

考虑沉积层重力改正的中国西部 Moho 面深度反演*

姜永涛^{1,2}, 张永志¹, 王 帅¹, 焦佳爽¹, 槐岩珂¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710000; 2. 南阳师范学院 环境科学与旅游学院, 河南 南阳 473061)

摘要: 首先研究了大型沉积盆地对地表重力异常的影响, 然后基于 Parker-Oldenburg 迭代算法, 利用经过沉积层改正的布格重力异常数据反演了中国西部的 Moho 面深度。结果表明, 地壳浅层密度异常对地表重力异常和 Moho 面深度结果的影响较大, 利用简化的三层沉积层模型, 计算出的中国西部沉积盆地的重力异常改正最大可达 25 mGal, 由此引起的 Moho 面深度可达 2.2 km, Moho 面深度最终计算结果与区域最新研究成果相符合, 因此, 利用重力异常反演 Moho 面深度时, 应考虑沉积层的影响以提高反演精度。

关键词: 沉积盆地; 布格异常; Moho 面深度; Parker-Oldenburg 迭代算法; 中国西部

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)02-0257-05

0 引言

地壳厚度 (Moho 面深度) 是该地区长期地质构造过程的反映, 了解区域 Moho 面深度特征一方面可以加深对区域构造环境的认识, 另一方面利用地壳结构数据可以帮助人们了解岩石圈及深部地幔结构 (Kaban *et al.*, 2010)。

利用重力异常研究 Moho 面深度, Parker (1972) 给出了频率域中密度界面起伏与其引起的地表重力异常的一维关系式; 基于 Parker 公式, Oldenburg (1974) 提出了在频率域中计算密度界面的 Parker-Oldenburg 迭代算法; 随着计算机技术的发展, Gómez-Ortiz 和 Agarwal (2005) 以及 Shin 等 (2006) 分别发布了基于二维快速傅里叶变换求算 Moho 面深度的 MATLAB 和 FORTRAN 程序, 并实例验证了程序的可靠性; 随着卫星重力技术的发展, 利用 GRACE 卫星重力场模型, 基于 Parker-Oldenburg 迭代算法, Shin 等 (2007) 研究了青藏高原地区的 Moho 面深度特征, Block 等 (2009) 研究了南极大陆的地壳结构, 段虎荣等 (2010) 研究了中国大陆及邻域的地壳厚度。但以上的这些研究均未考虑大型沉积盆地对 Moho 面深度结果的影响。

沉积层位于地壳最外层, 其异常密度分布会对地表重力异常产生较大的影响, 因此在利用布格重力异常数据反演 Moho 面深度时, 进行沉积层

重力异常的消除有可能获得更高的反演精度。为此, 本文提出了利用经过沉积层重力改正的布格重力异常来研究 Moho 面深度, 以中国西部 Moho 面求算为例, 定量分析了沉积层对 Moho 面深度反演结果的影响, 并验证了本文方法的可靠性。

1 中国西部沉积层盆地重力异常改正

为说明重力异常与密度异常体埋深的关系, 依据平顶棱柱体模型 (Nagy *et al.*, 2000), 本文计算了 $10\text{ km} \times 10\text{ km} \times 1\text{ km}$ (长 \times 宽 \times 高) 大小, 密度异常为 $1\ 000\text{ kg/m}^3$ 的棱柱体, 顶部埋深从 $0 \sim 70\text{ km}$ 变化时, 引起的地表重力异常变化 (图 1)。

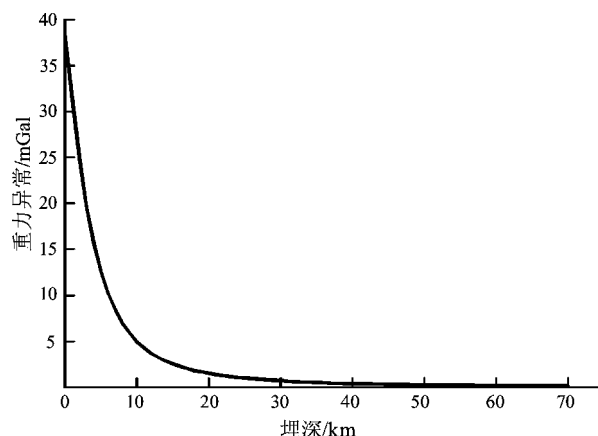


图 1 密度异常体埋深与地表重力异常的关系

Fig. 1 The relationship between the buried depth of density anomaly body and gravity anomaly in surface

