

林森, 朱建军, 田玉森等. 大地水准面异常在湖南地区的地球物理解释. 地球物理学报, 2012, 55(2):472-483, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.011

Lin M, Zhu J J, Tian Y M, et al. On the use of the geoid anomalies for geophysical interpretation over the area of Hunan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2):472-483, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.011

# 大地水准面异常在湖南地区的地球物理解释

林 森<sup>1,2</sup>, 朱建军<sup>1,2</sup>, 田玉森<sup>1,2</sup>, 陶肖静<sup>1,2</sup>

1 中南大学测绘与国土信息工程系, 长沙 410083

2 湖南省普通高等学校精密工程测量与形变灾害监测重点实验室, 长沙 410083

**摘 要** 以湖南地区为例, 利用超高阶地球重力位模型 EGM2008 计算了研究区的重力大地水准面, 并采用棱柱体公式和球体公式相结合的方法分别进行了完全地形改正和 Airy-Heiskanen 局部均衡改正, 得到布格大地水准面和均衡大地水准面. 对三种大地水准面进行不同波长分量的分离处理, 得到包含不同深度异常信息的剩余大地水准面, 并结合其他地球物理资料对研究区进行了详细的地球物理解释. 结果表明, 剩余重力大地水准面可以有效地反映出研究区内的深部构造特征, 如深大断裂带分布、构造块体位置、上地幔密度横向分布等, 但对地壳内异常结构反映不明显; 研究区岩石圈密度变化相对平缓, 厚度由东向西增加; 根据剩余均衡大地水准面及研究区 Airy 局部均衡莫霍面, 可以大致推测出研究区的莫霍面起伏形态以及均衡状态, 可作为一种有用的参考信息.

**关键词** EGM2008 地球重力位模型, 大地水准面异常, 地球物理解释, 地壳均衡状态, 莫霍面起伏

doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.011

中图分类号 P223

收稿日期 2011-01-10, 2011-10-25 收修定稿

## On the use of the geoid anomalies for geophysical interpretation over the area of Hunan

LIN Miao<sup>1,2</sup>, ZHU Jian-Jun<sup>1,2</sup>, TIAN Yu-Miao<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-Jing<sup>1,2</sup>

1 Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Key Laboratory of Precise Engineering Surveying and Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

**Abstract** In this paper, we investigated the applications of geoid anomalies in geophysical interpretation. The ultra-high geopotential model EGM2008 is used to compute the gravimetric geoid, and the corresponding Bouguer and isostatic geoids are obtained from complete topographic and Airy-Heiskanen local isostatic corrections with a synthetic method combining the prism and tesseroid approaches. Then the geoids are divided into several residuals which represent anomalous features in different depths, by removing different wavelength components. Finally, a case study over the Hunan area based on these data sets and other geophysical data is presented. The results show that the residual gravimetric geoids can reveal some anomalous structures in deep earth effectively, such as the distributions of deep rifts, the locations of tectonic blocks and the lateral density distribution in the upper mantle etc.. However, the anomalous features in the crust are not evident in these residuals. The variation of density anomalies in the lithosphere is much smoother than that in the shallower depth, while the thickness of the lithosphere deepens from east to west. The Moho undulations, and the isostatic state of the research area which can be regarded as complementary information, are inferred roughly from the analysis of both the

residual isostatic geoids and Airy local isostatic Moho depths. The results showed above give us a new way to overcome the absence and sparseness of gravity data in remote areas for geophysical interpretation.

**Keywords** EGM2008 geopotential model, Geoid anomalies, Geophysical interpretation, Crust isostatic state, Moho undulations

## 1 引言

在大地测量中,大地水准面定义为一个与全球无潮平均海平面密合的封闭重力等位面,用来确定地球形状,其异常形态同时也是地球内部物质分布和运动的一种体现。Vanicek 等<sup>[1]</sup>曾经编著了一部专著详细地讨论了大地水准面异常与地球深部质量异常结构、应力场、构造力、海洋岩石圈均衡状态、地球旋转、地球物理勘探以及洋流的关系,为大地水准面在地球物理中的应用提供了理论基础。

由牛顿引力公式以及 Bruns 公式<sup>[2]</sup>可知,大地水准面和扰动位一样,与场源深度呈反比关系,大尺度的深部异常信息在大地水准面频谱中占有主导地位,2~6 阶地球重力位模型得到的大地水准面信息约占整个大地水准面的 80%<sup>[3]</sup>。目前主要用于以下几方面的研究:①岩石圈密度结构与均衡状态<sup>[4-7]</sup>;②地壳内密度不均匀分布对大地水准面的影响<sup>[8-9]</sup>;③大地水准面与构造动力、海底地形的关系<sup>[10-12]</sup>;④不同波长大地水准面异常与地球内部异常结构的关系<sup>[13-14]</sup>。重力异常作为扰动位的一阶径向导数,其特征与大地水准面存在一定的差异,异常值与场源深度的平方成反比,随着场源深度的增加,异常值迅速衰减。因此重力异常对地球浅部异常信息非常敏感,去除地形影响后的布格重力异常被广泛地应用于地壳内部密度结构或密度界面分布的研究中<sup>[15-21]</sup>。

高精度局部大地水准面和布格重力异常均由地面重力数据计算得到,它们所包含的地球内部异常信息的可靠性以及精细程度与地面重力数据的精度和分辨率密切相关。但在实际情况中,地面重力数据分布往往很不均匀且精度不一,再加上这些数据的保密性,给一些研究造成了不便。近几年来,重力卫星(CHAMP, GRACE, GOCE)得到的卫星重力数据极大地提高了地球重力场长波分量的精度,其全球性的覆盖范围、稳定的分辨率、数据的连续性和开放性等特点在一定程度上弥补了地面重力数据存在的问题,给地球重力场的研究带来了巨大的影响。基于卫星重力数据,融合卫星测高、船测、航测以及地

面重力数据,可以构建出以反映中低频地球重力场信息为主的高阶甚至超高阶地球重力位模型。这些模型在地球物理中的应用也越来越广泛<sup>[22-28]</sup>。鉴于目前利用地球重力位模型的研究主要以相应的重力异常为主,本文从大地水准面的角度出发,以湖南地区为例,基于超高阶地球重力位模型 EGM2008<sup>[29]</sup>,计算了研究区不同类型的大地水准面,并结合相关的地球物理资料详细地分析了该地区的内部构造。

## 2 大地水准面的计算

### 2.1 重力大地水准面

本文所选的研究范围为 24.5°N~30.5°N、108.5°E~114.5°E,包括了整个湖南地区及其周边部分省区。图 1 为研究区地形图,整体以山地丘陵为主,只有东北部为平原地区,最大高程约 2256 m,最小高程约 17 m,平均高程约 428 m。用于计算重力大地水准面

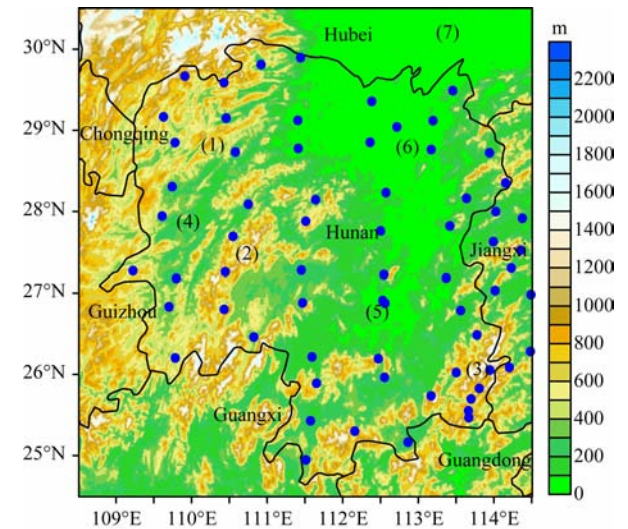


图 1 研究区地形图与 GPS 水准分布(蓝色圆点)  
(1)武陵山地区;(2)雪峰山地区;(3)诸广山地区;(4)麻阳盆地;  
(5)衡阳盆地;(6)洞庭湖盆地;(7)江汉平原。

Fig. 1 The topography of the study area and the distribution of GPS/Leveling data (Blue dots)  
(1) Wuling Mountain Area; (2) Xuefeng Mountain Area;  
(3) Zhuguang Mountain Area; (4) Mayang Basin; (5) Hengyang Basin; (6) Dongting Lake Basin; (7) Jiangnan Plain.

