

# Moho 面和上地幔间断面大尺度地形起伏 的低阶球谐分析<sup>\*</sup>

何小波 周蕙兰<sup>†</sup>

(中国科学院研究生院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049)

(2004 年 7 月 29 日收稿; 2004 年 12 月 28 日收修改稿)

He XB, Zhou HL. The low degree spherical harmonic analysis on the large scale topographies of the Moho and the Upper Mantle discontinuities. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(3): 315 ~ 321

**摘 要** 对全球地形高程和 Moho 面深度(CRUST2.0 模型)及上地幔各间断面深度数据进行了球谐分析.在此基础上,通过叠加前 4 阶模式得到了各类数据的空间大尺度分布信息,通过叠加振幅平方值最大的 4 项得到了各类数据的空间主能量分布.结果表明, Moho 面和‘410’间断面的地形存在半球尺度的大尺度非对称性,而且南北半球非对称性比东西半球的更显著;而‘520’和‘660’间断面的地形起伏已没有半球尺度那么大的非对称性,而是尺度略小些的非对称性.

**关键词** 球谐分析, Moho 面, 上地幔间断面, 非对称性

**中图分类号** P312.2

## 1 引言

不少研究者指出,在地表的地质地貌存在非常明显的东西—南北半球的双重不对称性.例如:马宗晋等<sup>[1]</sup>指出,地球北半球因集中了全球大陆面积的 2/3 而可称为陆半球,南半球因主要被海洋覆盖而可称为海半球;全球大洋洋脊的 3/4 位于南半球,那里有南大西洋洋脊、太平洋洋脊、印度洋洋脊和环南极洋脊,而北半球只有一段北大西洋洋脊,因此又可称北半球是挤压半球,南半球是引张半球.汪洋等<sup>[2]</sup>采用 Pollack 等人 1993 年给出的全球热流场 12 阶球谐系数,得到南半球平均热流值高出北半球 33%,南半球地幔热散失量是北半球的 2 倍,因而又可把北半球称为冷半球,南半球称为热半球.黄立人等<sup>[3]</sup>研究了地球的现今变形,发现北半球目前处于挤压变形中,而南半球则处于拉张变形中;若以 90°E 和 90°W 经线为界,则以 180°经线为中心线的太平洋半球(以下简称为东半球)处于挤压变形,而以 0°经线为中心线的大西洋半球(以下简称为西半球),则处于拉张变形中;因此他认为地球处于双重非对称变形中,地球既不是整体收缩,也不是整体膨胀,而是既有收缩区,又有膨胀区.

那么,观测到的这种地表的東西—南北半球的大尺度不对称性是否延伸至地球深部、或者是否以另一种或多种其它形式和尺度上的差异性延伸至深部,以及其可能的成因机制,就是一个需要探究的问题.本文对全球地表高程、Moho 面深度和上地幔间断面深度等数据,进行了多尺度球谐分析;探讨了 Moho 面和上地幔间断面地形的大尺度起伏情况,并与地表地形的起伏情况进行了对比.

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(40374009, 40234047)资助

<sup>†</sup>通讯联系人, zhouhl@gscas.ac.cn

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本研究使用的数据取自 Mooney 和 Laske 的全球地壳模型 CRUST2.0<sup>[4]</sup>与 Flanagan 和 Shearer 的全球上地幔间断面深度及过渡区厚度的模型<sup>[5]</sup>.

CRUST2.0 以  $2^\circ \times 2^\circ$  的网格给出数据,将地壳由上至下分成 7 层:冰、水、软沉积、硬沉积、上地壳、中地壳和下地壳.本研究只提取其中的地表地形高程  $E$  和 Moho 界面深度  $h_M$  数据进行分析. $E$  和  $h_M$  的参考标准都是大地水准面.

Flanagan 和 Shearer 的模型包含有间断面 '410'、'520' 和 '660' 的深度  $h_{410}$ 、 $h_{520}$  和  $h_{660}$  以及过渡区厚度  $H_{TZ}$  等数值.每种数据有 416 个,而且分布不均匀.本研究只提取其中的  $h_{410}$ 、 $h_{520}$  和  $h_{660}$  数据进行分析.