* 收稿日期: 2014-12-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374028, 41274083, 41304013)和国土资源大调查项目(1212010914015)联合资助。

由图 1 可以看出,地表重力异常随密度异常体顶部埋深的增加而迅速减少(与埋深的 2 次方成反比),说明地壳浅层的密度异常对地表重力异常有很大的影响。地表浅层密度异常分布不仅可以产生短波重力异常(山区),也可以产生中长波重力异常(大区域沉积盆地、高原)。地形(山地、高原等)重力效应去除是传统布格异常计算的范畴,因此在利用布格重力异常反演 Moho 面深度时,为满足反演理论中地壳密度均一的假设,有必要去除地表浅层密度异常体(大区域沉积盆地)的重力效应。

依据全球沉积层厚度、密度模型(Laske, Masters, 1997),图 2a 给出了中国西部的沉积层分布,中国西部大型沉积层主要分布在天山两侧盆

地,其中,塔里木盆地沉积层分布最为广泛,最大厚度位于盆地中部,可达 9 km;准格尔盆地中部的沉积层厚度最大可达 7.7 km;柴达木盆地也存在沉积层,厚度最大可达 5 km,但分布范围相对较小。

笔者利用分为 3 层的 1° 间隔的沉积层厚度和密度数据(Laske, Masters, 1997),基于平顶棱柱体模型正演了中国西部沉积层重力效应(地壳参考密度取 $2\,670\text{ kg/m}^3$),并利用克里格内插法对结果进行 0.1° 网格化处理,得到了中国西部沉积层重力异常(图 2b),沉积层引起的重力异常最大可达 25 mGal,因此在反演 Moho 面深度时不能忽视沉积层的重力效应。

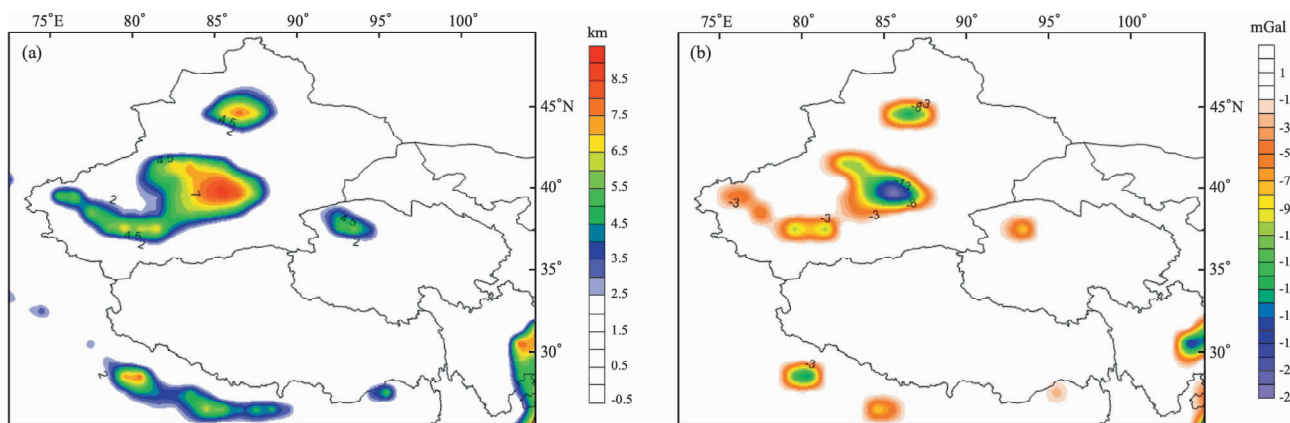


图 2 中国西部沉积层厚度 (a) 及沉积层引起的重力异常改正 (b)