的 EGM2008 模型最高阶次分别为 2190 和 2159, 所对应的分辨率约为  $5' \times 5'$ , 但在本文中, 我们计算的大地水准面为  $1' \times 1'$  的格网数据, 虽然超过了该模型所能达到的最高分辨率, 但并不影响本文的研究结果. 研究区重力大地水准面如图 2a 所示, 与区内 67 个高精度 GPS 水准数据进行比较, 该重力大地水准面在本研究区的精度优于章传银等<sup>[30]</sup> 给出的结果.

## 2.2 重力大地水准面的改正

与空间重力异常类似, 重力大地水准面是外部地形与内部异常的综合反映, 为突出不同性质的异常信息, 我们分别对该重力大地水准面进行完全地形改正和 Airy-Heiskanen 局部均衡改正 (以下简称 Airy 均衡改正), 得到布格大地水准面与均衡大地水准面<sup>[11]</sup>, 其性质与对应的重力异常类似. 两种改正均采用  $30'' \times 30''$  GTOPO30 DEM 数据, 可由棱柱体公式或者球体近似公式计算得到<sup>[31-34]</sup>. 其中, 棱柱体公式计算精度较高, 但耗时较大; 球体近似公式计算精度稍差, 耗时较少, 计算范围较大时考虑了曲率影响. 两种方法的详细比较可参阅文献<sup>[34]</sup>. 结合计算点周围的质量对计算点的影响较大, 远距离的质量对计算点的影响较小以及计算速度等因素, 在本文计算中, 以  $1^\circ 30'$  (约 166.7 km) 为界把每个计算点的两种改正划分成近区和远区两部分. 近区影响由棱柱体公式求得, 单个棱柱体对大地水准面的影响如(1)式所示<sup>[31-34]</sup>:

$$\begin{aligned} \delta N(x, y, z) = & \frac{G\rho}{\gamma} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \\ & \times \left[ (x-x_i)(y-y_j) \ln \left( \frac{z-z_k + \omega_{ijk}}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2}} \right) \right. \\ & + (y-y_j)(z-z_k) \ln \left( \frac{x-x_i + \omega_{ijk}}{\sqrt{(y-y_j)^2 + (z-z_k)^2}} \right) \\ & + (z-z_k)(x-x_i) \ln \left( \frac{y-y_j + \omega_{ijk}}{\sqrt{(z-z_k)^2 + (x-x_i)^2}} \right) \\ & - \frac{(x-x_i)^2}{2} \arctan \frac{(y-y_j)(z-z_k)}{(x-x_i)\omega_{ijk}} \\ & - \frac{(y-y_j)^2}{2} \arctan \frac{(x-x_i)(z-z_k)}{(y-y_j)\omega_{ijk}} \\ & \left. - \frac{(z-z_k)^2}{2} \arctan \frac{(x-x_i)(y-y_j)}{(z-z_k)\omega_{ijk}} \right], \quad (1) \end{aligned}$$

式中  $\omega_{ijk} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_k)^2}$ ;  $\gamma$  表示平均正常重力值, 取  $9.798 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . 远区影响由一阶近似球体公式求得, 球体单元对大地水准面的影响如(2)式所示<sup>[33-34]</sup>:

$$\delta N(r, \varphi, \lambda) = \frac{G\rho}{\gamma} \Delta r \Delta \varphi \Delta \lambda \frac{r_0^2 \cos \varphi_0}{l_0}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \Delta r = r_2 - r_1, \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \\ r_0 = (r_2 + r_1)/2, \varphi_0 = (\varphi_2 + \varphi_1)/2, \\ \lambda_0 = (\lambda_2 + \lambda_1)/2, \\ l_0 = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \psi_0}, \\ \cos \psi_0 = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda_0 - \lambda), \end{cases}$$

( $r, \varphi, \lambda$ ) 分别表示计算点的地心向径、地心纬度和经度. 这种划分是否最合理, 并不在本文的讨论范围内. 利用上述方法计算得到的布格大地水准面和均衡大地水准面分别如图 2c 和图 2e 所示.

## 3 大地水准面的形态特征

从图 2a 可以看出, 研究区大地水准面整体处于参考椭球之下, 没有完整的圈闭形态, 以东北走向为主, 呈西低东高的变化趋势. 起伏最大相差约 28 m, 在湖南境内约 20 m. 与研究区地形(图 1)比较可知, 在地形起伏较大区域, 如研究区西北部和东南部以及湖南境内的武陵山、雪峰山地区, 大地水准面等值线比较密集; 在地形起伏较小区域, 如湖南境内的洞庭湖盆地和衡阳盆地, 大地水准面变化相对平缓. 值得注意的是, 研究区西北部的高地形区对应于大地水准面的凹陷区, 而湖南东南部的高地形区则与大地水准面的隆起区对应, 表明两个地区的深部构造可能存在较大的差异. 在研究区西部, 大地水准面形态剧烈变化, 呈现近南北走向的大型梯级带, 与我国  $1^\circ \times 1^\circ$  平均布格重力异常图<sup>[35]</sup> 中纵贯全国的大兴安岭—太行山—武陵山巨型重力梯级带的一段相当吻合. 因此, 我们认为引起这种吻合现象的原因可能是一致的, 比如说地下大型断裂带的存在. 为进行更深入的分析, 我们利用如下离散平面近似公式计算了该大地水准面的水平梯度, 如图 2b 所示.

$$\begin{aligned} \text{Grd}[N(x, y)] &= \sqrt{N_x^2(x, y) + N_y^2(x, y)}, \\ N_x(x, y) &= \frac{N(x, y) - N(x + \Delta x, y)}{\Delta x}, \\ N_y(x, y) &= \frac{N(x, y) - N(x, y + \Delta y)}{\Delta y}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中,  $\Delta x, \Delta y$  分别为经度和纬度方向上的格网间隔. 从图 2b 中不难发现, 全区梯度值在  $0.05 \sim 0.1 \text{ m/km}$  范围内的形态与地形存在很强的相关性, 这表明地形对该大地水准面具有不可忽略的影响, 而这些影响可能会对一些有用的内部异常信息产生干扰.



