

东海—菲律宾海剖面岩石层有效弹性厚度计算及分析

吴健生, 王明明, 蔡家新

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用均衡响应函数法分段计算了自东海至东马里亚纳海盆的剖面岩石层有效弹性厚度, 并利用海沟洋侧海底地形按端载加压弹性板弯曲模式对琉球海沟和马里亚纳海沟洋侧块体的弹性厚度进行了计算和对比, 结合测线经过地区的地震地壳测深结果等地质、地球物理研究成果对分段计算结果进行了分析. 结果表明, 由均衡响应函数计算曲线多个区段可估计出 2 个弹性厚度值. 取值大的弹性厚度, 在不同区段其数值较为接近, 为 20~25 km, 这种共性是现在热状态下海洋岩石层区域弹性特征的反映, 值小的弹性厚度则是各区段内不同地质作用效果的个性反映.

关键词: 东海—菲律宾海剖面; 有效弹性厚度; 岩石层弹性板挠曲; 均衡响应函数

中图分类号: P312.3

文献标志码: A

Lithosphere Effective Elastic Thickness Calculation and Analysis of East China Sea to Philippine Sea

WU Jiansheng, WANG Mingming, CAI Jiawin

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

Abstract: The isostatic response function was used to calculate the effective elastic thickness of lithosphere profile from East China Sea to East Mariana Basin. The Ryukyu trench and Mariana trench topography toward the ocean side was also used to validate elastic thickness based on the elastic plate bending model with stress load on the toe of plate, and analyzed the effective elastic thickness results of different sections in conjunction with seismic sounding, geological and geophysical research results. Results demonstrate that Two effective elastic thickness values estimated from the isostatic response function curves, large effective elastic thickness values are close, between 20~25km, the larger effective elastic thickness values reflect the regional thermal state of the

marine lithosphere elastic characteristics. The smaller effective elastic thickness values reflect the geological process characteristics of different sections.

Key words: East China Sea to Philippine Sea profile; Effective elastic thickness; Elastic plate flexure; Isostatic response function

东海和菲律宾海是西太平洋边缘海的组成部分, 是研究海陆相互作用的关键地区之一. 在海陆相互作用的研究中, 地壳均衡状态的认识是一个重要方面, 通常通过计算艾利均衡模式下的均衡重力异常来表征. 正负均衡重力异常的存在既展示所在区域岩石层受到外力的作用(水平挤压、拉张或负载的变化), 也表达在该区域一旦外力消失将会发生的沉降或抬升和伴随的深部地质过程. 艾利均衡模式直观表达了与计算尺度匹配的深部地质结构对表层负载的响应和调整, 但未考虑岩石层的弹性. 而地球介质在地质时间尺度的荷载作用和真正的流体仍存在区别, 在边缘海地区由于其受板块俯冲碰撞及弧后扩张等力的作用, 地壳本身可有一定弹性强度, 较小空间尺度的载荷可被支撑住, 深部地质结构对表层负载的响应可出现一对一的不同步, 需要进一步考虑岩石层的弹性板挠曲和区域均衡补偿.

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^[1-2]. Kudo 等^[3]计算了日本岛弧的岩石圈有效弹性厚度, 分析了岩石圈热状态及应力对岩石圈厚度的影响. Yoshioka 等^[4]分析了菲律宾板块向南海海槽俯冲部位的有效弹性厚度的横向变化; 刘保华等^[5]利用重力和地形资料计算了冲绳海槽的均衡响应函数, 并指出引起冲绳海槽南、中 2 段岩石圈弹性厚度差异的原因是岩石圈温度和补偿机制不同所

收稿日期: 2015-08-22

基金项目: 中国海及邻域地质地球物理系列图项目(GZH200900504); 国家自然科学基金(41541027); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2010AA09Z302)

第一作者: 吴健生(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为综合地球物理. E-mail: wujiansh@tongji.edu.cn

通讯作者: 王明明(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为海洋地球物理与海底构造. E-mail: 10843wmm@tongji.edu.cn

致. 赵俐红等^[6]对中西太平洋海山区的岩石圈有效弹性厚度进行了计算并分析了其地质意义.

目前从地球物理观测数据计算提取(T_e)的方法主要有: 导纳法(均衡响应函数法)、相关性法、正演法、最大熵法、小波分析法等, 其中均衡响应函数法是应用较多的一种^[7]. 本文采用均衡响应函数法分段计算自东海陆架至东马里亚纳海盆的剖面的岩石圈 T_e ; 也利用琉球海沟和马里亚纳海沟的水深资料按岩石层弯曲的弹性板模式对弹性厚度进行计算和对比, 结合测线经过地区的地震地壳测深结果等地质、地球物理研究成果对分段计算结果进行分析.