Fig. 2 The thickness of sedimentary layer (a) and the gravity anomaly correction caused by sedimentary layer (b) in western China

2 中国西部的新布格重力异常

经典布格重力异常采用 Fullea 等(2008)的算法求算,用到的地形数据和自由空气重力异常数据分别来源于同为 $1'$ 间隔 topo-15.1.img (Smith, Sandwell, 1994) 和 grav.img. 20.1 (Sandwell *et al.*, 2013)。由上节分析可知,在反演 Moho 面深度时不能忽视沉积层的重力效应,因此笔者对传统布格异常进行了沉积层重力异常改正,得到中国西部沉积层改正后的布格重力异常(图 3d)。

由图 3a 可以看出,中国西部地形特征是对区域长期地质构造过程的反应,印度板块的挤压和高原深部物质的迁移造成了青藏高原的隆起(嵇少丞等, 2008),在青藏高原深部物质在向北迁移过程中,受到塔里木克拉通的阻挡,呈现分流特

征,大部分高原物质向东流转,少部分向西流转。青藏高原深部物质流动推动塔里木克拉通向北运动,由此产生的挤压作用是造成天山新生代以来的再次活化隆起的主要原因之一(Lei, Zhao, 2007),在这种长期构造环境下形成了中国西北地区独特的“三山两盆”的地貌特征。

由图 3b 可以看出,区域自由空气重力异常分布与地形强相关,这是由于地形对地表重力异常的影响最大,以至地形的重力效应遮盖了深部密度异常界面(如 Moho 面深度)的位场特征,因此在反演深部结构(如 Moho 面深度)时,需对自由空气异常进行地形等改正(Fullea *et al.*, 2008),得到传统的布格重力异常(图 3c)。由图 3c 可以看出,去除了地形重力效应的影响,青藏高原表现出明显的负重力异常特征,变化范围为 $-480 \sim -580\text{ mGal}$,但其内部区域重力异常变化相对较

缓；“三山两盆”地区的布格重力异常变化范围在 $-100 \sim -300$ mGal 之间，然而在塔里木盆地内部，布格重力异常呈现相对变化较大的特征。

从传统布格异常中去除沉积层重力效应，即

得到新布格异常（图 3d），它在分布上与传统布格异常较为相似，但在沉积层分布的区域，与图 3c 存在一定的差别。本文利用经沉积层改正后的布格重力异常反演中国西部的 Moho 面深度特征。

