

均衡响应函数法影响因素的模型分析

吴健生¹, 张向宇²

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 均衡响应函数法是求取岩石圈有效弹性厚度值最常用的方法之一,但是在应用过程中存在诸多因素影响方法的适用性和可靠性.通过模型分析的方法对均衡响应法应用过程中存在的几个主要影响因素进行考察,从而为实际工作中数据的选择、处理和应用提供一定的依据.

关键词: 均衡响应函数; 有效弹性厚度; 模型分析

中图分类号: P 311.2; P 631

文献标识码: A

Model Analysis For Influence Factors of Isostatic Response Function Method

WU Jiansheng¹, ZHANG Xiangyu²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Isostatic response function is a commonly-used method to obtain the value of lithosphere effective elastic thickness of the continent, but there are some influence factors affecting the reliability and applicability of the method. Therefore, a discussion is held on the influence factors with the model analysis, and the theoretical basis of the observed data selection, processing and application are given.

Key words: isostatic response function; effective elastic thickness; model analysis

T_e , 岩石圈有效弹性厚度, 定义为与岩石圈板块中实际应力分布所产生的弯矩相等的理论弯曲弹性薄板厚度, T_e 不仅与岩石圈构造运动和动力学有关, 也反映了岩石圈热学、流变结构等方面的信息, 成为近几年较为广泛研究的一个参数^[1-2].

目前用于计算有效弹性厚度的方法主要有: 均衡响应函数法、相关性法、正演法等, 其中均衡响应

函数法是目前应用较多的方法, 它源于实验均衡理论^[3-9]. 申重阳等^[7]在1994年应用地形与重力异常谱相关的方法对滇西地区地壳均衡进行了研究; 刘保华等^[8]在1998年从区域补偿和实验均衡出发导出了上下负载相关的响应函数, 并对冲绳海槽海底地形补偿模式进行了研究; 付永涛等^[9-10]在2005年运用谱相干法计算了云南哀牢山造山带 T_e 值.

均衡响应函数法的理论函数导出是源于无限延伸板状体的应力方程, 而在实际中往往直接将其用于实测数据, 这种近似估算是否可靠, 并且在均衡响应函数求取过程中又存在诸如地形起伏变化等影响因素, 而在翻阅前人文献的过程中没有找到关于方法可靠性和影响因素的研究, 因此本文通过建立模型并进行模型计算对均衡响应函数法的可靠性和适用条件做一分析.

1 均衡响应函数求取方法

1.1 理论均衡响应函数求取方法

弹性板对地形负载的理论响应函数为^[11]:

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

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; 有关系式 $D = ET_c^3/12(1 - \mu^2)$, 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.

考虑海水层的负载影响, 同时不考虑层间密度不同, 则得到:

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

收稿日期: 2010-09-13

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划资助项目(2007CB411706), 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2010AA09Z302)

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

通讯作者: 张向宇(1987—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为重磁资料处理研究. E-mail: zhang5821421@163.com

式中, d 为水深平均深度.

1.2 实验均衡响应函数求取方法

运用响应函数的定义式,即谱相关的方法求取实验均衡响应值,公式为^[11]:

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

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 模型正演计算

2.1 模型分析研究思路

本文研究思路是:首先根据均衡响应函数法求取过程中涉及到的影响因素建立模型,将模型参数取值带入式(2)中求取理论响应函数曲线;由模型地形数据正演重力异常,通过式(3)应用重力谱和地形

谱相关求取实验均衡响应函数值;将实验均衡响应函数值与理论响应函数进行对比拟合求取模型数据对应的有效弹性刚度值 D ,与模型建立时给定的初始刚度值 D 进行对比分析,进而得到不同影响因素对结果的影响评价.

本文研究的影响因素包括不同地形起伏、不同波长地形叠加(主要体现在随机误差的加入)及圆滑方式不同,针对这三个因素分别建立模型计算分析.