1 剖面地球物理场特征

1.1 剖面位置

剖面如图 1 中 A—B 东起欧亚板块的东海陆架, 穿过冲绳海槽、琉球岛弧, 在琉球海沟进入属菲律宾板块的西菲律宾海盆, 跨越九州—帛琉海岭、帕里西维拉海盆、西马里亚纳海岭、马里亚纳海槽、马里亚纳海岭, 在马里亚纳海沟处进入属太平洋板块的东马里亚纳海盆, 全长 4 010 km. 因剖面横切欧亚板块、菲律宾海板块和太平洋板块, 其所经的太平洋西部海区有欧亚大陆、边缘海盆和岛弧系, 是地球表面强烈的构造活动地带, 地壳均衡状态遭到剧烈破坏^[8].

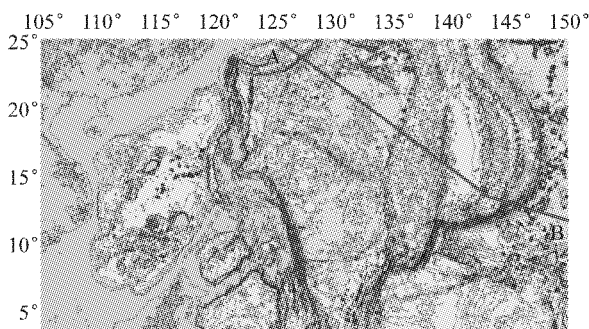


图 1 测线位置示意

Fig. 1 Survey line position sketch map

1.2 剖面重力异常特征

从图 2 可见, 东海陆架区的自由空间异常和布格异常约为 20~40mGal ($1\text{Gal}=10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), 幅度变化较小, 反映板块内部陆壳稳定区重力异常的基本特征. 欧亚板块与菲律宾海板块交界处的琉球岛弧海沟系, 系菲律宾海板块向欧亚板块俯冲形成, 自由空间异常起伏达 150mGal, 布格异常由陆架区的 300mGal 剧增到海沟区的 400mGal, 表明该地处于

不平衡状态. 冲绳海槽是一个目前仍活动的边缘海盆, 自由空间异常高达 50mGal, 布格重力异常达 160mGal, 说明该地区处于不平衡状态. 菲律宾海板块向亚洲大陆板块俯冲导致琉球海沟下沉、琉球群岛地区褶皱隆起和冲绳海槽上地幔隆起. 西菲律宾海盆自由空间异常仅在 20mGal 范围内起伏变化, 海盆区水深较大, 达 5~6 km, 布格异常达 400mGal. 九州—帛琉海岭是帕里西维拉海盆张开后遗留的残留弧, 自由空间异常约 60mGal, 布格异常达 300mGal. 帕里西维拉海盆区自由空间异常很小, 但较稳定, 一般在 20~50mGal 内起伏变化, 海盆水深 4~5 km, 布格异常比西菲律宾海盆区稍小. 剖面所切过的一些正向地形, 如九州—帛琉海岭自由空间异常都较小, 布格异常明显减小. 菲律宾海板块与太平洋板块交界处的马里亚纳岛弧海沟系自由空间异常为 107mGal, 布格异常达 280mGal. 海沟处不但受上部海水和沉积物的垂向应力, 在水平方向还受两侧板块相互作用的水平应力, 导致海沟处的自由空间异常有较大起伏, 由水深资料按艾利均衡模式计算的均衡补偿面出露海底, 表明海沟处的地壳不平衡, 地下岩石层处于弹性应力作用状态.

