

# 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

袁炳强<sup>1</sup>, Yvette H. Poudjom Djomani<sup>2</sup>, 王平<sup>3</sup>, 袁学诚<sup>3</sup>, 左愚<sup>4</sup>

(1. 西 北 大 学 地 质 学 系, 陕 西 西 安 710069; 2. GEMOC National Key Center, Department of Earth and Planetary Science, Macquarie University, NSW, Australia; 3. 中 国 地 质 调 查 局, 北 京 100083; 4. 国 土 资 源 部 区 域 重 力 调 查 方 法 技 术 中 心, 陕 西 西 安 710016)

**摘要:** 大陆岩石圈有效弹性厚度( $T_e$ )是表示岩石圈强度的参数, 计算该参数对研究岩石圈大规模构造, 分析大陆板块内的均衡补偿机制有一定意义. 利用 Forsyth 提出的相关技术计算了北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面东南段自黑水到泉州的  $T_e$  值. 并分析了重力和地形波长的相关性特征, 初步认为: 计算  $T_e$  值所选的每个数据块在短波长(6.6~100 km)内岩石圈板块的强度足以平衡地形负载, 重力和地形不相关; 在长波长(100~250 km)内, 地形及地下负载由弯曲模型补偿, 岩石圈板块在地形及地下负载作用下而挠曲. 断面通过地段具有较低热流密度值的四川陆核有较高的  $T_e$  值. 具有较高热流密度值的宁化、大田地区有较低的  $T_e$  值, 反映了较高的热流密度值对应较低的  $T_e$  值; 较低的热流密度值对应较高  $T_e$  值的关系.  $T_e$  可分为南东低值段和北西高值段. 地壳厚度大体上与  $T_e$  值呈正相关关系.

**关键词:** 有效弹性厚度; 相关技术; 北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面.

中图分类号: P311 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)04-0397-06

**作者简介:** 袁炳强(1957—), 男, 高级工程师, 1982年毕业于西安地质学院, 西北大学博士生, 主要从事地球物理资料应用研究.

## 0 引言

地形特征的均衡补偿主要有两种形式, 一种是艾里补偿和普拉特补偿, 补偿通过地下地壳以不变密度增厚(艾里均衡模式)或横向密度变化(普拉特模式)实现; 另一种是弯曲模型补偿, 负载由覆于软流圈之上的岩石圈板块内的弹性应力支撑, 均衡补偿在大范围的区域背景上产生. 弯曲模型岩石圈板块的特征用有效弹性厚度(effective elastic thickness,  $T_e$ )或挠曲刚度(flexure rigidity,  $D$ )描述. 在弯曲模型中, 艾里均衡模式对应的  $T_e$  为零<sup>[1,2]</sup>.

$T_e$  是一个抽象的物理量, 是表示岩石圈强度的参数<sup>[3]</sup>. 岩石圈挠曲刚度的分析, 是研究岩石圈大规模构造的有力工具. 老的、冷的岩石圈通常表现为  $T_e$  高值, 而经历过受热、扩张或其他构造活动的范

围通常表现为  $T_e$  低值. 大洋范围  $T_e$  的研究及在洋板块内的变化表明  $T_e$  与洋板块的热结构有关. 大陆岩石圈的  $T_e$  比较复杂, 大陆范围内温度不是控制  $T_e$  的唯一因素<sup>[4]</sup>, 但对  $T_e$  的研究表明它与大陆板块内的热状态有一定关系. 对  $T_e$  的研究可以指示大陆板块内均衡补偿的机制. 通过比较  $T_e$  值, 可以指示一个地区是否经历热重建及提供岩石圈内热状态信息.

计算  $T_e$  的方法较多, 有标准谱方法、最大熵方法、小波分析方法<sup>5,6</sup>. 笔者用标准谱方法之一的相关技术计算了北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面东南段自黑水到泉州的  $T_e$ .