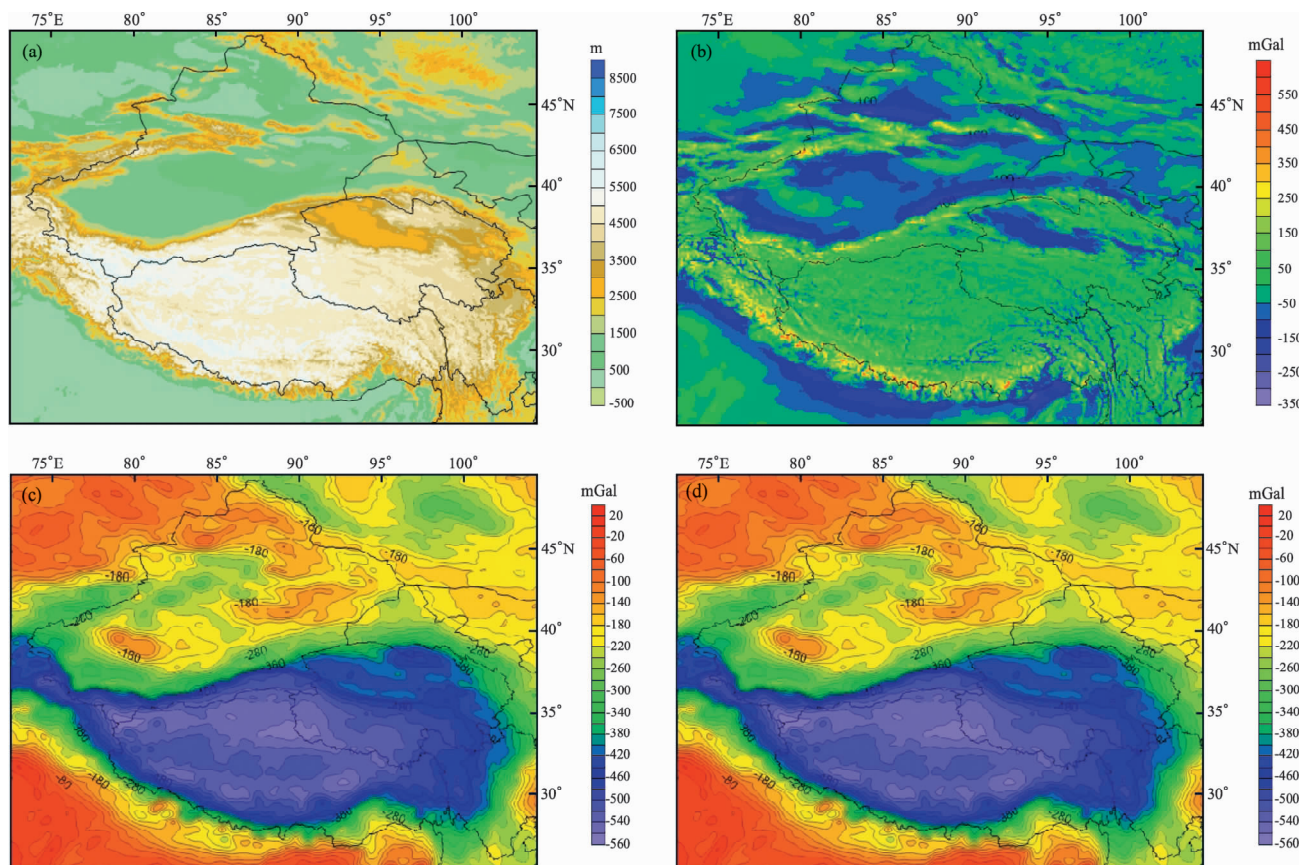


图3 中国西部的区域地形(a)、自由空气异常(b)、布格重力异常(c)以及去除沉积层效应的布格异常(d)

Fig. 3 The regional topography (a), free-air anomaly (b), bouguer gravity anomaly (c) and bouguer gravity anomaly after rejecting the effect of sedimentary layer (d) in western China

3 中国西部 Moho 面深度的反演

3.1 Parker-Oldenburg 迭代算法

Parker (1973) 给出了频率域中密度界面 $h(x)$ 与其引起的地表重力异常 $\Delta g(x)$ 的一维关系式：

$$F[\Delta g(x)] = -2\pi G \rho e^{(-kz_0)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F[h^n(x)]. \quad (1)$$

其中， $F(x)$ 为傅里叶变换； G 为万有引力常数； ρ 为待反演的界面（本文为 Moho 面）上下密度差； k 为波数，波数与波长的关系为 $k = 1/\lambda$ ； z_0 为待反演密度界面平均深度； x 为位置矢量。

基于 Parker 公式，Oldenburg (1974) 提出了在频率域中计算密度界面的 Parker-Oldenburg 迭代算法：

$$F[h(x)] = -\frac{F[\Delta g(x)] e^{(-kz_0)}}{2\pi G \rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F[h^n(x)]. \quad (2)$$

根据公式 (2)，已知区域重力异常 $\Delta g(x)$ ，给定相应参数 z_0 、 ρ ，假设初始界面起伏初始值 $h(x) = 0$ ，可求得上式等号左端的 $F[h(x)]$ ，对它做傅里叶逆变换，可得界面起伏 $h(x)$ 第一次迭代结果，将 $h(x)$ 代入公式 (2)，继续求算 $h(x)$ ，直至满足迭代条件（设定最大迭代数或者连续两次迭代的结果小于某一设定值）时，停止迭代计算，得到最终密度界面 $h(x)$ 。