### 2.2 球谐分析方法

上述任一物理量  $f(\varphi, \lambda)$  均可用球谐分析方法作分析处理,展开公式为<sup>[6]</sup>:

$$f(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda] \bar{P}_{nm}(\cos \varphi), \quad (1)$$

其中,  $\varphi$  表示余纬;  $\lambda$  表示经度;  $n$  表示阶数;  $m$  表示次数;

$\bar{P}_{nm}$  表示完全正规化连带勒让德函数,且  $\bar{P}_{nm}(\cos \varphi) = \sqrt{\frac{2(2n+1)(n-m)!}{(n+m)!}} P_{nm}(\cos \varphi)$ ;

$\bar{C}_{nm}$ 、 $\bar{S}_{nm}$  表示完全正规化球谐系数,且  $\bar{C}_{nm} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\varphi, \lambda) \cos m\lambda \cdot \bar{P}_{nm}(\cos \varphi) d\varphi d\lambda$ ,

$\bar{S}_{nm} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\varphi, \lambda) \sin m\lambda \cdot \bar{P}_{nm}(\cos \varphi) d\varphi d\lambda$ ;  $\int_0^{2\pi} \int_0^\pi$  表示积分球面.

式(1)中  $(n, m)$  的每一种取值所对应的物理量的球面分布形式可简称为其对应模式.在得到球谐系数之后,常用下式计算能量谱以考察各模式的权重大小<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{2n+1} \left[ \bar{C}_{n0}^2 + \sum_{m=1}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2) \right], \quad (2)$$

本文对上述各物理量的具体处理方法和过程为:

对数据比较多的  $E$  和  $h_M$  用式(1)展开到 89 阶,而对数据少的  $h_{410}$ 、 $h_{520}$  和  $h_{660}$  仅展开到 12 阶.然后将所得球谐系数用式(2)计算其能量谱,并表示于图 1 和图 2.

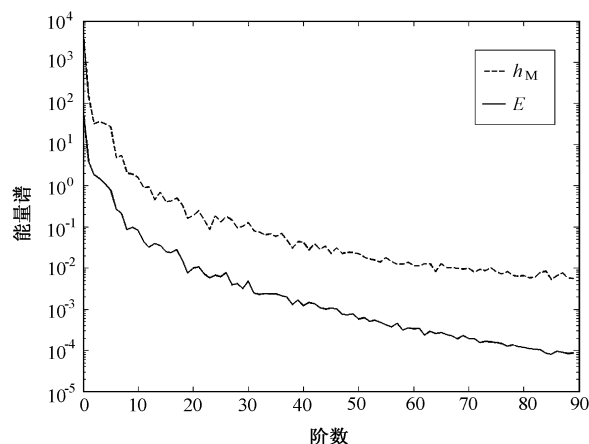


图 1 地表地形  $E$  和 Moho 面深度  $h_M$  能量谱曲线

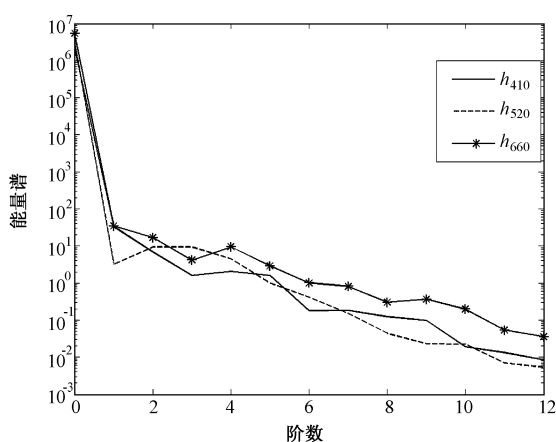


图 2  $h_{410}$ 、 $h_{520}$  和  $h_{660}$  的能量谱曲线

分别将各物理量的  $n = 4$  的低阶模式叠加,以研究它们的空间大尺度分布特征. 以下行文中将这种处理简称为‘低阶叠加’.

取  $e_{nm} = \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2$  中数值最大的 4 项所对应的 8 个模式进行叠加,以研究在各物理量中起主要作用也即主要能量的空间分布特征. 表 1 和表 2 给出依此原则为各物理量选出的模式的球谐系数. 以下行文中将这种处理简称为‘主项叠加’.