## 1 计算公式

计算  $T_e$  应用 Forsyth 提出的相关技术. 该技术包括两方面的内容: (1) 计算布格重力异常和地形之间在频谱域中的相关性(实测相关性, observed

收稿日期: 2002-03-09

基金项目: 澳大利亚 Macquarie 大学地球化学演化与大陆成矿研究中心项目.

coherence); (2) 迭代反演预测相关性 (predicted coherence) 并使其与实测相关性有最小均方误差. 大陆岩石圈的弯曲模型假定薄弹性板漂浮在液态的软流圈之上, 而且由于地表(地形)及地下(莫氏面)负载作用而挠曲, 弹性板挠曲的振幅和波长取决于板的挠曲刚度和负载的分布. 短波长内, 地表和地下负载由岩石圈板块的刚度平衡, 且板是不挠曲的, 这种情况下, 重力和地形是不相关的, 其相关性趋于零. 长波长内, 由于地表及地下负载的作用使板挠曲, 此时重力和地形是相关的, 其相关性 $\leq 1^{[1,7]}$ .

$T_e$  和弹性板挠曲刚度  $D$  之间的关系由下式给出:

$$D = ET_e^3 / [12(1 - \nu^2)]. \quad (1)$$

式中:  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比.

### 1.1 实测地形与重力的相关性

频率域中, 实测的相关性定义为:

$$\gamma_0^2(K) = C_s^2(K) / [E_H(K) \cdot E_G(K)]. \quad (2)$$

式中:  $C_s^2(K)$  为重力和地形交叉谱的平方,  $E_H(K) = \langle H(K) H^*(K) \rangle$  为地形的平均谱,  $E_G(K) = \langle G(K) G^*(K) \rangle$  为重力的平均谱,  $*$  表示共轭复数,  $K = |K_x^2 + K_y^2|^{1/2}$  为二维波数,  $K_x, K_y$  分别是  $x, y$  方向上的波数.

为了避免数据中噪音引起的偏差, 计算相关性应用公式:

$$\gamma^2 = (n\gamma_0^2 - 1) / (n - 1). \quad (3)$$

式中:  $n$  为给定波带内独立 Fourier 系数的个数.

相关性的标准偏差由下式给出:

$$\Delta\gamma^2 = (1 - \gamma_0^2)(2\gamma_0^2/n)^{1/2}. \quad (4)$$

### 1.2 密度模型及挠曲刚度反演

假设实测重力异常由几部分组成, 并且假设负载为地表地形及莫氏面起伏. 选择两层密度模型, 那么在负载作用下, 地表和地下两密度界面产生的起伏由二维薄弹性板傅氏变换公式给出:

$$DK^4 U(K) + \rho_m g U(K) = Q(K). \quad (5)$$

式中:  $U(K)$  为弹性板的挠曲幅度,  $\rho_m$  为地幔密度,  $g$  为重力加速度,  $Q(K)$  为已知界面的应用负载.

假设地表及地下负载是独立作用的, 预测相关性  $\gamma_p^2$  由下式给出:

$$\gamma_p^2 = \langle H_t W_t + H_b W_b \rangle^2 / [\langle H_t^2 + H_b^2 \rangle \langle W_t^2 + W_b^2 \rangle]. \quad (6)$$

式中:  $H$  是地表地形,  $W$  为莫氏面起伏, 下标  $t$  和  $b$  分别表示顶部(地表地形)和底部(地壳底部)负载.

计算时先假设一个挠曲刚度求出  $H_t, H_b$  和  $W_t, W_b$ , 然后应用公式(6)计算出  $\gamma_p^2$ .

## 2 重力及高程资料

黑水—泉州地学断面是北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面的东南段<sup>[8]</sup>, 它西起四川黑水, 向东依次经安县、重庆、武隆、凤凰、茶陵、永新、宁化、大田、到福建泉州, 全长约 1 650 km. 重力及高程资料为以剖面为中线, 向南北两侧各延伸 150 km, 即 300 km 宽的走廊式资料. 重力布格异常由为 1:100 万区域重力资料网格化的 4 km×4 km 规则网数据, 高程数据来源于 1:5 万地形图的 1 km×1 km 节点网高程, 亦为 4 km×4 km 的规则网数据. 高程数据与重力数据同点位. 布格重力异常的精度优于  $\pm 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 高程精度优于  $\pm 10 \text{ m}$ .