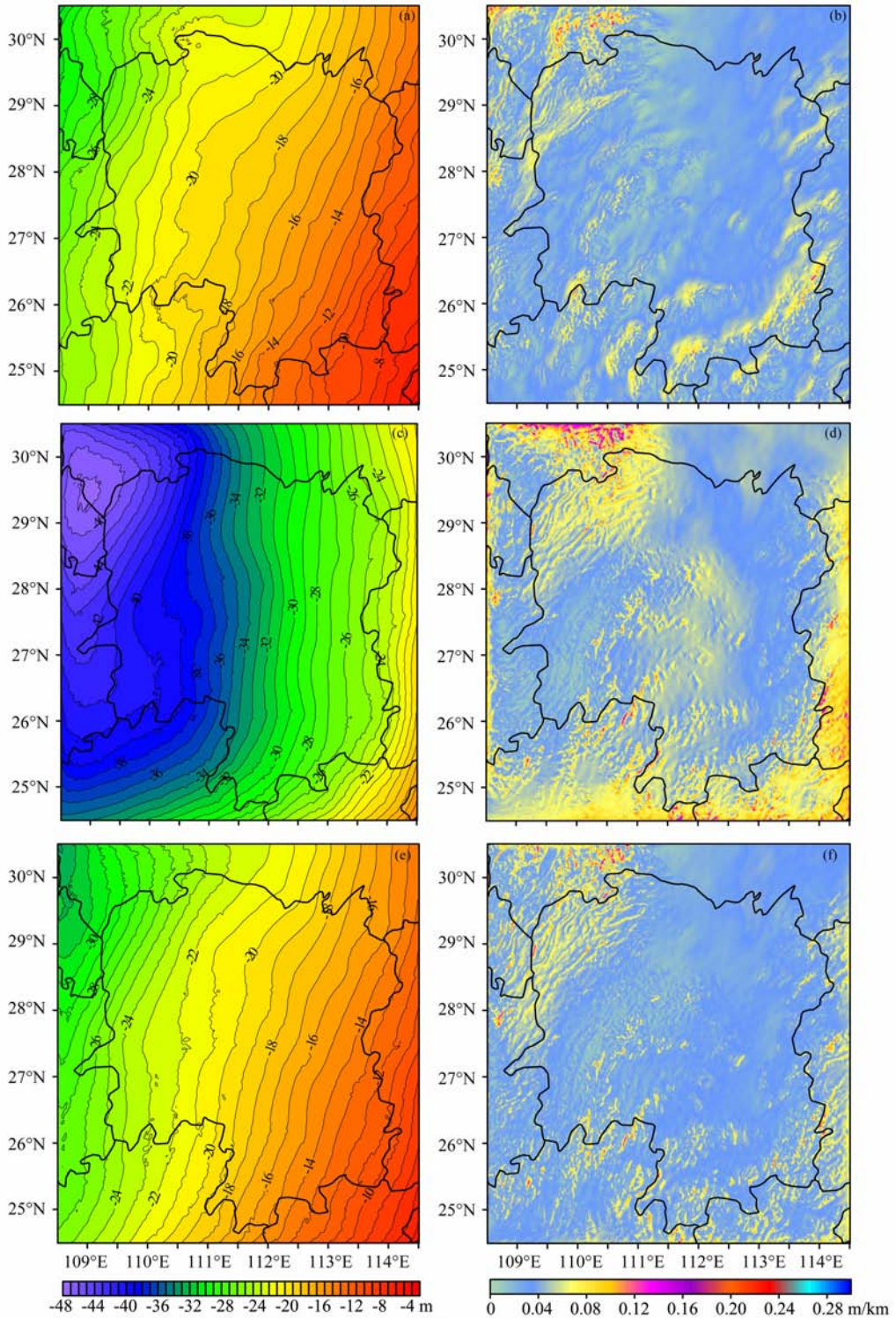


图 2 大地水准面及其水平梯度图(等值线间隔: 1m)

(a)重力大地水准面;(b)重力大地水准面水平梯度;(c)布格大地水准面;(d)布格大地水准面水平梯度;

Fig. 2 The geoid undulations and their horizontal gradients (Isoline interval: 1m)

(a) Gravimetric geoid (GG); (b)The horizontal gradients of GG; (c) Bouguer geoid (BG);

(d) The horizontal gradients of BG; (e) Isostatic geoid (IG); (f)The horizontal gradients of IG.

图 2c 为布格大地水准面,相比于图 2a,该大地水准面的幅值下降很多,最大降幅约 16 m,更加突

出了整个研究区深部的密度异常分布对每一点大地水准面的贡献<sup>[11]</sup>. 图中大地水准面形态平缓有序,

反映出研究区深部构造相对简单,大约以  $111.5^{\circ}\text{E}$  为界,其东部大地水准面呈南北走向并由西往东抬升,其西部大地水准面则相对复杂,整体由东往西下降,其中西北部以较大梯度向西凹陷,西南部则缓慢向西北下降,两者最终汇聚形成一个近三角形的凹陷区,为全区最低,表明该区域深部可能存在一个巨大的低密度体或大范围密度界面.同时,这个凹陷可以较好地解释图 2a 中研究区西北部和湖南东南部高地形区对应不同大地水准面形态的现象.图 2d 为该大地水准面的水平梯度图,相比于图 2b,一个明显的特征就是与地形的相关性有明显的下降,表明地形的影响得到了很好的消除,在湖南西北部武陵山地区可以发现大量呈北东走向幅值为  $0.08 \sim 0.12 \text{ m/km}$  的梯度带.值得注意的是,研究区东部、北部和南部的一系列强梯度带,是计算过程中边界影响引起的,并非有用信息.

图 2e 为均衡大地水准面,其整体形态、幅值大小均与重力大地水准面接近,但变化更加均匀、平缓,主要突出了地幔部分密度异常分布及动力状态对每一点大地水准面的贡献<sup>[11]</sup>,从该图中很难得到更多的有用信息.图 2f 为该大地水准面相应的水平梯度分布,与地形弱相关.比较三幅水平梯度图,发现在湖南西北部武陵山地区均存在着一系列近北东向的梯度带.假如图 2b 中的梯度带我们认为可能与地形有关,那么在图 2d 和 2f 中相同位置,相同走向的梯度带的存在,我们可以推断在该地区可能存在一条近北东走向的深大断裂带,结合已有的地球物理探测结果,这些梯度带应该是该地区鄂湘黔深断裂带的反映<sup>[35]</sup>.

## 4 大地水准面异常对内部异常结构的解释

大地水准面异常是不同深度异常场源的共同作用结果,由于长波占优的性质,浅部异常场源产生的中短波信息往往被长波信息所掩盖,这一现象在第 3 节对三种大地水准面形态特征进行分析的时候就比较明显.因此,本文将基于如下公式<sup>[3,36]</sup>:

$$Z_n = \frac{R}{n-1}, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{2\pi R}{n}, \quad (5)$$

式中  $R$  为地球平均半径,取  $6371.2 \text{ km}$ .得到重力位

的对应关系;然后利用 EGM2008 模型通过式(6)<sup>[2]</sup>计算出不同阶窗的截断大地水准面  $N_n$ ;最后从大地水准面  $N$  中减去  $N_n$ ,得到包含不同深度异常信息的剩余大地水准面  $\delta N_{n+1}$ ,即  $\delta N_{n+1} = N - N_n$ ,且  $2 < n \leq n_{\max}$ ,并对它们的异常形态进行详细的物理解释.

$$N_n = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \times \bar{P}_{nm}(\sin\varphi). \quad (6)$$

### 4.1 剩余重力大地水准面的综合解释

图 3a 所示的是  $n=20$  的剩余重力大地水准面,所对应的波长  $\lambda \leq 2000 \text{ km}$ ,异常场源深度  $Z_{20} \leq 335 \text{ km}$ .对比图 2a,异常幅值范围从  $-4 \sim -32 \text{ m}$  大幅度减小至  $-3.5 \sim -2.9 \text{ m}$ ,表明深部异常信息在本研究区的重力大地水准面中占有绝对主导地位;图中原先近北东向的长波分量已经完全消失,出现了多个大型圈闭结构,其中以湘西隆起区最为明显.比较已有的地质地球物理研究结果<sup>[35]</sup>,我们发现该隆起区范围与湖南境内武陵—雪峰联合地体这一二级构造单元比较吻合.该隆起区东北面,可以比较明显地分辨出一条北起石门,北西进入湖北,南经衡阳至安仁的大型近北西向梯级带,这一梯级带可以解释为是常德—安仁转换构造带在该剩余大地水准面中的反映;该隆起区东南面存在着一一条北起桃江,经锡矿山、隆回到城步的近北东向梯级带,这与桃江—城步壳下岩石圈碰撞断裂带比较吻合,由于该断裂带被认为是扬子微板块与华南微板块的碰撞缝合带,因此梯级带西密东疏的特征也间接反映了上地幔由东向西俯冲,地壳部分向西仰冲叠复的构造运动<sup>[35]</sup>;隆起区西北面近北东向的梯级带可以认为是鄂湘黔深断裂带的反映,但与该断裂带的实际走向略有不同,我们推测这可能受地形干扰所致,该断裂带东侧软流圈抬升,西侧软流圈下降<sup>[35]</sup>,在图中表现为梯级带以东大地水准面隆起,以西迅速凹陷.在研究区北部湖北境内存在一个巨大的倒三角凹陷区,可能是幔内低密度体的反映.对比该图与研究区地形(图 1),区内隆起区的异常形态与地形具有较高的正相关性.