表 1  $E$  和  $h_M$  的最大的 4 项  $e_{nm}$  以及对应的球谐系数

物理量	$e_{nm} = \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2$			
$E$	$e_{00} = 71.8$	$e_{10} = 5.4$	$e_{11} = 6.7$	$e_{32} = 5.1$
	$\bar{C}_{00} = -8.5$	$\bar{C}_{10} = 2.3$	$\bar{C}_{11} = -2.2$	$\bar{C}_{32} = -1.6$
	$\bar{S}_{00} = 0$	$\bar{S}_{10} = 0$	$\bar{S}_{11} = -1.4$	$\bar{S}_{32} = 1.6$
$h_M$	$e_{00} = 5858.1$	$e_{10} = 259.8$	$e_{11} = 191.6$	$e_{32} = 160.7$
	$\bar{C}_{00} = -76.5$	$\bar{C}_{10} = -16.1$	$\bar{C}_{11} = 11.1$	$\bar{C}_{32} = 8.2$
	$\bar{S}_{00} = 0$	$\bar{S}_{10} = 0$	$\bar{S}_{11} = 8.3$	$\bar{S}_{32} = -9.7$

表 2  $h_{410}$ 、 $h_{520}$  和  $h_{660}$  的最大的 4 项  $e_{nm}$  以及对应的球谐系数

物理量	$e_{nm} = \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2$			
$h_{410}$	$e_{00} = 2196726.5$	$e_{10} = 70.0$	$e_{11} = 29.3$	$e_{21} = 19.9$
	$\bar{C}_{00} = 1482.1$	$\bar{C}_{10} = 8.4$	$\bar{C}_{11} = 4.0$	$\bar{C}_{21} = 1.5$
	$\bar{S}_{00} = 0$	$\bar{S}_{10} = 0$	$\bar{S}_{11} = -3.7$	$\bar{S}_{21} = 4.2$
$h_{520}$	$e_{00} = 3323703.1$	$e_{22} = 24.5$	$e_{30} = 37.1$	$e_{33} = 19.2$
	$\bar{C}_{00} = 1823.1$	$\bar{C}_{22} = -3.1$	$\bar{C}_{30} = -6.1$	$\bar{C}_{33} = -1.1$
	$\bar{S}_{00} = 0$	$\bar{S}_{22} = 3.8$	$\bar{S}_{30} = 0$	$\bar{S}_{33} = -4.2$
$h_{660}$	$e_{00} = 5466101.4$	$e_{10} = 47.6$	$e_{11} = 56.2$	$e_{21} = 45.9$
	$\bar{C}_{00} = 2338.0$	$\bar{C}_{10} = 6.9$	$\bar{C}_{11} = 7.5$	$\bar{C}_{21} = -0.5$
	$\bar{S}_{00} = 0$	$\bar{S}_{10} = 0$	$\bar{S}_{11} = 0.4$	$\bar{S}_{21} = 6.8$

3 处理结果和分析

3.1 地表地形

图 3(a) 和 3(b) 分别显示了全球地表高程  $E$  的低阶叠加和主项叠加结果. 它们都显示出存在南北半球的差异——北半球上凸而南半球下凹, 和东西半球的差异——东半球下凹而西半球上凸.