凤凰(大约 110°E)东, 布格重力异常为低缓的高值异常(图 1), 异常值在  $(-10 \sim -60) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  之间, 109°E~110°E 之间为一重力梯级带(对应大兴安岭—太行山—武陵山重力梯级带). 105°E~109°E 重力场值平稳, 在  $(-80 \sim -120) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  之间. 安县—黑水为一巨大重力梯级带(对应阿尔金山—祁连山—龙门山重力梯级带), 场值变化幅度约  $100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ .

走廊内高程资料显示, 安县(105°E)东高程值在海拔 500 m 之内, 安县向西北地形迅速抬升, 至黑水抬升到 3 750 m.

## 3 地球物理背景

黑水—泉州地学断面走廊内东南端为薄岩石圈分布地区(岩石圈厚度小于 80 km, 图 2), 永新—大田之间及断面西北端为岩石圈正常厚度分布地区(岩石圈厚度为 80~120 km), 断面中段安县向东南到永新之间的广大地区岩石圈较厚(岩石圈厚度大于 120 km). 大约由安县向东南至断面东南端, 地壳厚度较薄, 为 30~40 km, 安县向北西, 地壳厚度迅速增大, 至断面北西端增至 52 km. 走廊内凤凰重力梯级带、安县—黑水重力梯级带对应地壳厚度陡变带, 凤凰重力梯级带地壳厚度变化 5 km 左右, 黑水重力梯级带地壳厚度变化大于 12 km<sup>[9]</sup>.

已有的大地热流密度资料(走廊内)主要分布在长沙—福州地区及成都西北地区. 长沙—福州地区

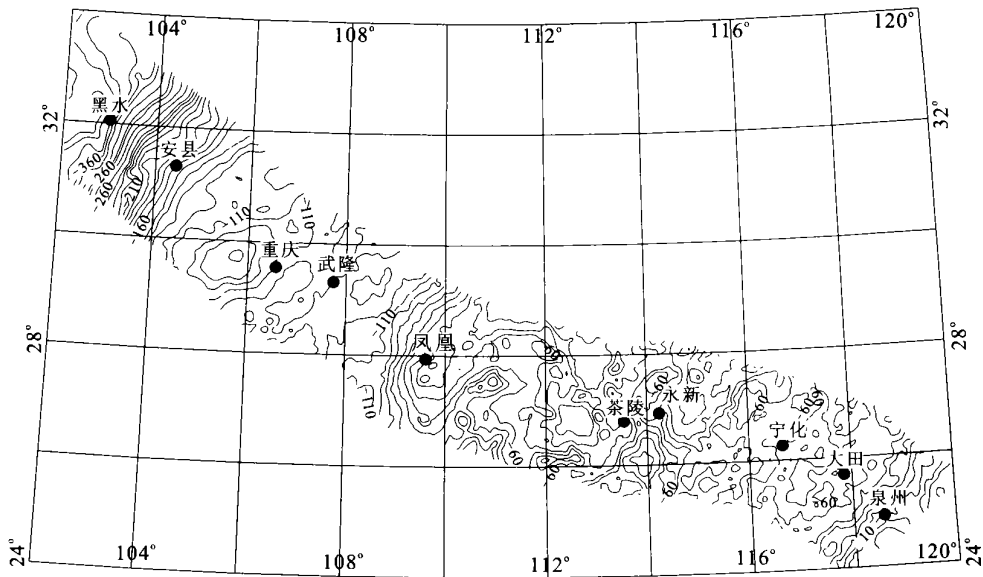


图 1 布格重力异常(等值线间隔  $10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ )

Fig. 1 Bouguer gravity anomaly contoured at intervals of  $10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$