图 3b( $n=70$ )所对应的大地水准面波长  $\lambda \leq 570 \text{ km}$ ,异常场源深度  $Z_{70} \leq 92 \text{ km}$ ,这个深度已经基本处于岩石圈以内.图中湘西隆起区与湘南、湘东南隆起区以及研究区北部凹陷区仍然明显,但规模均有所减小;常德—安仁转换构造带与桃江—城步壳下岩石圈碰撞断裂带在图中的特征已经不明显,



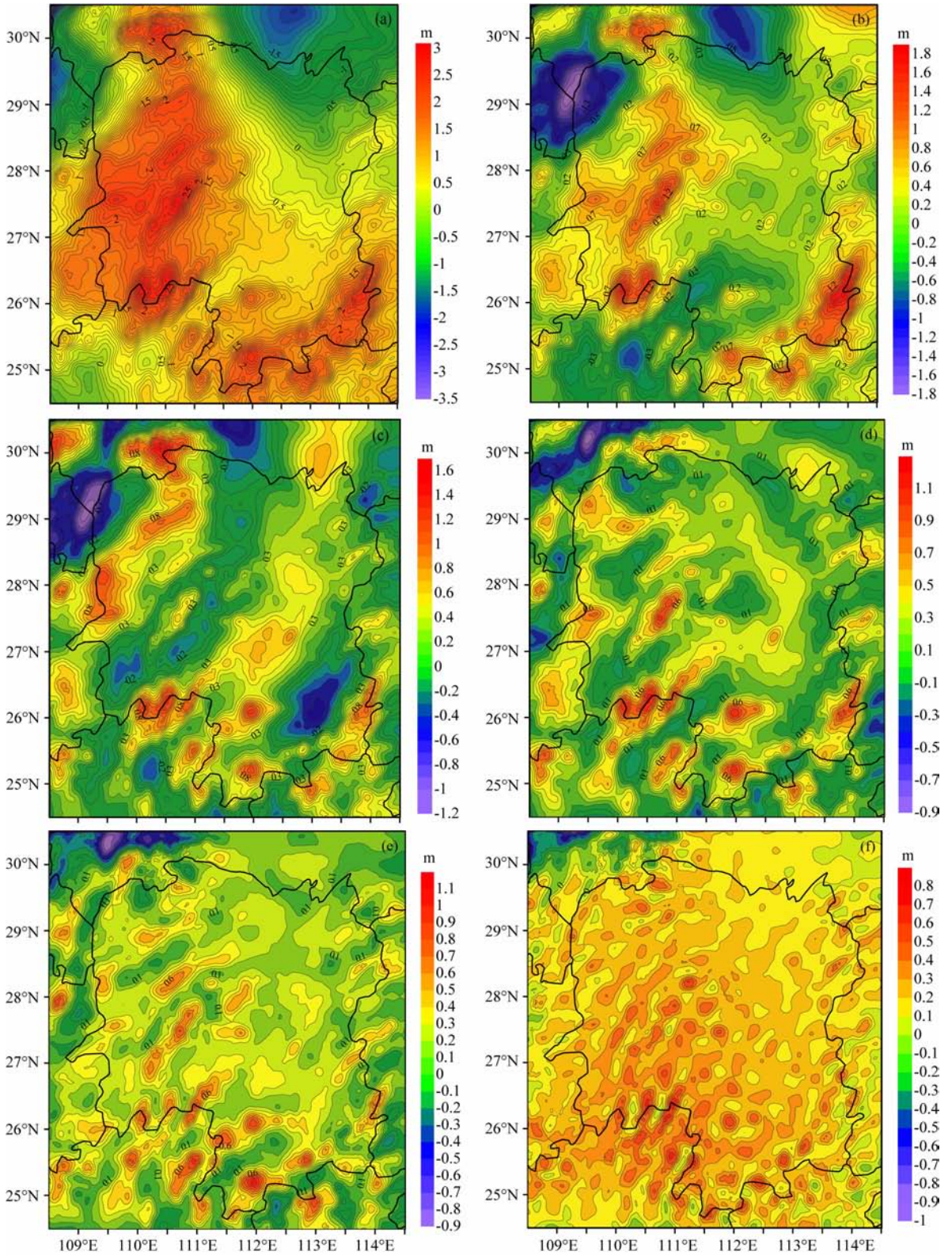


图 3 剩余重力大地水准面 (等值线间隔: 0.1 m)

(a)  $n=20$ ; (b)  $n=70$ ; (c)  $n=150$ ; (d)  $n=250$ ; (e)  $n=360$ ; (f)  $n=720$ .

Fig. 3 Residual gravimetric geoid undulations (Isoline interval: 0.1 m)

表明这两条岩石圈断裂带可能存在于 92~335 km 这一深度范围内;鄂湘黔深断裂带特征依旧明显,该断裂带以西巨大的近圆形凹陷区与图 2c 中的凹陷区

比较吻合;湘中、湘中南地区剩余大地水准面形态相对平缓,无明显异常特征.图 3a 和 3b 主要反映了幔内异常信息,比较两图并结合已有的地球物理研究

结果<sup>[35]</sup>,发现湖南境内隆起区对应高速、高阻刚性地幔体(如湘西、湘东及湘东南地区),而凹陷区则对应低速、低阻塑性地幔体(如湘北、湘中及湘中南部地区)。

图 3c( $n=150$ )所对应的大地水准面波长  $\lambda \leq 266$  km,异常场源深度  $Z_{150} \leq 43$  km,主要反映上地幔与下地壳之间的异常信息,剩余大地水准面异常变化较前两图复杂,同时随着异常场源深度的变浅,地形的干扰也越来越严重,如湘西北麻阳—沅陵一带、湘西南城步—新宁一带以及湘东南茶陵—临武一带的大地水准面隆起与地形均具有很强的相关性。图中湘西北近北东走向反映鄂湘黔深断裂带的梯级带仍然存在,意味着该断裂带切穿地壳深达岩石圈底部,梯级带以西的圆形凹陷区可能是地壳急剧增厚引起的质量亏损。湖北境内原先巨大的凹陷区大大缩小,与南部的常德、益阳及邵阳地区形成近北东向的凹陷带,表明在这一区域的上地幔可能存在低密度物质。江汉平原地区出现了一个规模较大的隆起区,与湘潭、衡阳隆起区联成一体,由莫霍面隆起所致,表明这些地区的地壳厚度较薄。在湘东南地区,出现了一个北东向凹陷区,可能是莫霍面下降与低密度物质存在的综合反映,其东南和西北面的两条北东向梯级带,可以分别解释为茶陵—临武逆冲断裂带与江永—常宁深断裂带在剩余大地水准面中的反映<sup>[35,37]</sup>。