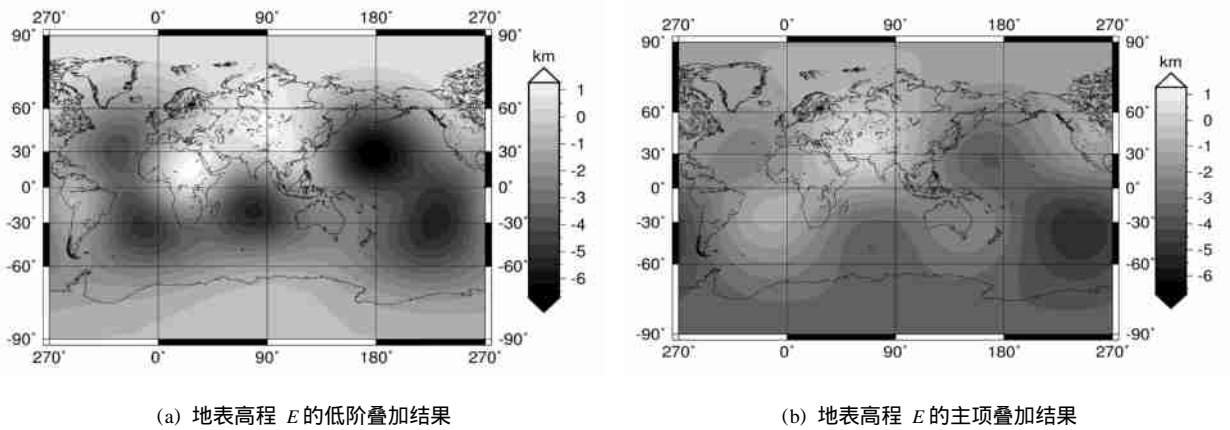


图 3 全球地表地形的球谐分析

表 3 和表 4 分别对低阶叠加结果和主项叠加结果分全球、南、北、东、西半球求出平均值,同时给出各物理量地形的最大相对起伏量. 由表可知,地表地形南北差异最大达 73.7 %比东西的最大差异 33.3 %明显,而且发现就南北半球差异性而言,低阶叠加的差异性 73.7 %比主项叠加的差异性 58.3 %明显,但就东西半球差异性而言,主项叠加的差异性达 33.3 %,比低阶叠加 31.6 %效果明显.

表 3 低阶叠加结果的半球平均信息

名称	全球 /km	北半球 /km	南半球 /km	东半球 /km	西半球 /km	南北半球差异相对 全球平均值的比例	东西半球差异相对 全球平均值的比例
$E$	- 1.9	- 1.2	- 2.6	- 2.2	- 1.6	73.7 %	31.6 %
$h_M$	- 23.2	- 28.1	- 18.3	- 21.4	- 25.0	42.2 %	15.5 %
$h_{410}$	- 417.7	- 420.2	- 415.3	- 418.6	- 416.9	1.2 %	0.4 %
$h_{520}$	- 514.3	- 514.2	- 514.3	- 514.9	- 513.6	0	0.2 %
$h_{660}$	- 658.2	- 660.3	- 656.1	- 660.0	- 656.4	0.6 %	0.5 %

表 4 主项叠加结果的半球平均信息

名称	全球 /km	北半球 /km	南半球 /km	东半球 /km	西半球 /km	南北半球差异相对 全球平均值的比例	东西半球差异相对 全球平均值的比例
$E$	- 2.4	- 1.7	- 3.1	- 2.8	- 2.0	58.3 %	33.3 %
$h_M$	- 21.6	- 26.7	- 16.5	- 19.4	- 23.8	47.2 %	20.4 %
$h_{410}$	- 418.1	- 420.7	- 415.5	- 418.9	- 417.3	1.2 %	0.4 %
$h_{520}$	- 514.3	- 514.8	- 513.8	- 514.3	- 514.3	0.2 %	0
$h_{660}$	- 659.5	- 661.7	- 657.4	- 661.0	- 658.1	0.6 %	0.4 %

3.2 Moho 界面地形

图 4(a) 和 4(b) 分别显示了全球 Moho 界面深度  $h_M$  的低阶叠加和主项叠加结果. 它们都显示出一种与地表地形相反的南北半球的差异——Moho 面在北半球下凹而在南半球上凸,和东西半球的差异——东半球上凸而西半球下凹. 由表 3 和表 4 发现南北差异最大达 47.2 %比东西最大差异 20.4 %明显,而且就南北差异性而言,主项叠加的差异性 47.2 %比低阶叠加的差异性 42.2 %明显,东西差异性也表现出主项叠加的差异性 20.4 %比低阶叠加 15.5 %明显.