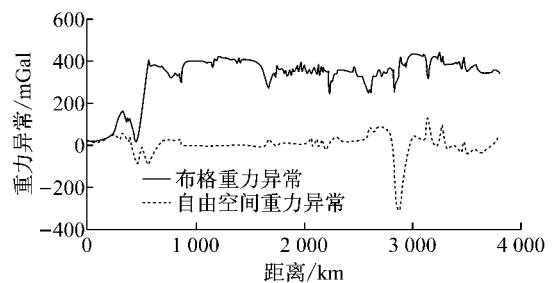


图 2 剖面布格异常与自由空间异常

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly and free-air gravity anomaly

2 均衡响应函数的计算

2.1 计算原理

实验均衡基本思想是假设地球内部对地形负荷响应为线性, 地球重力场对这种负荷的响应则可表示成地形与地球均衡响应函数的二维褶积. 实验均衡将地形与重力异常紧密联系在一起, 结合不断改进的补偿模型可对岩石圈的弹性结构与应力状态作出较好估计^[9]. 弹性板对地形负载的理论响应函数可表示为

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

式中; ρ_c 为地壳平均密度; ρ_m 为地幔平均密度; ρ_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 为弹性板刚度, $D = ET_e^3 / [12(1-\mu^2)]$,其中 E 为杨氏模量; μ 为泊松比; ω 为波数, $\omega = 2\pi/\lambda$, λ 为地形波长。 d 为平均水深,考虑海水层的负载影响,同时不考虑层间密度不同,则

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

利用均衡响应函数的定义式,即谱相关的方法求取实验均衡响应值,公式为

$$Z'(\omega) = \frac{S_g(\omega) \cdot S_h^*(\omega)}{S_h(\omega) \cdot S_h^*(\omega)} \quad (3)$$

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。

2.2 实际资料均衡响应函数的计算

由于东海—菲律宾海剖面(图 3)测线较长,经过了欧亚板块、菲律宾海板块和太平洋板块,根据剖面经过的构造部位,将其划分成 5 个区段,分别计算每一区段的均衡响应函数。

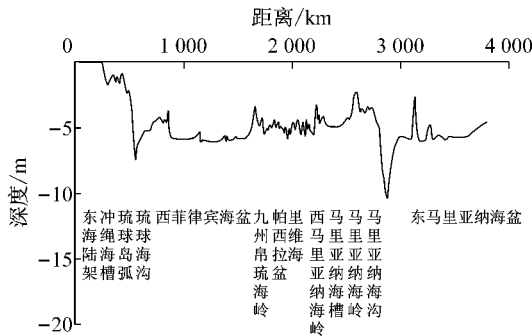
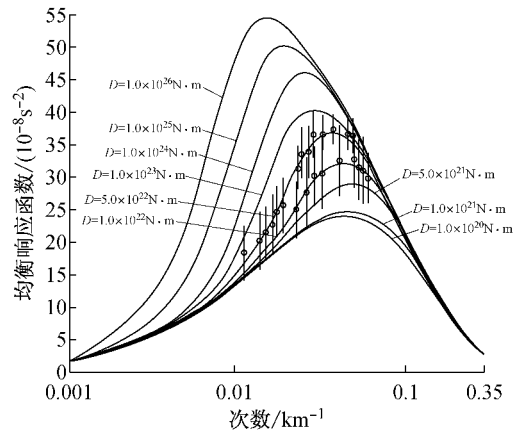


图 3 剖面水深图
Fig.3 Bathymetric chart

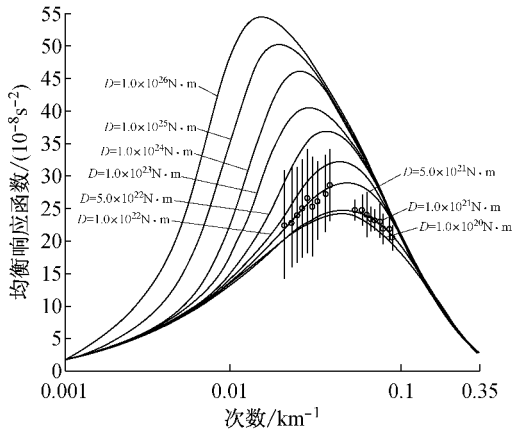
区段 1 对应剖面测线 224~874 km 位置,经过了东海陆架、冲绳海槽、琉球岛弧、琉球海沟和西菲律宾海盆。由区段 1 水深和重力实际资料计算的均衡响应数据如图 4a。区段 2 对应剖面测线 874~1 467 km 位置,位于西菲律宾海盆内部,异常特征主要反映 2 处海底的山脊。由区段 2 水深和重力实际资料计算的均衡响应数据如图 4b 所示。区段 3 对应剖面测线 1 467~2 376 km 位置,经过了九州—帛琉海岭、帕里西维拉海盆和西马里纳亚海岭。由区段 3 水深和重力实际资料计算的均衡响应数据如图 4c。区段 4 对应剖面测线 2 376~3 042 km 位置,经过了马里纳亚海槽与马里纳亚海沟。由区段 4 水深和重力实际资料计算的均衡响应数据如图 4d。区段 5 对应剖面测线 3 042~3 798 km 位置,经过东马里纳