图 3d( $n=250$ )所对应的大地水准面波长  $\lambda \leq 160$  km,异常场源深度  $Z_{250} \leq 25$  km,该深度大致处于下地壳上部。相比之前的几张剩余大地水准面图,本图中有几个明显的变化,如湖南北部及湖北境内的凹陷区、湘西北近北东向梯级带及其西侧的圆形凹陷区都已消失,表明这些异常体大约分布在深度 25 km 以下。研究区西北部出现一条北东向凹陷带,最小幅值约  $-0.9$  m,为全区最低点。该凹陷带在后面的图 3e 和图 3f 中均有出现,意味着在该地区地壳内可能存在着大范围的低密度异常体。在湖南境内出现多个相对凹陷和隆起区,其中麻阳盆地以北东向相对凹陷为主,洞庭湖盆地和衡阳盆地联成一片,以弧形相对隆起的形式出现,反映了下地壳内三个盆地的不同物质构造。湘西南洞口—城步一带的凹陷区、湘北华容—湘阴一带的北西向凹陷区与布格重力异常中的相对重力低比较吻合,表明这两个地区下地壳内均存在低密度体<sup>[35]</sup>。

图 3e( $n=360$ )所对应的大地水准面波长  $\lambda \leq 111$  km,异常场源深度  $Z_{360} \leq 18$  km,该深度大致处

于中地壳内。图中除研究区西北角凹陷带与洞庭湖、衡阳盆地相对隆起区特征比较明显外,并无其他明显的异常特征,区内以较小幅值的相对凹陷与隆起相互错开分布为主。与研究区地形(图 1)进行比较,我们发现图中绝大多数的隆起区与地形高呈强相关,因此可以肯定,这些隆起并非是地壳内高密度物质或密度界面起伏所产生的异常特征,而是地形的影响。这些影响在本研究中可以认为是一种“噪声”,掩盖了真实的壳内异常信息。这一现象在图 3f( $n=720$ )中表现得更加明显,图中除西北角很小的凹陷带外,全区基本上以正的异常值展现出来,很难分辨出任何有用的异常特征,可以认为整个剩余大地水准面被地形产生的“噪声”占据。因此,我们认为在本研究区,大地水准面并不能很好地反映出中地壳及更浅层的异常结构。需要补充的是,高阶分量剩余重力大地水准面与地形的强相关性对于陆地内部异常信息的提取是一种干扰,但为海洋海底地形的提取提供了有用的信息<sup>[12]</sup>。

#### 4.2 剩余布格大地水准面与岩石圈结构

布格大地水准面主要反映了岩石圈及更深部的异常信息。Ebbing J 等<sup>[17]</sup>就曾以这种大地水准面作为岩石圈异常信息的反映,结合相应的布格重力异常和深部地震探测数据,详细地研究了东阿尔卑斯地区的地壳结构。本文认为研究区布格大地水准面中岩石圈以下深度的异常信息占了较大的比例,为更加突出岩石圈异常信息,在布格大地水准面中移去前 20 阶长波分量,得到的剩余布格大地水准面如图 4 所示。图中剩余大地水准面异常形态较之前的布格大地水准面(图 2c)要复杂,幅值大幅减小,以  $111^{\circ}\text{E} \sim 113^{\circ}\text{E}$  之间一条北北西向梯级带为界,划分成两个不同的异常区域。该梯级带以东,大地水准面以北西走向为主,自南西向北东缓慢抬升,进入湖北境内达到研究区最高值,我们推测在该区域岩石圈密度相对较高,同时软流圈呈抬升趋势。梯级带以西地区,异常形态相对复杂,总体表现为自北东向南西凹陷,梯度相对较大,表明这一区域密度相对较小,但变化剧烈。在研究区西北部及湖南西南部分别存在着两个凹陷区,处于两个凹陷区之间的凤凰—麻阳地区表现为相对隆起。已有的深部地球物理探测资料表明<sup>[35]</sup>,凤凰—麻阳地区软流圈上隆,顶深 140 km,这一现象与图中该地区大地水准面相对隆起比较一致,因此我们推测两个凹陷区可能是软流圈下降的反映。据此,我们大致认为在湖南境内,岩石圈厚度东薄西厚,呈向西俯冲趋势,起伏变化较大。至于岩



石圈最厚区与最薄区的位置,仅仅从该剩余大地水准面中我们很难确定,只能推测最薄区可能位于湘东北剩余大地水准面抬升区域,而最厚区则可能位于湘中、湘西南或者湘西北剩余大地水准面凹陷或突变区.同时,对比研究区地形(图 1)我们发现该剩余大地水准面异常形态与地形存在着一定的反对应关系,即地形高对应于大地水准面相对凹陷,地形低对应大地水准面相对隆起,这可能与岩石圈内均衡补偿作用有关.此外,图中湖南西北部北东向梯级带与鄂湘黔深断裂带对应,而纵跨整个研究区的北北西向梯级带则与常德—安仁转换构造带对应,再次证明了这两条断裂带都是岩石圈深断裂带.

### 4.3 剩余均衡大地水准面与 Airy 均衡分析

前面我们已经发现,从全波段的均衡大地水准面中很难得到有用的异常信息,这可能是由于研究区大地水准面受深部异常影响较大,也可能与所选研究区范围大小有关.因此,接下来我们将对该大地水准面进行适当的分离处理,并利用得到的剩余均衡大地水准面对研究区地壳均衡状态及莫霍面起伏形态进行讨论.

图 5a 由公式(1)和(2)计算得到,所选参数如下:地壳平均密度  $2.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;下地壳与上地幔密度差  $-0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;均衡补偿深度  $30 \text{ km}$ .图中大地水准面异常变化平缓,总体形态与地形呈明显的反对应关系,并大致与布格大地水准面(图 2c)、20 阶剩余布格大地水准面(图 4)接近,其幅值分别约占两者的 50%与 90%,表明均衡补偿作用在岩石

圈内有很大的影响.图中研究区西北部 and 湘西南地区分别存在两个明显的低值凹陷区,相对图 2c 内低值凹陷区向东偏移,这种偏移现象在移去深部异常影响后的图 4 中则不存在,两者除麻阳盆地外,大地水准面形态非常接近.从图 4 中扣除图 5a,得到 20 阶剩余均衡大地水准面,如图 6a 所示,主要反映的是岩石圈密度异常分布以及因不符合 Airy 局部均衡假设而产生的均衡异常信息.图中最大的一个特征就是在湘西北地区存在着一个非常明显的呈北东向的大型相对隆起区,对比前面 20 阶剩余重力大地

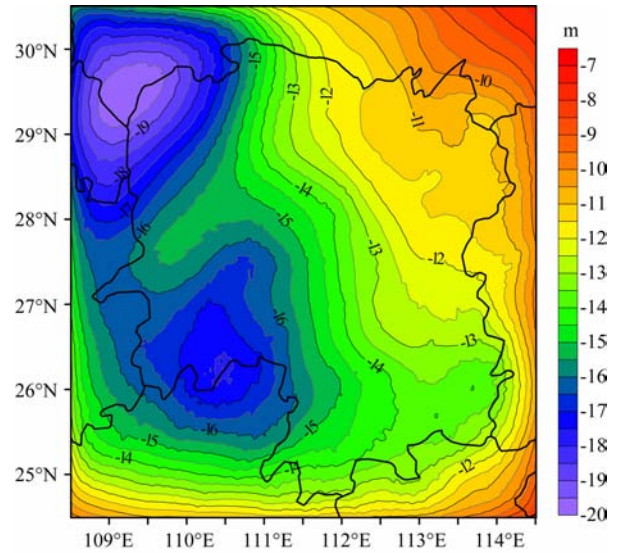


图 4 20 阶剩余布格大地水准面 (等值线间隔: 0.5 m)  
Fig. 4 Residual Bouguer geoid undulations (n=20, isoline interval: 0.5 m)