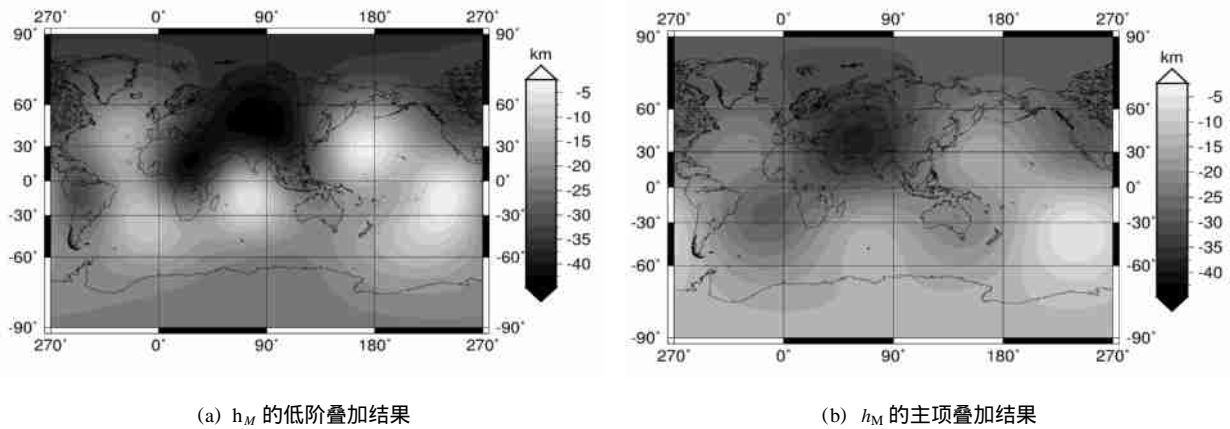


图 4 全球 Moho 界面地形的球谐分析

### 3.3 ‘410’ 间断面地形

图 5(a) 和 5(b) 分别显示了全球‘410’ 间断面深度  $h_{410}$  的低阶叠加和主项叠加结果. 它们都显示出一种与地表地形相反的南北半球的差异——北半球‘410’ 间断面下凹而南半球‘410’ 间断面上凸, 但与地表地形相似的东西半球的差异——东半球下凹而西半球上凸. 由表 3 和表 4 发现南北差异达 1.2 % 比东西差异 0.4 % 明显, 而且与 Moho 面相比‘410’ 的起伏差异已经不是很明显了.

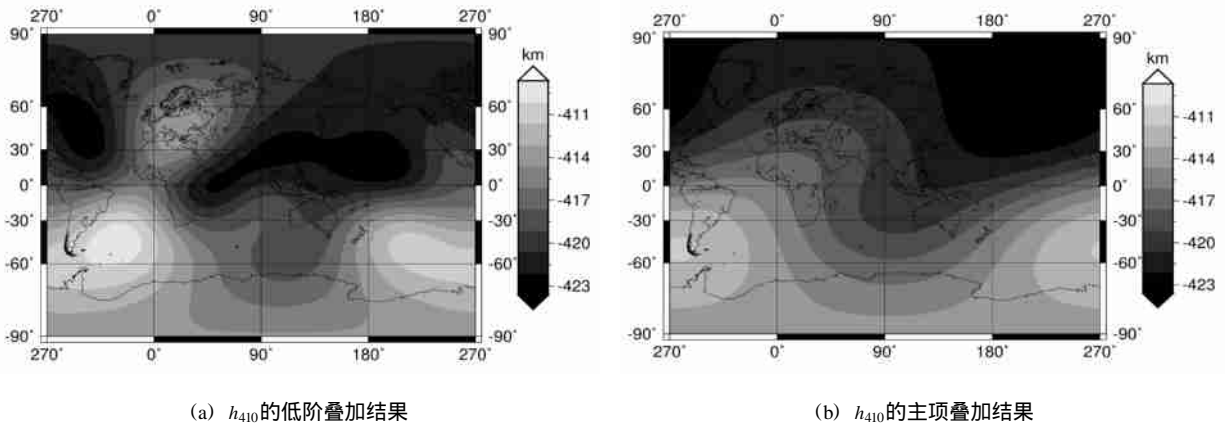


图 5 全球‘410’ 间断面地形的球谐分析

### 3.4 ‘520’ 间断面地形

图 6(a) 和 6(b) 分别显示了全球‘520’ 间断面深度  $h_{520}$  的低阶叠加和主项叠加结果. 从图中和表 3、表 4 发现已经没有非常明显的东西和南北半球尺度的差异 (仅约 0.2 %), 代之的是从北到南呈现的凸—凹—凸—凹这种大约宽为 45° 的条带分布.