海盆。由区段 5 水深和重力实际资料计算的均衡响应数据如图 4e。模型计算中用到的参数为: $\rho_w = 1\ 030\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_c = 2\ 670\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_m = 3\ 270\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $g = 9.8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, $E = 6.5 \times 10^{10}\ \text{Pa}$, $\mu = 0.25$ 。 D 对应的 T_e 值如表 1。

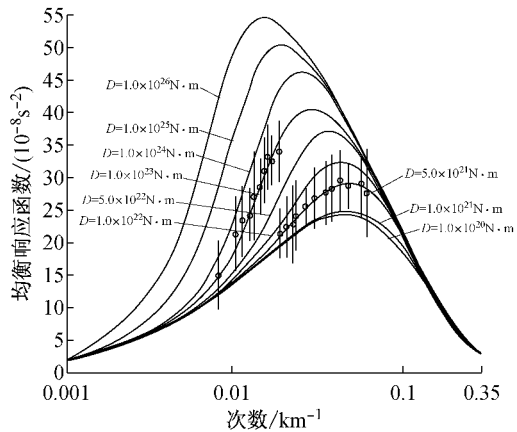
从图 4a 可见,区段 1 实际计算的均衡响应数值分布在 $D = 5.0 \times 10^{22}\ \text{N} \cdot \text{m}$ 和 $D = 1.0 \times 10^{22}\ \text{N} \cdot \text{m}$ 两曲线附近,对应 T_e 值分别为 20.5 km 和 12.0 km。该区段对应的主要地形负载有冲绳海槽、



a 区段 1



b 区段 2



c 区段 3

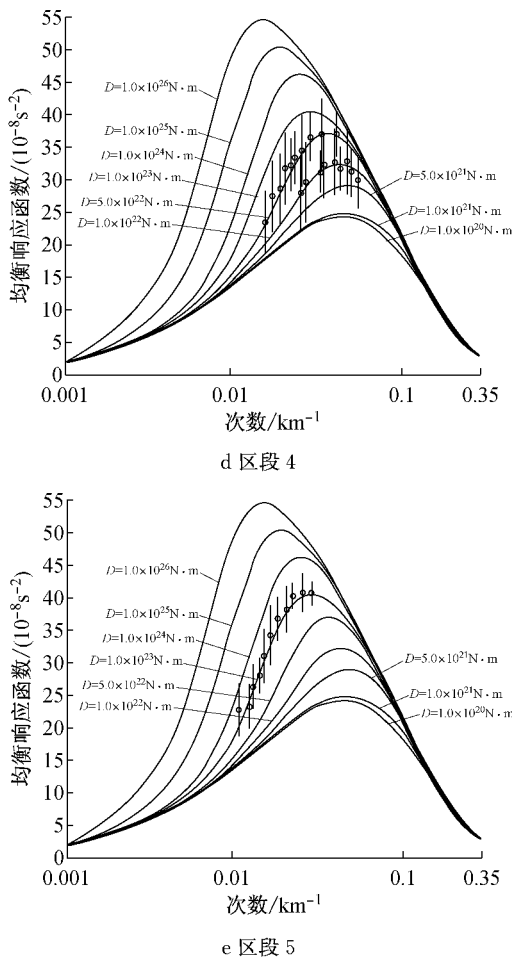


图 4 不同区段均衡响应函数

Fig. 4 Different sections isostatic response function

琉球岛弧、琉球海沟,其中深达 7 000 余米的琉球海沟为该区段的主要变化地形,其上部受沉积物的荷载作用,水平方向受菲律宾板块向欧亚板块俯冲产生的挤压。地震资料表明:菲律宾海板块正沿琉球海沟俯冲于欧亚板块之下。按震源深度,俯冲深度不超过 300 km。根据海沟处岩石层挠曲的计算结果,琉球海沟的 T_e 为 20.4 km,与该区段均衡响应函数计算的 T_e 中值大的(20.5 km)较一致。

表 1 不同弹性刚度对应的弹性厚度

Tab. 1 Different elastic thickness values corresponding elastic rigidity

$D/(\text{N} \cdot \text{m})$	T_e/km	$D/(\text{N} \cdot \text{m})$	T_e/km
1.0×10^{26}	258.7	1.0×10^{22}	12.0
1.0×10^{25}	120.1	5.0×10^{21}	9.5
1.0×10^{24}	55.7	1.0×10^{21}	5.6
1.0×10^{23}	25.9	1.0×10^{20}	2.5
5.0×10^{22}	20.5		