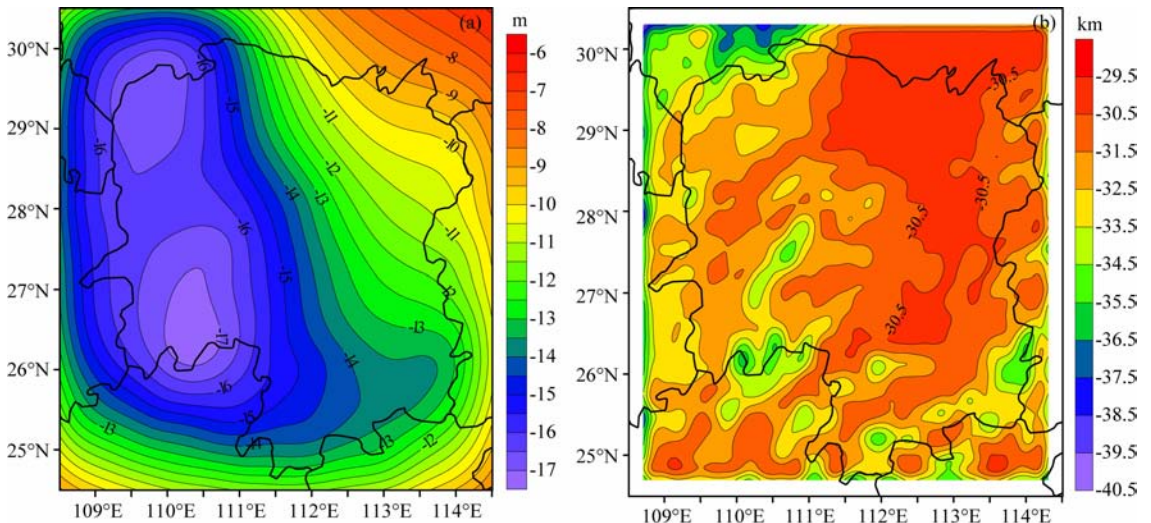


图 5 Airy 局部均衡改正与 Airy 局部均衡莫霍面 (a 等值线间隔: 0.5 m; b 等值线间隔: 1 km)

Fig. 5 The Airy local isostatic correction in terms of geoid undulations and the Airy local isostatic Moho undulations (Isoline interval of a: 0.5 m; isoline interval of b: 1 km)



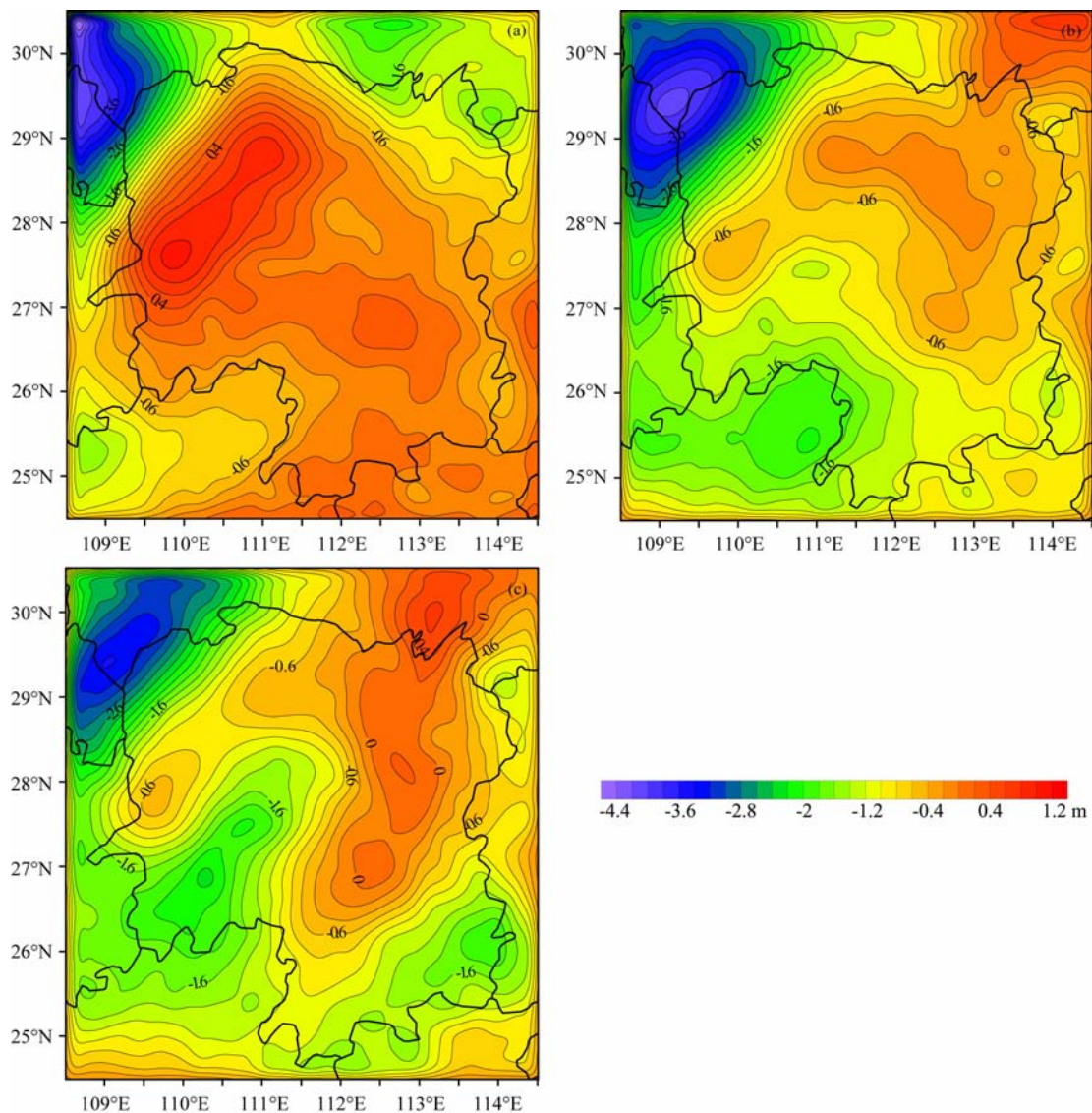


图 6 剩余均衡大地水准面 (等值线间隔: 0.2 m)

(a)  $n=20$ ; (b)  $n=70$ ; (c)  $n=150$ .

Fig. 6 Residual isostatic geoid undulations (Isoline interval: 0.2 m)

水准面(图 3a)和 20 阶剩余布格大地水准面(图 4), 可以发现在三种不同性质的剩余大地水准面中该区域均以相对隆起的形式出现, 可以推测在该区域岩石圈内应该存在大范围的高密度地幔体. 已有的地球物理研究表明<sup>[38-39]</sup>, 该隆起所对应的湘西北地区为新构造活动带, 以地壳抬升为主, 破坏了该区域的地壳均衡状态, 因此构造活动和均衡异常也可能是引起这一隆起的一个重要原因.

图 6b 为 70 阶剩余均衡大地水准面, 以反映研究区上地幔内的异常信息为主, 幅值较图 6a 有所减小, 原先湘西北巨大的相对隆起区在本图中已不是特别明显, 麻阳盆地仍表现为相对隆起, 且与常德、洞庭湖、衡阳及江汉平原地区连成一体, 形成一个巨大的“马蹄形”上地幔相对隆起, 表明了这些地区在

地质构造上存在着某种一致性; 研究区西北部表现为近圆形相对凹陷, 与图 3b 一致. 对比已有的湖南省莫霍面埋深图<sup>[35,37]</sup>, 不难发现该剩余均衡大地水准面与莫霍面起伏形态存在着一定的相似性.