2.2 地形起伏影响

2.2.1 模型计算分析

结合科研项目研究需求,建立二维海山模型和陆缘(含陆架、陆坡、海盆)模型,见图 1a 和图 1b,同时为了便于对比,建立直立台阶模型计算,见图 1c.

模型 1:模型初始参数取 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$, $z = 18 \text{ km}$,地形见图 1a,得拟合结果如图 2 所示.

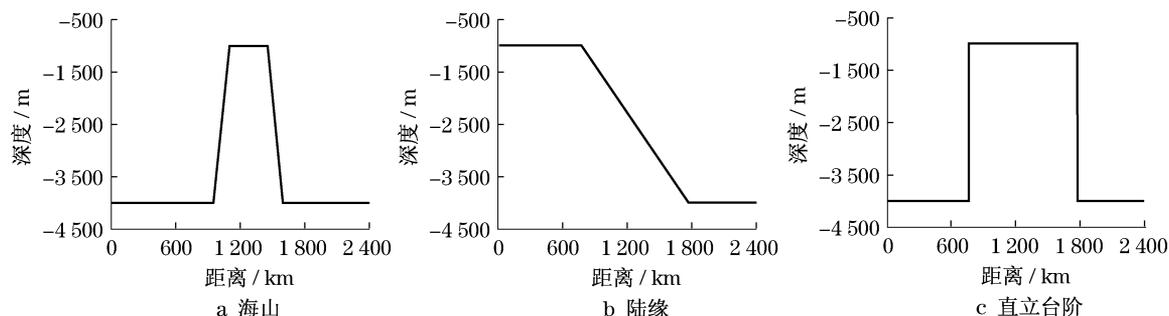


图 1 地形起伏变化模型

Fig.1 Different topography models

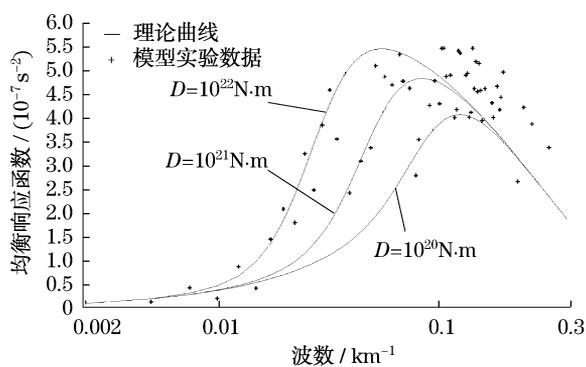


图 2 模型 1 均衡响应函数对比

Fig.2 Comparison of isostatic response function for model 1

由图 2 可见实验均衡响应函数值点均匀散布在 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的理论曲线两侧,可知拟合结果为 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$,而模型的初始刚度值 D 为 $1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$,两者相符,初步说明了均衡响应函数法求取岩石圈有效弹性刚度值的可靠性.

另外从理论均衡响应曲线看到,当波数过大或过小时出现不同 D 值理论曲线汇聚的情况,从均衡响应的原理知道,曲线两端部分分别对应弹性板完全响应

和完全不响应两种极端情况,这时均衡响应函数法将失效,所以该方法只在合理波数区间内进行计算时才有意义,对比拟合计算时应注意这一特点.

模型 2:初始参数取 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$, $z = 18 \text{ km}$,地形如图 1b 所示,得到均衡响应曲线对比图如图 3a 所示.

在图 3a 中看到,相比于模型 1,只变化地形时,实验响应函数值与 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的理论曲线在合理波数区间内拟合,与模型初始 D 值相同,并且相比于模型 1,模型 2 拟合的程度较好.

从模型 1 和模型 2 结果的对比中可以发现地形起伏变化对实验响应函数点分布有较大影响,为了进一步考察地形变化影响,计算直立台阶模型响应函数.

模型 3:初始参数取 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$, $z = 18 \text{ km}$,地形见图 1c,得到均衡响应曲线对比图如图 3b 所示.在图 3b 中可以看到,实验响应函数值与 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的理论曲线拟合,与初始参数取值相同,并且相比于模型 1,虽然实验均衡响应函数点也是均匀分布于理论曲线两侧,但是整体点的分布

都较规则,拟合程度较好,不似模型 1 在大波数区间分布散乱. 因为实验均衡响应函数值的求取是通过

重力谱和地形谱相关得到,这样需要从谱的角度入手对这一结果上的差异进行分析.