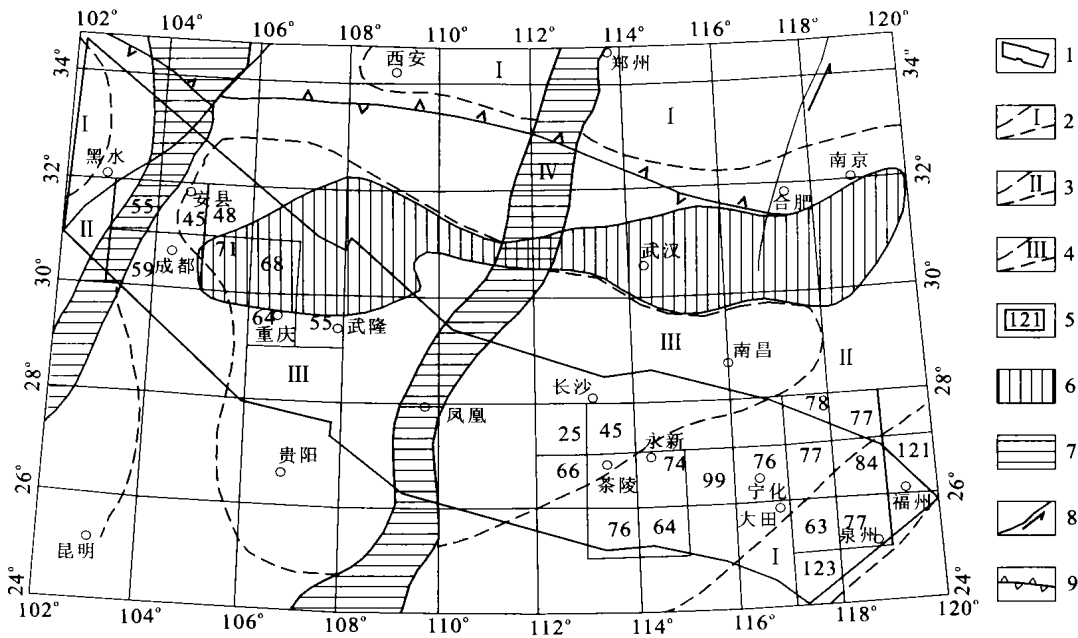


图 2 岩石圈地球物理格架

Fig. 2 Geophysical structural framework of lithosphere

1. 区带走廊; 2. 薄岩石圈分布地区(岩石圈厚度 < 80 km); 3. 岩石圈正常厚度分布地区(岩石圈厚度为 80 ~ 120 km); 4. 厚岩石圈分布区(岩石圈厚度 > 120 km); 5. 地热流值( $\text{mW}/\text{m}^2$ ); 6. 陆核区; 7. 地壳厚度陡变带; 8. 巨型断裂; 9. 缝合带

大地热流密度值相对较高, 一般在  $60 \sim 100 \text{ mW}/\text{m}^2$  之间, 热岩石圈厚度在  $100 \sim 120 \text{ km}$  之间. 成都西北地区显示出  $50 \sim 70 \text{ mW}/\text{m}^2$  的大地热流密度值, 该地区热岩石圈厚度为  $130 \sim 190 \text{ km}$ . 南昌—成都为克拉通地区(具有前寒武纪陆壳, > 700 Ma), 成

都东为陆核(吕梁期大陆固结区, 2 500 Ma).

#### 4 计算结果及讨论

$T_e$  的计算是在澳大利亚 Macquarie 大学地球化

表 1 计算  $T_e$  应用物理参数Table 1 Physical parameters used for estimation of  $T_e$ 

参数	定义	参数值
$Z_m/\text{km}$	莫氏面埋深	28~48
$\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	地壳平均密度	$2.67\times 10^3$
$\rho_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	上地幔密度	$3.30\times 10^3$
$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	重力加速度	9.8
$G/(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2})$	万有引力常数	$6.67\times 10^{-11}$
$E/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	杨氏模量	$1\times 10^{11}$
$\gamma$	泊松比	0.25