为进一步分析莫霍面起伏与地壳均衡状态的关系, 结合湖南省莫霍面最深埋深约 45 km<sup>[35,37]</sup>, 以及大地水准面对地壳内异常信息不敏感这两方面因素, 我们从均衡大地水准面中移去前 150 阶分量得到如图 6c 所示的剩余均衡大地水准面. 由公式(4)可知, 该剩余大地水准面主要反映了深度 43 km 以上的异常信息, 可近似认为以反映莫霍面起伏信息为主. 但该剩余大地水准面异常形态并不与莫霍面起伏呈直接对应关系, 而是指偏离假定均衡的莫霍面的程度. 我们知道, 本文中均衡大地水准面是假定

研究区符合 Airy 局部均衡计算得到的,但实际莫霍面起伏并非全部符合 Airy 局部均衡假设,这就导致均衡补偿过剩或不足两种异常情况.图 6c 的异常信息就表示了这种偏离程度,异常幅值越大,表示偏离程度越大,反之亦然.在计算过程中,均衡大地水准面等于布格大地水准面减去 Airy 局部均衡改正,而 Airy 局部均衡改正与实际莫霍面对大地水准面的影响皆为负值,且埋深越深,绝对值越大,反之亦然.因此,当实际莫霍面比假定均衡莫霍面浅时,前者对大地水准面的影响的绝对值要小于后者的绝对值,那么计算得到的均衡大地水准面值会比实际偏大,在图 6c 中表现为正值隆起,即均衡补偿不足;同理,当实际莫霍面比假定均衡莫霍面深时,表现为负值凹陷,即均衡补偿过剩;当两者埋深相近时,表现为零值附近,即处于均衡状态.根据这一对应关系,结合图 5b 所示的 Airy 均衡莫霍面信息,可以得到以下信息:

(1) 衡阳、洞庭湖地区对应于图 6c 中零值线附近,表明这些地区基本上处于均衡状态,对应的莫霍面埋深约为 30 km;

(2) 江汉平原地区对应于图 6c 中正值隆起区,表明该地区处于均衡补偿不足状态,即该地区的莫霍面比假定均衡莫霍面浅,约  $< 30$  km;

(3) 常德、麻阳地区对应于图 6c 中负值凹陷区,表明实际莫霍面埋深大于假定均衡莫霍面,约  $> 32$  km;

(4) 湘西南雪峰山地区和湘东南诸广山地区对应于图 6c 中较大范围的负值凹陷区,表明这两个地区的实际莫霍面要比假定均衡莫霍面深,约  $> 34$  km;

(5) 研究区西北部地区对应于图 6c 中沿北西方向迅速下降的陡坡带和负值凹陷极值区,表明该地区处于较为严重的均衡补偿过剩状态,实际莫霍面埋深要远远大于假定均衡莫霍面,约  $> 36$  km,最深估计可达 45 km.

需要补充的是,文中关于剩余均衡大地水准面异常与偏离假定均衡的莫霍面的程度这一对应关系是一种理想化的情况,因为 Airy 局部均衡理论只是几种均衡理论中的一种,并非符合所有实际情况.此外,均衡改正中参数的选取(如地壳平均密度、下地壳与上地幔密度差、均衡补偿深度等)、150 阶剩余均衡大地水准面存在地壳内异常信息等因素都会对结果产生影响.综合这些因素,我们认为在湖南省内,大多数地区基本处于均衡状态,其中湘西南、湘东南、麻阳以及常德地区存在着较弱的均衡补偿过剩现象,而在西北部地区则存在着较强的均衡失常

现象.同时,这些均衡失常现象是在移去长波分量的剩余均衡大地水准面中提取出来的,中波异常应该是引起这些现象的主要原因,这一结论与谢湘雄等<sup>[38-39]</sup>的结论比较一致.

## 5 结论与讨论

(1) 利用超高阶地球重力位模型 EGM2008 计算了研究区重力大地水准面,经处理后又得到布格大地水准面和均衡大地水准面,分别对三种大地水准面进行频谱分离、分析,并结合已有的地球物理资料对研究区进行解释,在纵向和横向上均可较好地反映出研究区的内部构造特征,为研究地面重力数据空白区和稀少区的地球内部构造提供了一种有效的途径.同时,大地水准面长波占优的性质结合布格重力异常中短波占优的性质,可以更全面地对地球内部异常构造进行解释.

(2) 研究区重力大地水准面和均衡大地水准面虽然性质上完全不同,但总体形态比较接近,因地形影响,后者形态较前者要平缓,但它们均受地球深部异常控制,在全波段形态中很难分辨出有用的异常信息;移去地形影响后的布格大地水准面更加突出了岩石圈及其更深部的异常特征,这对研究岩石圈构造很有帮助.

(3) 代表不同深度异常信息的剩余重力大地水准面,可以比较有效地分辨出研究区内深大断裂带、构造块体、密度异常横向分布以及莫霍面起伏等特征,但在每个剩余大地水准面中都存在着一些由地形引起的干扰信息,且随着场源深度的减小,干扰迅速增大,在深度到达中地壳时,剩余大地水准面基本上被这种干扰信息占据,这表明重力大地水准面不能有效地反映出研究区地壳内的异常信息.这种现象一方面可能与大地水准面长波占优的性质有关,另一方面则可能与使用的分离方法有关,因为该方法不能有效地移去地形的影响.因此,要使大地水准面能准确地反映出地壳内的异常特征,除了使精度和分辨率得到进一步的提高外,还得寻找出一种更加有效的分离方法.

(4) 移去前 20 阶分量后的剩余布格大地水准面突出了岩石圈内异常信息,通过对该剩余大地水准面形态的分析可以大致了解研究区岩石圈深度的整体变化趋势及密度异常横向分布,为更深入的地球物理研究提供了补充信息.同时,均衡补偿作用在该大地水准面中也有所体现,一些深大断裂的特征

更加明显。

(5) Airy 局部均衡改正对应的大地水准面起伏形态与布格大地水准面、剩余布格大地水准面接近,且幅值较大,表明均衡补偿作用在岩石圈内的影响很大。相比于全波段均衡大地水准面,移去不同分量后的剩余均衡大地水准面更能突出一些有用的异常信息。其中 20 阶剩余均衡大地水准面以反映岩石圈内地幔密度分布及均衡异常的综合信息为主;70 阶剩余均衡大地水准面突出了上地幔的密度分布,并与研究区莫霍面起伏形态存在着相似性;150 阶剩余均衡大地水准面主要反映了偏离假定均衡的莫霍面的程度的信息,根据这一关系,结合研究区 Airy 均衡莫霍面信息,可以推测出研究区莫霍面的大致起伏形态以及相关的均衡状态。但受其他干扰因素的影响,这种信息只能作为一种参考,要想获得更精确的信息,还需结合其他地球物理资料。

(6) 本文所使用的大地水准面是利用 EGM2008 模型计算得到的。该模型融合了 GRACE 卫星重力数据、卫星测高数据、海洋船测重力数据以及地面重力数据。目前 GOCE 重力卫星已经发射并投入使用,卫星重力的精度和分辨率将会得到进一步的提高,而融合了 GOCE 重力梯度数据的新的阶地球重力位模型在地球物理中的应用将值得期待。