冲绳海槽为一北东向的弧形海槽,北浅南深,南部水深大于 2 000 m。海槽内部广泛发育大体平行于海槽走向的正断层和地堑构造。海槽有地震、火山活

动,热流值高,地壳结构以过渡壳为主,但有的地方已向洋壳过渡,表现为洋壳性质。一般认为,冲绳海槽是琉球岛弧后边缘盆地,为弧后扩张早期阶段的产物。通过地震声学浮标的测量和琉球岛屿地质的对比也表明,冲绳海槽盆地的形成时期为中新世末期,并且有 2 期构造运动,至今仍在持续发育。1 区段均衡响应函数计算的有效弹性厚度值小的(12.0 km)可能就是冲绳海槽处岩石层弹性状态的表现。

从图 4b 可见,区段 2 实际计算的均衡响应函数值分布在 $D = 5.0 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $D = 1.0 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ 两曲线附近,对应的 T_e 值分别为 9.5 km, 5.6 km。西菲律宾海盆为不活动边缘盆地,位于琉球、菲律宾岛弧—海沟系与九州—帛琉海岭之间,海盆水深多在 5 km 以上,上覆沉积层一般较薄,大多在 100 m 左右。盆底为大洋型地壳,时代主要为始新世。由于该区段对应西菲律宾海盆内部,主要地形特征是 2 处海底山脊,推测计算的弹性厚度值主要是这 2 处海底山脊岩石层弹性状态的表现。

从图 4c 可见,区段 3 实际计算的均衡响应函数值分布在 $D = 1.0 \times 10^{23} \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $D = 5.0 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ 两曲线附近,对应 T_e 为 25.9, 9.5 km。该区对应九州—帛琉海岭、帕里西维拉海盆和西马里纳亚海岭,其中九州—帛琉海岭是东侧帕里西维拉海盆扩张后遗留下来的残留弧,属于无震海岭性质。计算的地壳厚度约为 10 km,比左右海盆约厚 4 km。3 层地震波速分别为 3.5, 5.6 和 6.6 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,对应地壳厚度为 2.0, 3.2 和 4.6 km,基本属大洋型地壳;但波速为 5.6 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的层 2 的厚度有所增加。

而帕里西维拉海盆是典型的弧后盆地,海底地形崎岖不平,由深海钻探与拖网取样获知盆底有典型的大洋玄武岩,据地震资料^[10],地壳厚度为 7~8 km,比西菲律宾海盆约厚 1 km。3 层的波速分别为 3.1, 4.8~5.1 和 6.8~7.0 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的地壳厚度为 0.9~2.0, 1.6 和 5.0 km,为大洋地壳。据磁异常条带得出盆地时代为晚渐新世至早中新世,与深海钻探的结果一致,表明该海盆的扩张活动在近期已经停止。西马里纳亚海岭介于帕里维拉海盆与马里纳海槽之间,西坡平缓,东坡陡峻。上覆上新世至第四纪钙质软泥,其下为晚中新世火山岩,钻井资料揭示该海岭直至晚中新世还是火山活动带。地震资料表明,岛弧上波速为 3.3 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的层 1 厚 2 km,波速 5.5 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的层 2 变厚,近 5 km,波速 6.6~7.0 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的层 3 也变厚,约 5 km。

从地壳结构和形成年代上可见,该区段可分成

地壳增厚、形成年代较老和正常厚度、形成年代较新的2种类型. 计算的均衡响应函数聚合成2组弹性厚度值(25.9, 9.5 km)可能是这2种类型的反映.

从图4d可见, 区段4实际计算的均衡响应函数值大多分布在 $D=5.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $D=1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 曲线附近, 对应的 T_e 分别为20.5, 12.0 km, 分别对应马里亚纳海沟和马里亚纳海槽. 马里亚纳海沟为太平洋板块向菲律宾板块的俯冲作用带, 海沟处受上部沉积物负载作用, 同时受板块俯冲力作用发生挠曲变形, 海沟处的岩石圈厚度增大, 同时板块的曲率变化对岩石圈弹性厚度也会产生影响. 马里亚纳海槽表现为均衡异常, 时代约为上新世, 地壳厚度较小, 马里亚纳海槽具有高热流值, 为一正在活动扩张的弧间盆地, 属大洋型地壳, 西部海底崎岖不平, 东部由于火山碎屑沉积群的覆盖, 较为平坦.