表 2 20 个数据块的  $T_e$  及  $D$  值Table 2  $T_e$  and  $D$  values of 20 subgrids

数据块序号	最小均方误差	$T_e/\text{km}$	$D/(\text{10}^{23}\text{N}\cdot\text{m})$
W01	0.44	18	0.52
W02	0.57	20	0.71
W03	0.57	14	0.24
W04	0.53	14	0.24
W05	0.38	32	2.91
W06	0.69	32	2.91
W07	0.56	28	1.95
W08	0.73	11	0.12
W09	0.89	8	0.05
M01	0.60	14	0.24
M02	0.39	9	0.06
M03	0.33	15	0.30
M04	0.53	6	0.02
M05	0.49	6	0.02
M06	0.71	7	0.03
M07	0.65	7	0.03
E01	0.71	4	0.01
E02	1.42	6	0.02
E03	1.30	8	0.05
E04	1.73	5	0.01

学演化与大陆成矿研究中心(GEMOC, key center for geochemical evolution and metallogeny of continents)完成的。

数据处理由西向东分 3 片 ( $102^\circ\text{E} \sim 108^\circ\text{E}$ ,  $108^\circ\text{E} \sim 114^\circ\text{E}$ ,  $114^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ ) 进行。  $102^\circ\text{E} \sim 108^\circ\text{E}$  分为 9 个数据块 (W01—W09),  $108^\circ\text{E} \sim 114^\circ\text{E}$  分为 7 个数据块 (M01—M07),  $114^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$  分为 4 个数据块 (E01—E04)。由于走廊区带的限制, 最小数据块的范围为  $184\text{ km}\times 176\text{ km}$ , 最大数据块的范围为  $252\text{ km}\times 276\text{ km}$ 。数据块选择的原则是在该数据块内实测与预测相关性有最小的均方误差。

计算  $T_e$  时应用物理参数见表 1。计算的各个数据块的  $T_e$  及  $D$  (挠曲刚度) 值 (最佳拟合结果, 有最小均方误差) 见表 2。

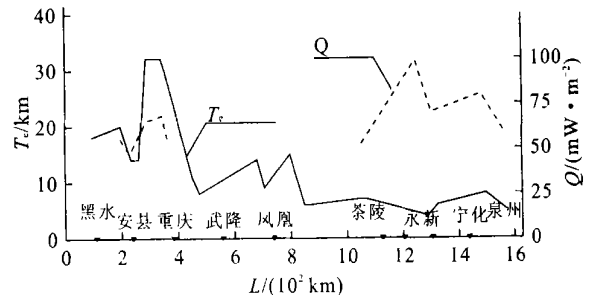
实测相关性和最佳拟合模型预测相关性结果表明, 每个数据块在短波长内 ( $6.6 \sim 100\text{ km}$ ) 相关性趋近于零, 而在长波长内 ( $100 \sim 250\text{ km}$ ) 相关性趋近于 1。可见, 黑水—泉州地学断面经过地段在大范围内, 地形及地下负载由弯曲模型补偿, 岩石圈板块在地形及地下负载作用下而挠曲。小范围内岩石圈板块的强度足以平衡地形负载, 岩石圈板块是不挠曲的。

#### 4.1 $T_e$ 与大地热流密度

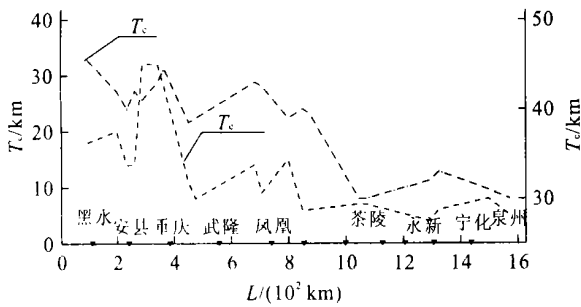
大陆地区, 大地热流与岩石圈构造演化的关系主要表现在热流与构造活动性或最后一次构造—热事件年龄的关系上。一般地说, 构造活动越强烈或构造—热事件年龄越小地区, 大地热流密度值就越高; 构造稳定区则多以低热流密度为特征, 但这种关系不能用简单的数学关系来描述。据国外学者的研究,  $T_e$  值在很大程度上受热结构和热年龄的控制<sup>[10]</sup>, 热年龄越轻,  $T_e$  值就越低; 热年龄越高,  $T_e$  值就越大。大地热流与热年龄的关系及  $T_e$  值与热年龄的关系表明了  $T_e$  与大地热流密度之间的对应关系, 即热流密度值越高,  $T_e$  值就越低; 热流密度值越低,  $T_e$  值就越高。

