [27] Niu Y L. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(1): 9-46.
- [28] 嵇少丞, 王茜, 许志琴. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄. *地质学报*, 2008, 82(2): 174-193.  
 Ji S C, Wang Q, Xu Z Q. Break-up of the North China Craton through lithospheric thinning. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, 82(2): 174-193.
- [29] Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3-4): 307-322.
- [30] Xu Y G. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. *Lithos*, 2007, 96(1-2): 281-298.
- [31] Zheng Y, Shen W, Zhou L Q, et al. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: B12312.
- [32] Chen L, Zheng T Y, Xu W W. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: B09312.
- [33] Chen L, Tao W, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1-2): 56-68.
- [34] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China, Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9-10): 747-757.
- [35] Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9-10): 733-746.
- [36] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(2): 241-254.
- [37] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [38] Simons F J, Zuber M T, Korenaga J. Isostatic response of the Australian lithosphere: Estimation of effective elastic thickness and anisotropy using multitaper spectral analysis. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B8): 19163-19184.
- [39] Swain C J, Kirby J F. The coherence method using a thin anisotropic elastic plate model. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30: 2014.
- [40] Stark C P, Stewart J, Ebinger C J. Wavelet transform mapping of effective elastic thickness and plate loading: Validation using synthetic data and application to the study of southern African tectonics. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 2558.
- [41] Kirby J F. Which wavelet best reproduces the Fourier power spectrum? *Computers & Geosciences*, 2005, 31(7): 846-864.
- [42] Tassara A, Swain C, Hackney R, et al. Elastic thickness structure of South America estimated using wavelets and satellite-derived gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253(1-2): 17-36.
- [43] Audet P, Bürgmann R. Dominant role of tectonic inheritance in supercontinent cycles. *Nature Geoscience*, 2011, 4(3): 184-187.
- [44] Becker J J, Sandwell D T, Smith W H F, et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy*, 2009, 32(4): 355-371.
- [45] Sandwell D T, Smith W H F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B01411.
- [46] Wei Z G, Chen L, Xu W W. Crustal thickness and Vp/Vs ratio of the central and western North China Craton and its tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(2): 385-389.
- [47] Tian X B, Teng J W, Zhang H S, et al. Structure of crust and upper mantle beneath the Ordos Block and the Yinshan Mountains revealed by receiver function analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 184(3-4): 186-193.