从图4e可见, 区段5实际计算的均衡响应函数值分布在 $D=1.0 \times 10^{23} \text{ N} \cdot \text{m}$ 曲线附近, 对应的 T_e 为25.9 km. 该区对应东马里亚纳海盆. 东马里亚纳海盆为大洋型地壳, 是太平洋板块的较老部分, 年龄为侏罗纪—早白垩纪.

图5为不同区段的 T_e 值的统计. 可见, 除区段5, 区段1至区段4均衡响应函数计算结果都出现2个弹性厚度. 在区段1和区段4, 值大的弹性厚度与琉球海沟和马里亚纳海沟处利用弹性板弯曲模式计算的弹性厚度较一致. 取值大的弹性厚度, 区段1、区段3、区段4和区段5的数值基本在20~25 km, 这种共性是现在热状态下海洋岩石层区域弹性特征的反映. 依据Walcott^[11]关于海洋岩石层年龄、弹性厚度和地震厚度的关系, 由位于马里亚纳海沟以东的区段5的岩石层弹性厚度对应的地震厚度将达到90 km以上, 而包含西菲律宾海盆的区段1、区段3、区段4的岩石层弹性厚度对应的地震厚度为40~50 km.

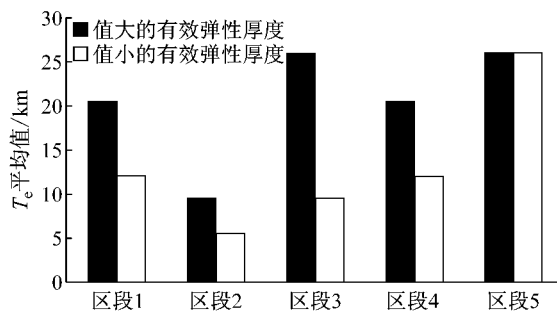


图5 不同区段的 T_e 平均值

Fig. 5 T_e mean values of different sections

区段1和区段4对应的低值 T_e 也较一致. 区段1的冲绳海槽扩张时代为中新世, 区段4的马里亚纳海槽扩张时代为上新世, 形成时代均较新, 具有高热流值, 推测低值弹性厚度的特征就是它们的反映.

如前所述, 从地壳结构和形成年代上分析, 可将地壳分为地壳增厚、形成年代较老和正常厚度、形成年代较新的2种类型. 计算的均衡响应函数聚合成2组弹性厚度数值, 可能是这2种地壳类型的反映.

2.3 海沟处岩石层挠曲计算

对剖面经过的琉球海沟和马里亚纳海沟利用岩石层的弹性板弯曲模式对弹性厚度进行计算, 弹性平板的弯曲满足如下基本方程^[12]:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + (\rho_m - \rho_w) g W = 0 \quad (4)$$

其中, W 为平板的弯曲, 其解可以表示为

$$W = W_b \sqrt{2} e^{-\frac{x}{x_b}} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{x - x_0}{x_b - x_0} \right) \right] \cdot \sin \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{x - x_0}{x_b - x_0} \right) \right] \quad (5)$$

式中: x 为海沟横坐标; x_0 为第一零点横坐标; x_b 为拱点横坐标; W_b 为拱点纵坐标. 通过式(5)由琉球海沟和马里亚纳海沟处的地形资料可计算得到琉球海沟和马里亚纳海沟的有效弹性厚度分别为20.4 km和20.8 km.

3 结论

(1) 由实际资料分区段计算的均衡响应函数在研究区多个区段可估计出2个有效弹性厚度值. 取值大的弹性厚度不同区段其数值较为接近, 在20~25 km, 这种共性是现在热状态下海洋岩石层区域弹性特征的反映.

(2) 经过九州—帛琉海岭、帕里西维拉海盆和西马里亚纳海岭的区段3, 从地壳结构和形成年代上分析可分成地壳增厚、形成年代较老和正常厚度、形成年代较新的2种类型. 计算的均衡响应函数聚合成2组弹性厚度数值可能是这2种类型的反映.

(3) 位于区段1的冲绳海槽扩张时代为中新世, 位于区段4的马里亚纳海槽扩张时代为上新世. 它们均有形成时代较新、高热流值特点, 推测由均衡响应函数计算的值小的弹性厚度的特征就是它们的反映.