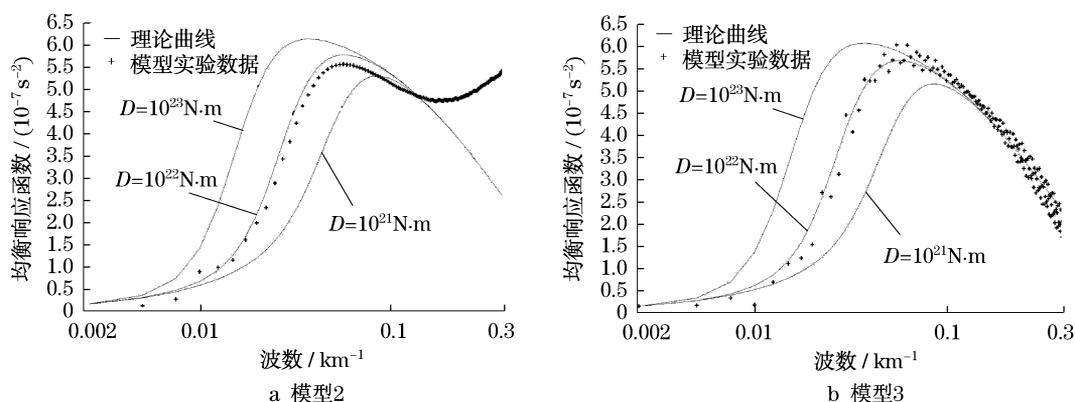


图 3 模型 2 和模型 3 均衡响应函数对比

Fig.3 Comparison of isostatic response function for model 2 and model 3

2.2.2 谱分析

实验均衡响应函数通过重力谱和地形谱相关得

到,为说明产生模型 1 和模型 3 实验均衡响应函数差异的原因,从两组模型的重力谱和地形谱分析,见图 4.

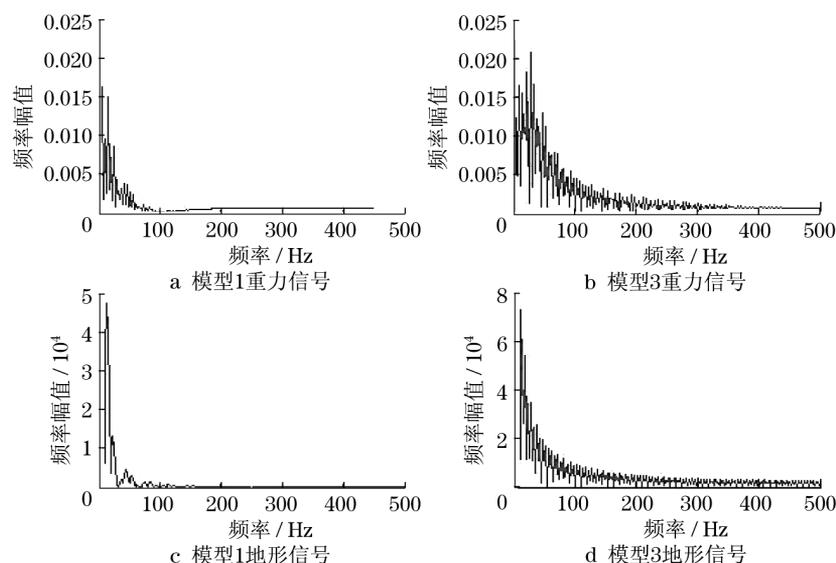


图 4 模型 1 和模型 3 重力与地形频谱图

Fig.4 Spectrogram of gravity and topography for model 1 and model 3

从图 4 中看到模型 3 的两个谱的能量和对应关系要好于模型 1,尤其模型 1 两个谱大于 100 Hz 的部分对应关系较差,所以体现在均衡响应对比图上,模型 1 大波数区间的点比模型 3 散乱得多. 同时从频谱图上可以注意到,在对两个谱值做比值时可能会出现分母过大或分子过小的项,这时就会导致求取的实验均衡响应函数值出现奇点,影响拟合结果,这样在做谱相关之前,应该先对数据做处理,选取合理阈值去除可能导致奇点的频点数据.