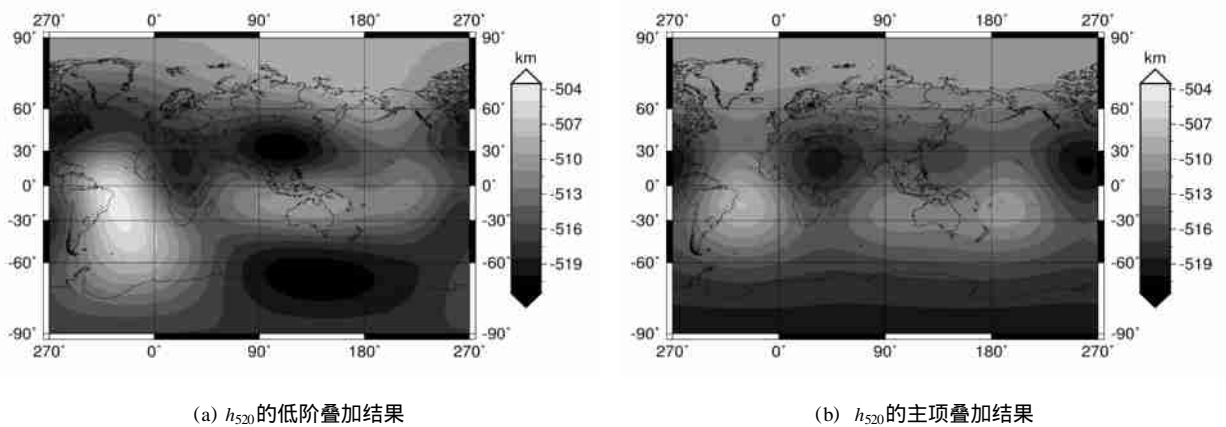


图 6 全球‘520’ 间断面地形的球谐分析

### 3.5 ‘660’ 间断面地形

图 7(a) 和 7(b) 分别显示了全球‘660’ 间断面深度  $h_{660}$  的低阶叠加和主项叠加结果. 其中图 7(b) 与图 5(b) 有些相似, 由表 3 和表 4 可知仅仅呈现出南北差异为 0.6 %、东西为 0.4 % 幅度非常弱的地形起伏. 同‘520’ 间断面起伏情况相似, ‘660’ 已经没有出现半球尺度的地形起伏, 代之的是显现出的小尺度的地形起伏 (图 7(a)).

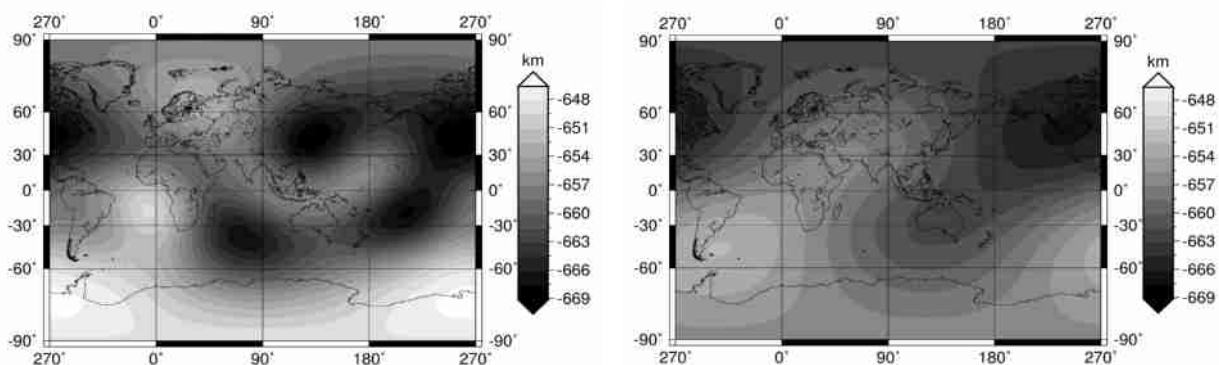
(a)  $h_{660}$  的低阶叠加结果(b)  $h_{660}$  的主项叠加结果