黑水—泉州地学断面走廊内大地热流数据较少, 安县东、重庆、武隆的地热流密度值在  $50 \sim 70\text{ mW}/\text{m}^2$  之间 (图 3),  $T_e$  为  $28 \sim 32\text{ km}$ 。安县东—武隆属于四川陆核, 具有稳定的太古代基底。其较低的地热流密度值与走廊内  $T_e$  最高值相对应, 反映了热流密度低值与  $T_e$  高值的对应关系, 也可能反映出该区地壳稳定、热年龄较大。

走廊内东段华南地块内大地热流密度数据较多, 长沙南茶陵西北的热流密度值是走廊内最低的, 约  $45\text{ mW}/\text{m}^2$ , 这些数据位于克拉通地区, 其岩石圈厚

图 3  $T_e$  值与大地热流的对比Fig. 3 Comparison between  $T_e$  and heat flow

图中横座标  $L$  为黑水—泉州地学断面在东西方向上的投影长度 (图 4 相同)

图4  $T_e$  值与地壳厚度的对比Fig. 4 Comparison between  $T_e$  and crustal thickness

度大于 120 km. 永新之东的地热流密度值是走廊内已知数据中最高的, 为  $99 \text{ mW/m}^2$ , 该处位于中生代构造带内, 其岩石圈厚度为 80 ~ 120 km. 宁化、大田地区的地热流密度值较高, 分别为  $77 \text{ mW/m}^2$ ,  $63 \text{ mW/m}^2$ , 该处的构造背景与永新东类似. 由图 3, 永新东地热流最大值 ( $99 \text{ mW/m}^2$ ) 恰好对应  $T_e$  的最小值 (4 km), 宁化、大田地区较高的地热流密度对应较低的  $T_e$  值, 从而反映了较高的地热流值与较低的  $T_e$  值的对应关系.

#### 4.2 $T_e$ 与地壳厚度

笔者对黑水—泉州地学断面的爆破地震测深求出的地壳厚度结果进行了整理, 并与所求的  $T_e$  值进行了比较 (图 4). 由图 4 可以看出, 茶陵北西到凤凰地壳厚度增大约 10 km, 凤凰重力梯级带南西到断面东端泉州, 地壳厚度变化很小, 莫氏面深度在 30 ~ 33 km 之间, 该段的  $T_e$  也相对稳定, 其值为 4 ~ 8 km. 凤凰重力梯级带向北西大约至黑水地壳厚度为 39 ~ 45.5 km, 该段的  $T_e$  值变化较大, 在 11 ~ 32 km 之间. 凤凰南西与茶陵北西之间有两个数据块 (M04, M05) 地壳厚度分别为 40 km, 39.5 km, 其对应  $T_e$  值为 6 km. 大体以凤凰为界, 地壳厚度、 $T_e$  值可分为南东低值段和北西高值段, 地壳厚度宏观上与  $T_e$  值呈正相关关系, 相应较大地壳厚度对应较高的  $T_e$  值, 较小地壳厚度对应较低的  $T_e$  值. 与大陆岩石圈  $T_e$  值变化范围 5 ~ 110 km, 具有双峰式分布, 其主峰值在 10 ~ 30 km, 次峰值在 70 ~ 90 km 这些特征相比较<sup>[11, 4]</sup>, 断面南东段属于  $T_e$  低值区, 北西段  $T_e$  值在其主峰值范围.

非常感谢澳大利亚 Macquarie 大学地球化学演化与大陆成矿研究中心 Reilly 教授、William 教授和张明博士对本研究工作的大力支持和帮助; 同时, 也感谢国土资源部区域重力调查方法技术中心杨亚斌

高级工程师、于国民高级工程师为本研究工作绘制了部分图件.