2.3 不同波长地形叠加影响

由实测数据求得的实验均衡响应函数往往是由不

同波长地形叠加而来的,所以会呈现杂乱的分布形态,最常见的一种不同波长叠加就是随机误差的加入,下面就来分析随机误差的加入对拟合结果的影响.

模型 4: 在模型 1 中对地形加入强度 1% 左右的随机误差,误差波长与原地形数据波长相近,模型初始参数仍旧取 $D = 1.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$, $z = 18 \text{ km}$,得到均衡响应曲线对比图如图 5 所示.

从图 5 中看到,加入误差后的模型实验响应函数数值点变化不大,说明均衡响应函数法对与地形波长相近的误差具有较好的抗干扰性. 所以当地形中加入随机误差时,叠加地形对结果造成的影响较小,

不影响均衡响应函数法的应用.

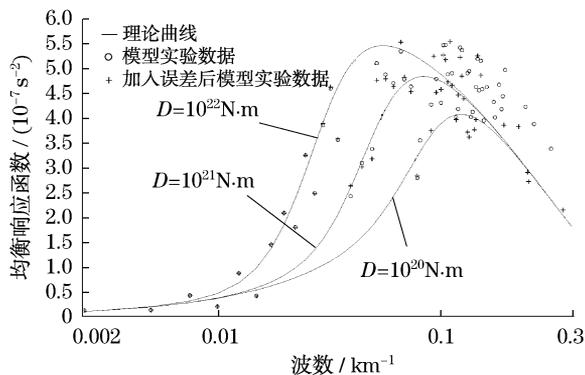


图 5 模型 4 均衡响应函数对比

Fig.5 Comparison of isostatic response function for model 4

2.4 圆滑方式选择

2.4.1 线性圆滑

在模型 1 的实验中看到,实验均衡响应函数值和理论曲线的拟合效果并不够理想,而实测数据往往会更为杂乱,有时为了更好地拟合需要对实验均衡响应点进行圆滑聚合处理.圆滑方式常用线性圆滑,下面对模型 1 运用线性圆滑方式考察效果.

模型 5:对于模型 1 运用线性圆滑方式,结果见图 6.从图 6 中看到,原本分散在理论曲线两侧的实验响应函数点在进行过圆滑后,已经聚合到曲线附近了,并且圆滑后的点与理论曲线的拟合程度很好,可以较为准确地得到 D 值.

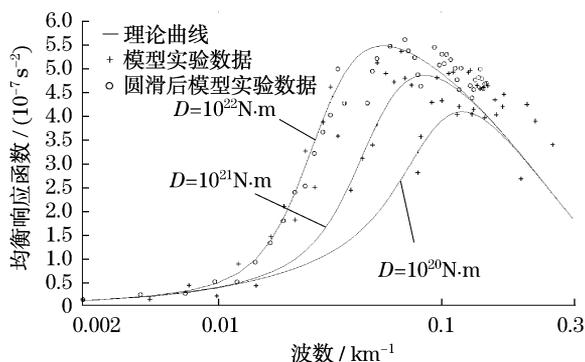


图 6 模型 5 均衡响应函数对比

Fig.6 Comparison of isostatic response function for model 5

线性圆滑方式,受散点离散程度影响较大,若离散程度较大,尤其有偏离较大的奇点存在时,对线性圆滑的结果影响会很大,即使采取更多次的圆滑可能都无法去除其影响,反而大大地影响最后的拟合效果.应用于实测数据中时,常常会出现响应函数值点较为分散的情况,可以考虑运用中位数代替的方式进行数据聚合,这样可以大大消除奇点的影响.