图 7 全球‘660’间断面地形的球谐分析

## 4 讨论与结论

(1) 全球地表地形北半球上凸南半球下凹、东半球下凹西半球上凸,定量地证实了前人所指出的地质地貌南北东西半球尺度不对称性的强烈印象是正确的。

(2) 图 4 显示的全球 Moho 面的地形半球尺度起伏与地表的正好相反,与均衡理论相吻合。从 Moho 面开始的北凹南凸地形在‘410’地形上也有明显显示,而东西半球的差异却大体是东凹西凸,与 Moho 面的相反。但是,‘520’和‘660’的处理结果表现出了尺度略小的更为复杂的地形起伏。‘520’总体显示了从北到南的凸—凹—凸—凹这种大约宽为 45° 的条带分布。‘660’的主项分析结果虽与‘410’的有些相似,但基本上已不再有南北东西半球尺度的差异性,代之的是尺度较小的起伏。总体看来,半球尺度的地形起伏的差异性随着深度增加而变得不明显。原因可能与间断面的性质以及板块运动有关系。Moho 面是化学间断面,而且埋藏深度较浅,受构造运动变形的影响比较大;而上地幔间断面是相变间断面,地形起伏主要受温度横向不均匀性影响,板块俯冲也导致在局部范围出现了一些较为剧烈的起伏,但总体上并不具有半球尺度的明显差异性。

(3) 低阶叠加和主项叠加对各物理量都有基本相同的特征显示,原因是由图 1、图 2、表 1 和表 2 已指明主能量都集中在低阶项。‘520’和‘660’间断面的地形起伏的低阶叠加结果比主项叠加结果显示出了更多的细节信息。

Becker 博士(美国 Southern California 大学)提供了球谐分析计算程序,Freeden 教授(德国 Kaiserslautern 大学)赠送了他的专著《Multiscale Modelling of Spaceborne Geodata》,马延路提出了有益建议。这些都对完成本研究起了重要作用。谨此一并致谢!

## References

- [ 1 ] Ma Z , Song XD , Du PR , *et al.* Asymmetry between the southern and northern hemispheres of the earth. *Chinese J. Geophys* ,2002 ,45(1) :26 ~ 32 (in Chinese with English abstract)
- [ 2 ] Wang Y , Wang J Y , Ma Z , *et al.* Asymmetry of the earth interior thermal loss distribution. *Chinese Science Bulletin* ,1998 ,43(11) :1191 ~ 1194 (in Chinese)
- [ 3 ] Huang LR , Ma Z , Zhu JX. The newest observational evidence on asymmetrical deformation of the earth. *Acta Seismologica Sinica* ,2002 ,24(2) : 196 ~ 199 (in Chinese with English abstract)
- [ 4 ] <http://mahi.ucsd.edu/Gabi/rem.dir/crust/crust2.html>
- [ 5 ] <ftp://mahi.ucsd.edu/pub/TOPOTZ/>
- [ 6 ] Blais JAR , Provins DA. Spherical harmonic analysis and synthesis for global multiresolution applications. *Journal of Geodes.* ,2002 ,76 :29 ~ 35
- [ 7 ] Dahlen FA , Tromp J. *Theoretical Global Seismology*. New Jersey : Princeton Univ. Press ,1998. 838 ~ 876

## 附中文参考文献

- [ 1 ] 马宗晋,宋晓东,杜品仁,等. 地球南北半球的非对称性. 地球物理学报,2002,45(1):26~32
- [ 2 ] 汪洋,汪集旻,马宗晋,等. 地球内部热散失量分布的非对称性. 科学通报,1998,43(11):1191~1194
- [ 3 ] 黄立人,马宗晋,朱建新. 地球非对称变形的最新观测证据. 地震学报,2002,24(2):196~199

## The Low Degree Spherical Harmonic Analysis on the Large Scale Topographies of the Moho and the Upper Mantle Discontinuities

HE Xiao-Bo ZHOU Hui-Lan

(Laboratory of Computational Geodynamics, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In this paper, the global topography, the depth of the Moho (the crustal model CRUST2.0), the depths of upper mantle discontinuities were analyzed using the spherical harmonics. Based on these data, the spatial large scale distribution information has been obtained by stacking the first 4 degree modes, and the main energy distributions have been understood by synthesizing the four items with the maximal squares of amplitudes. The results show that there exists a large scale asymmetry on the scale of semi-sphere in the topographies of the Moho and the '410' discontinuities, and the asymmetry character of the north-south semi-spheres is more obvious than that of the west-east semi-spheres; However, there exists a scale asymmetry on the small side in the topographies of '520' and '660' discontinuities, instead of such a large semi-sphere scale asymmetry.

**Key words** spherical harmonic analysis, Moho, upper mantle discontinuities, asymmetry