## 参考文献(References)

- [1] Vanicek P, Christou N T. Geoid and Its Geophysical Interpretations. Florida: CRC Press, 1994.
- [2] Heiskanen W A, Moritz H. Physical Geodesy. San Francisco: Freeman, 1967.
- [3] Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the Earth's geoidal undulations and gravity anomalies. *Marine Geodesy*, 1983, 7(1-4): 61-100.
- [4] Ebbing J, Braitenberg C, Goetze H J. The lithospheric density structure of the Eastern Alps. *Tectonophysics*, 2006, 414(1-4): 145-155.
- [5] Ebbing J, Olesen O. The Northern and Southern Scandes-structural differences revealed by an analysis of gravity anomalies, the geoid and regional isostasy. *Tectonophysics*, 2005, 411(1-4): 73-87.
- [6] Swieczak M, Kozlovskaya E, Majdański M, et al. Interpretation of geoid anomalies in the contact zone between the East European Craton and the Palaeozoic Platform-II: Modelling of density in the lithospheric mantle. *Geophys. J. Int.*, 2009, 177(2): 334-346.
- [7] Marquart G, Lelgemann D. On the interpretation of geoid anomalies in Europe with special regard to the EGT profiles. *Tectonophysics*, 1992, 207(1-2): 25-42.
- [8] Kakkuri J, Wang Z T. Structural effects of the crust on the geoid modelled using deep seismic sounding interpretations. *Geophys. J. Int.*, 1998, 135(2): 495-504.
- [9] Majdański M, Kozlovskaya E, Swieczak M, et al. Interpretation of geoid anomalies in the contact zone between the East European Craton and the Palaeozoic Platform-I. Estimation of effects of density inhomogeneities in the crust on geoid undulations. *Geophys. J. Int.*, 2009, 177(2): 321-333.
- [10] 陆洋, 许厚泽. 青藏地区大地水准面形态及其与构造动力学的关系. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 203-210.  
Lu Y, Hsu H Z. A geoid features and relation between the geoid and the earth's internal structure dynamics in the Qinhai-Tibet region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, 39(2): 203-210.
- [11] 高金耀, 金翔龙. 由多卫星测高大地水准面推断西太平洋边缘海构造动力格局. *地球物理学报*, 2003, 46(5): 600-608.  
Gao J Y, Jin X L. Tectonic and geodynamic pattern of marginal seas on the West Pacific inferred from multi-satellite altimetry geoid. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(5): 600-608.
- [12] 陆洋. 中国南海高分辨率大地水准面及海底地形特征. *自然科学进展*, 2002, 12(7): 767-770.  
Lu Y. South China Sea high resolution geoid and submarine topography. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2002, 12(7): 767-770.
- [13] Featherstone W. On the use of the geoid in geophysics; a case study over the North-West Shelf of Australia. *Exploration Geophysics*, 1997, 28(2): 52-57.
- [14] Kamguia J, Nouayou R, Tabod C T, et al. Geophysical signature of geological units inferred from the analysis of geoid maps in Cameroon and its surroundings. *Journal of African Earth Sciences*, 2008, 52(1-2): 1-8.
- [15] Meurers B, Ruess D. A new Bouguer gravity map of Austria. *Austrian Journal of Earth Science*, 2009, 102: 62-70.
- [16] Ebbing J. The crustal structure of the Eastern Alps from a combination of 3D gravity modelling and isostatic investigations. *Tectonophysics*, 2004, 380(1-2): 89-104.
- [17] Ebbing J, Braitenberg C, Goetze H J. Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the Eastern Alps. *Tectonophysics*, 2001, 337(3-4): 191-208.
- [18] Zanolli C, Braitenberg C, Ebbing J, et al. New gravity maps of the Eastern Alps and significance for the crustal structures. *Tectonophysics*, 2006, 414(1-4): 127-143.
- [19] Lefort J P, Agarwal B N P, Jaffal M. A tentative chronology of the Moho undulations in the Celtic sea region. *Journal of Geodynamics*, 1999, 27(2): 161-174.
- [20] Rahman M M, Ullah S E. Inversion of gravity data for imaging of a sediment-basement interface: a case study in the Northwestern Part of Bangladesh. *Pure and Applied Geophysics*, 2009, 166(12): 2007-2019.



- [21] Tiberi C, Diament M, Lyon-Caen H, et al. Moho topography beneath the Corinth Rift area (Greece) from inversion of gravity data. *Geophys. J. Int.*, 2001, 145(3): 797-808.
- [22] Braitenberg C, Wienecke S, Wang Y. Basement structures from satellite-derived gravity field; South China Sea ridge. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111; B05407.
- [23] Braitenberg C, Ebbing J. The GRACE-satellite gravity and geoid fields in analysing large-scale, cratonic or intracratonic basins. *Geophysical Prospecting*, 2009, 57(4): 559-571.
- [24] Hackney R, Bousquet R, Gotze H, et al. Geophysical and petrological applications of new-generation satellite-derived gravity data: What can and needs to be done? //Proc. the 3rd International GOCE User Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, 6-8 November, 2006.
- [25] 周国藩, 陈建国, 张健. 青藏高原卫星重力场及所反映的壳幔结构和深部构造特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 1996, 21(2): 191-197.  
Zhou G F, Chen J G, Zhang J. Characters of crust-mantle construction and deep structure in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 1996, 21(2): 191-197.
- [26] 滕吉文, 王谦身, 王光杰等. 喜马拉雅"东构造结"地区的特异重力场与深部地壳结构. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1045-1052.  
Teng J W, Wang Q S, Wang G J, et al. Specific gravity field and deep crustal structure of the 'Himalayas east structural knot'. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4): 1045-1052.
- [27] Block A E, Bell R E, Studinger M. Antarctic crustal thickness from satellite gravity: implications for the Transantarctic and Gamburtsev Subglacial Mountains. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2009, 288(1-2): 194-203.
- [28] Eyike A, Werner S C, Ebbing J, et al. On the use of global potential field models for regional interpretation of the West and Central African Rift System. *Tectonophysics*, 2010, 492(1-4): 25-39.
- [29] Pavlis N, Holmes S, Kenyon S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree2160; EGM2008. Presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.
- [30] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析. *测绘学报*, 2009, 38(4): 283-289.  
Zhang C Y, Guo C X, Chen J Y, et al. EGM2008 and its application analysis in Chinese Mainland. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2009, 38(4): 283-289.
- [31] Nagy D, Papp G, Benedek J. The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy*, 2000, 74(7-8): 552-560.
- [32] Nagy D, Papp G, Benedek J. Corrections to "The gravitational potential and its derivatives for the prism". *Journal of Geodesy*, 2002, 76(8): 475.
- [33] Kuhn M. Geoid determination with density hypotheses from isostatic models and geological information. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(1-2): 50-65.
- [34] Heck B, Seitz K. A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(2): 121-136.
- [35] 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 湖南深部构造. *湖南地质*, 1993, 7(增刊): 1-101.  
Rao J R, Wang J H, Cao Y Z. Deep structure in Hunan. *Hunan Geology* (in Chinese), 1993, 7(Suppl.): 1-101.
- [36] Li X, Goetze H J. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1660-1668.
- [37] 谢湘雄, 顾剑虹. 试论湖南省莫霍面形态及地壳厚度特征. *湖南地质*, 1990, 9(2): 10-18.  
Xie X X, Gu J H. Trial discussion on the form of Moho discontinuity and crustal thickness of Hunan Province. *Hunan Geology* (in Chinese), 1990, 9(2): 10-18.
- [38] 谢湘雄, 顾剑虹. 地壳均衡假说与湘西北地壳均衡失调探讨. *物探与化探*, 2002, 26(3): 171-174.  
Xie X X, Gu J H. Isostatic hypothesis and an investigation of isostasy dislocation. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 26(3): 171-174.
- [39] 谢湘雄. 试论湖南地壳均衡特征. *湖南地质*, 1995, 14(3): 179-183.  
Xie X X. On the properties of isostatic crust in Hunan. *Hunan Geology* (in Chinese), 1995, 14(3): 179-183.

(本文编辑 何 燕)