2.4.2 中位数聚合

模型 6:对模型 1 将波数区间均分为 9 个小区间,用每个区间数据的中位数代替该区间离散数据,达到圆滑结果,结果见图 7.

由图 7 可见,中位数代替离散数据点的圆滑方式和理论曲线拟合程度较理想,对于离散程度较大的这些散点,中位数代替的聚合程度更好,受散点的波动影响最小.这样在对实测数据进行拟合时,可以考虑采用这种方法进行处理,从而较好地避免点的离散影响.这也给今后运用均衡响应函数法进行实测数据处理提出了一个好的数据处理方法.

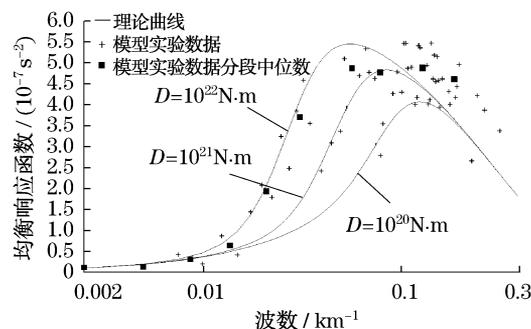


图 7 模型 6 响应函数结果对比

Fig.7 Comparison of isostatic response function for model 6

3 均衡响应函数法应用实例

选取南海某区地形与重力异常数据进行均衡响应函数法计算 T_e 值研究,依据第 2 节提到的各影响因素对实测数据先做一个分析,考虑是否适用于均衡响应函数法.进行实测数据地形谱和重力谱的比较分析并考察观测误差的强度,分析后可以应用均衡响应法来求取研究区 T_e 值.在通过式(2)和(3)得到理论曲线和实测响应函数值后,通过对实测响应函数值进行筛选并应用中位数聚合方法进行平滑后,得到拟合对比图,见图 8.

从图 8 中看到,实测数据响应函数点随着波数区间的增大分别与三条理论曲线拟合,在 $0.01 \sim 0.04 \text{ km}^{-1}$ 波数区间内,实际函数点与 $D = 1.0 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的理论曲线较为拟合,运用公式 $D = ET_e^3 / 12(1 - \mu^2)$ 求得其有效弹性厚度值 T_e 约为 52 km.在查阅研究区相关地质地球物理资料^[12~13]时,从地震波速度、密度变化等方面的信息中可以估测出该区的 T_e 值大约在 50~60 km,与得到的结果相符.同时注意到随着波数的增大,实验响应函数依次与 $D = 1.0 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $D = 1.0 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 理论曲线较为拟合,由于实测数据往往是多个不同波长的地形叠加而成的,不同波数区间对应的不同 D 值可

能就是不同时期的构造运动造成的,这样通过对实测数据分区间研究可以得到不同时期的 T_e 值,进而获取不同时期构造运动情况,给地质解释提供更多的依据,由于篇幅的限制,关于这部分内容的讨论将在今后的研究中进行。

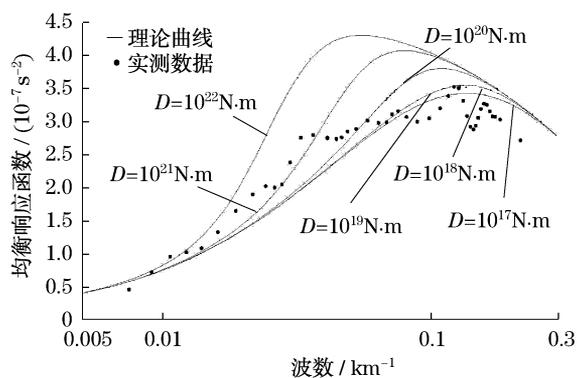


图 8 研究区实测与理论均衡响应函数对比
Fig.8 Comparison of isostatic response function for the research area

4 结果讨论

通过对几组模型的计算分析,得出如下的认识:

(1) 理论均衡响应函数曲线在低波数段和高波数段汇聚,这时均衡响应法求取 T_e 值失效,故实际运用此法要选择合理的波数区间进行才有意义。

(2) 不同地形起伏对均衡响应函数值点的分布有影响.对于某些地形此法的运用可能失效,故在计算前,要进行地形谱和重力谱分析和适当处理.一些地形数据也导致响应函数函数值点与理论曲线拟合程度的不够明显,对于这种情形,需要进行适当的处理才可得到较好的拟合效果,如圆滑聚合等处理。

(3) 当不同波长地形叠加时,波长相近振幅较小时对方法影响不大;当叠加地形波长较小且振幅较大时方法失效。

综上所述,均衡响应函数法应用于实测资料有一定的适用条件,应先对数据进行分析和处理;当满足适用条件后,均衡响应函数法的可靠性较好,求取的 T_e 值可以为进一步的地质解释提供可靠的依据。

参考文献:

- [1] Forsyth D W. Subsurface loading and estimate of the flexural rigidity of continental lithosphere [J]. Geophy Res, 1985, 90:2623.
- [2] 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.
- [3] 袁炳强,Poudjom Djomani Y H,程顺有,等.大陆岩石圈有效弹性厚度的计算及其地质意义[J].地球学报,2002,23(3):269.
- [4] Yuan Bingqiang, Poudjom Djomani Y H, Cheng Shunyou, et al. The estimation of the effective elastic thickness of the continental lithosphere and its geological significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(3): 269.
- [5] Bechtel T D, Forsyth D W, Sharpton V L, et al. Variation in effective elastic thickness of the North American lithosphere [J]. Nature, 1990, 343: 636.
- [6] Burov E B, Diament M. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere; what does it really mean? [J]. Geophy Res, 1995, 100: 3905.
- [7] Dorman L M, Lewis B T R. Experimental isostasy. 1, theory of the determination of the earth's isostatic response to a concentrated load [J]. Geophy Res, 1970, 75(17): 3357.
- [8] 申重阳,甘家思,徐菊生,等.滇西试验场区的试验均衡研究 [J].地壳变形与地震,1994,14(4):48.
- [9] Shen Chongyang, Gan Jiasi, Xu Jusheng, et al. Study on the crust experimental isostasy in the seismic experiment field in the west of Yunnan [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1994, 14(4): 48.
- [10] 刘保华,吴金龙,辛柏森,等.冲绳海槽海底地形的补偿模式研究 I. 理论均衡响应函数的计算 [J]. 海洋学报, 1998, 20(6): 70.
- [11] Liu Baohua, Wu Jinlong, Xin Bosen, et al. Study on topographic compensation model of the Okinawa through. I. calculation of theoretical isostatic response function [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(6): 70.
- [12] 付永涛,范守志,施小斌.关于岩石圈有效弹性厚度的地质理解 [J].地质科学,2005,40(4):585.
- [13] Fu Yongtao, Fan Shouzhizhi, Shi Xiaobin. Geological interpretation of the lithosphere effective elastic thickness [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(4): 585.
- [14] 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].地质评论,2000,46(2):149.
- [15] Fu Yongtao, Li Jiliang, Zhou Hui, et al. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere [J]. Geological Review, 2000, 46(2): 149.
- [16] 傅容珊,黄建华.地球动力学 [M].北京:高等教育出版社,2001.
- [17] Fu Rongshan, Huang Jianhua. Geodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [18] 姚伯初,万玲.中国南海海域岩石圈三维结构及演化 [M].北京:地质出版社,2006.
- [19] Yao Bochu, Wan Ling. Series of monographs on the three-dimensional structure of lithosphere in China [M]. Beijing: Geology Press, 2006.
- [20] 刘昭蜀,赵焕庭.南海地质 [M].北京:科学出版社,2002.
- [21] Liu Zhaoshu, Zhao Huanting. Geology of the South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2002.

JIAO Shuqiang, JIN Zhenmin. Effective elastic thickness of continental lithosphere and its geodynamical significance [J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15(2): 8.