#### 参考文献:

- [1] Donald W F. Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere [J]. *J Geophys Res*, 1985, 90: 12623—12632.
- [2] Maria T Z, Timothy D B, Donald W F. Effective elastic thickness of lithosphere and mechanisms of isostatic compensation in Australia [J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 9353—9367.
- [3] 付永涛, 李继亮, 周辉, 等. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究综述[J]. *地质论评*, 2000, 46(2): 149—159.  
FU Y T, LI J L, ZHOU H, et al. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere [J]. *Geological Review*, 2000, 46(2): 149—159.
- [4] Eugene B B, Michel D. The effective elastic thickness ( $T_e$ ) of continental lithosphere; what does it really mean [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 3905—3927.
- [5] Yvette H P D, Fairhead J D, William L G. The flexural rigidity of Fennoscandia; reflection of tectonothermal age of the lithosphere mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 174: 139—154.
- [6] Anthony R L, Robert B S. Flexural rigidity of the basin and Range—Colorado plateau—Rocky Mountain transition from coherence analysis of gravity and topography [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 20123—20140.
- [7] Poudjom Y H, Nnange J M, Diament M, et al. Effective elastic thickness and crustal thickness variations in west central Africa inferred from gravity data [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22047—22070.
- [8] 袁学诚, 耶哥洛夫, GEMOC. 全球地学断面第 21 号: 北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面简要说明[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
YUAN X C, Egorov A S, GEMOC. A short introduction to global geoscience transect 21: Arctic Ocean—Eurasia—Pacific Ocean [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] 袁学诚. 中国地球物理图集[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [10] Timothy D B, Donald W F, Virgil L S, et al. Variations in effective elastic thickness of the American lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 343: 636—638.
- [11] 焦述强, 金振民. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究及其动力学意义[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(2): 8—12.  
JIAO S Q, JIN Z M. Effective elastic thickness of continental lithosphere and its geodynamical significance [J].

Geological Science and Technology Information, 1996, 15 (2): 8–12.

## Effective Lithospheric Elastic Thickness of Southeastern Part of Arctic Ocean-Eurasia Continent-Pacific Ocean Geoscience Transect

YUAN Bing-qiang<sup>1</sup>, Yvette H. Poudjom Djomani<sup>2</sup>, WANG Ping<sup>3</sup>, YUAN Xue-cheng<sup>3</sup>, ZUO Yu<sup>4</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. GEMOC National Key Centre, Department of Earth and Planetary Science, Macquarie University, NSW 2109, Australia; 3. China Geological Survey, Beijing 100083, China; 4. Centre for Regional Gravity Studies, the Ministry of Land and Resources, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The effective lithospheric elastic thickness of the continent is an important parameter to examine the large-scale structure and analyze the mechanism of isostatic compensation within the plate, and is a parameter standing for the strength of the lithosphere. The  $T_e$  values along Quanzhou-Heishui, the southeast section of the Arctic Ocean-Eurasian continent-Pacific Ocean geoscience transect, are estimated by using the coherence technique developed by Forsthy. Studies of the feature of the coherence between gravity and topography suggest that at short wavelengths (6.6–100 km) for each data box that is used to estimate  $T_e$ , the plate is strong enough to support topographic loads and gravity and topography are uncorrelated; at long wavelengths where the plate is deflected by surface and subsurface loads which are compensated by the flexure model. The high  $T_e$  values of Sichuan land-stone with low heat-flow values and the low  $T_e$  values in Ninghua, Datian with high heat-flow values reflect a correlation, with low heat-flow values corresponding to high  $T_e$  values and with high heat-flow values corresponding to low  $T_e$  values.  $T_e$  values can be divided into two sections: northwest high section and southeast low section. There is roughly a positive correlation between crustal thickness and effective elastic thickness of the lithosphere.

**Key words:** effective elastic thickness; coherence technique; Arctic Ocean-Eurasian continent-Pacific Ocean geoscience transect.