- [48] Zheng Y, Yang Y J, Ritzwoller M H, et al. Crustal structure of the northeastern Tibetan plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography. *Earthquake Science*, 2010, 23(5): 465-476.
- [49] 徐义刚. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈的演化. 地学前缘, 2006, 13(2): 93-104.  
Xu Y G. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(2): 93-104.
- [50] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111; B09305.
- [51] Deng J F, Su S G, Niu Y L, et al. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 2007, 96(1-2): 22-35.
- [52] Zhu R X, Zheng T Y. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3354-3366.
- [53] 郭兴伟, 施小斌, 丘学林等. 渤海湾盆地新生代沉降特征及其动力学机制探讨. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 273-280.  
Guo X W, Shi X B, Qiu X L, et al. Cenozoic subsidence in Bohai Bay Basin: characteristics and dynamic mechanism. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2007, 31(3): 273-280.
- [54] 汪洋, 程素华. 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, 2011, 35(1): 12-23.  
Wang Y, Cheng S H. Thermal state and rheological strength of the lithosphere beneath the eastern China. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2011, 35(1): 12-23.
- [55] 陈凌, 危自根, 程骋. 从华北克拉通中、西部结构的区域差异性探讨克拉通破坏. 地学前缘, 2010, 17(1): 212-228.  
Chen L, Wei Z G, Cheng C. Significant structural variations in the Central and Western North China Craton and its implications for the craton destruction. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2010, 17(1): 212-228.
- [56] 吴福元, 徐义刚, 高山等. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 2008, 24(6): 1145-1174.  
Wu F Y, Xu Y G, Gao S, et al. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2008, 24(6): 1145-1174.
- [57] 朱日祥, 陈凌, 吴福元等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 583-592.  
Zhu R X, Chen L, Wu F Y, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Sci. China: Earth Sci.*, 2011, 54(6): 789-797.
- [58] 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54(14): 1950-1961.  
Zhu R X, Zheng T Y. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2009, 54(14): 1950-1961.
- [59] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? 地学前缘, 2006, 13(2): 105-119.  
Deng J F, Su S G, Liu C, et al. Discussion on the lithospheric thinning of the North China Craton: delamination? Or thermal erosion and chemical metasomatism? *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(2): 105-119.
- [60] Yin A, Nie S Y. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 1993, 12(4): 801-813.
- [61] Li Z X. Collision between the North and South China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 1994, 22(8): 739-742.
- [62] 嘉世旭, 张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. 地球物理学报, 2005, 48(3): 611-620.  
Jia S X, Zhang X K. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3): 611-620.
- [63] Hu S B, He L J, Wang J Y. Heat flow in the continental area of China: a new data set. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-419.
- [64] 王涛, 徐鸣洁, 王良书等. 鄂尔多斯及邻区航磁异常特征及其大地构造意义. 地球物理学报, 2007, 50(1): 163-170.  
Wang T, Xu M J, Wang L S, et al. Aeromagnetic anomaly analysis of Ordos and adjacent regions and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(1): 163-170.
- [65] Plomerová J, Kouba D, Babuška V. Mapping the lithosphere-asthenosphere boundary through changes in surface-wave anisotropy. *Tectonophysics*, 2002, 358(1-4): 175-185.
- [66] 赵国泽, 詹艳, 王立凤等. 鄂尔多斯断块地壳电性结构. 地震地质, 2010, 32(3): 345-359.  
Zhao G Z, Zhan Y, Wang L F, et al. Electric structure of the crust beneath the Ordos fault block. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2010, 32(3): 345-359.
- [67] Zhao L, Zheng T Y, Lü G. Insight into craton evolution: Constraints from shear wave splitting in the North China Craton. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 168(3-4): 153-162.
- [68] Tommasi A, Vauchez A. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: an effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1-2): 199-210.
- [69] 许志琴. 郯庐裂谷系概述. 构造地质论丛, 1984, (3): 39-46.  
Xu Z Q. Outline of the Tanlu rift valley system. *Collection of Structural Geology* (in Chinese), 1984, (3): 39-46.
- [70] Silver P G, Chan W W. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. Res.*,

- 1991, 96(B10): 16429-16454.
- [71] Vinnik L P, Farra V, Romanowicz B. Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at Geoscope and NARS broadband stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1989, 79(5): 1542-1558.
- [72] Savage M K. Seismic anisotropy and mantle deformation; what have we learned from shear wave splitting? *Rev. Geophys.*, 1999, 37(1): 65-106.
- [73] Zhao L, Zheng T Y, Lu G, et al. No direct correlation of mantle flow beneath the North China Craton to the India-Eurasia collision; constraints from new SKS wave splitting measurements. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(2): 1027-1037.
- [74] Audet P, Jellinek A M, Uno H. Mechanical controls on the deformation of continents at convergent margins. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 264(1-2): 151-166.
- [75] Heidbach O, Tingay M, Barth A, et al. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*, 2010, 482(1-4): 3-15.
- [76] Zhang Z J, Wu J, Deng Y F, et al. Lateral variation of the strength of lithosphere across the eastern North China Craton: New constraints on lithospheric disruption. *Gondwana Research*, 2012, 22(3-4): 1047-1059.
- [77] Zhang Z J, Deng Y F, Chen L, et al. Seismic structure and rheology of the crust under mainland China. *Gondwana Research*, 2012, doi: 10.1016/j.gr.2012.07.010.
- [78] 宋美琴, 郑勇, 葛粲等. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 513-525.
- Song M Q, Zheng Y, Ge C, et al. Relocation of small to moderate earthquakes in Shanxi Province and its relation to the seismogenic structures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2): 513-525.
- [79] Wessel P, Smith W H F. New, improved version of generic mapping tools released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 1998, 79(47): 579.

(本文编辑 何 燕)