由于重力异常高频成分会导致反演结果的不稳定,为保证迭代收敛,依据波数对重力异常傅里叶变换结果进行了低通滤波处理 (Gómez-Ortiz, Agarwal, 2005):

$$\text{filter}(k) = \begin{cases} 1 & , k < a; \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{k - 2\pi b}{2(b - a)} \right) \right] & , a < k < b; \\ 0 & , k > b. \end{cases} \quad (3)$$

其中 a 、 b 为滤波参数;波数 $k = 1/\lambda$, 波长 λ 的单位为 km。

3.2 中国西部的 Moho 面深度反演及特征

利用中国西部经过沉积层改正的布格重力异常数据,基于 Parker-Oldenburg 迭代算法,给定参数 $z_0 = 45 \text{ km}$ 、 $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$,且对重力异常数据进行了边界锥形余弦滤波处理 (Gómez-Ortiz,

Agarwal, 2005),得到了中国西部 Moho 面深度 (图 4a),中国西部 Moho 面深度的梯度带主要分布在青藏高原边缘和天山区域,且在塔里木盆地内部 Moho 面深度也较为明显。其中,青藏高原地壳厚度平均为 $60 \sim 65 \text{ km}$,最厚可达 70 km ;塔里木盆地和准格尔盆地地壳厚度为 $35 \sim 50 \text{ km}$,塔里木盆地内部存在较大的 Moho 面深度,盆地边缘凹陷,中部相对隆起,此特征是处于印度次大陆与欧亚大陆的碰撞环境下,高强度的塔里木克拉通表现出整体弹性变形(挠曲)的体现(王良书,李成,1996);天山区域的地壳厚度较南北两盆地(南侧塔里木盆地,北侧准格尔盆地)厚,最厚可达 55 km ,但东天山 Moho 深度小于西天山,揭示了天山造山带在不同区段的隆升和动力学机制的差异(熊小松等,2011)。通过对比,本文与 Stolk 等 (2013) 研究结果有较好的一致性。

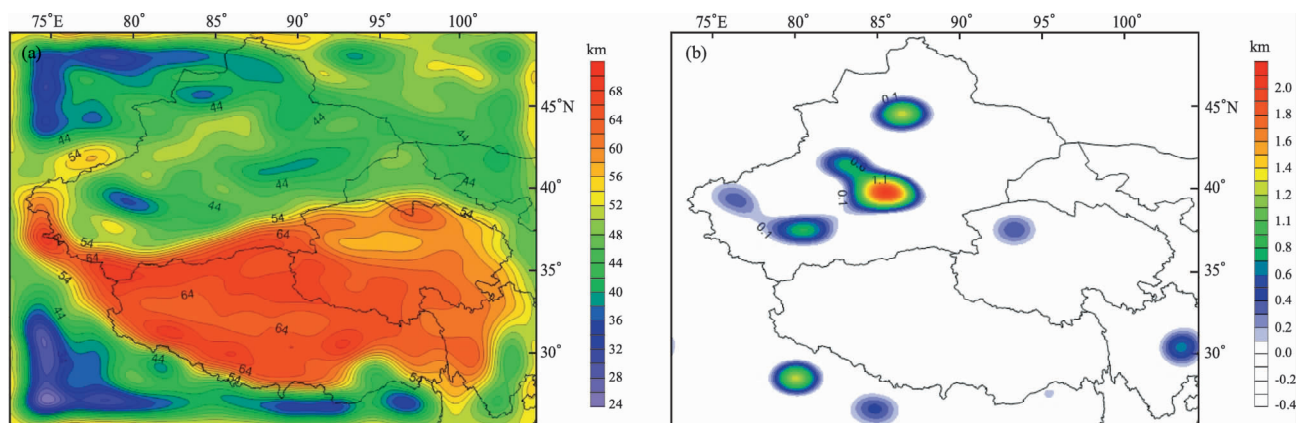


图4 中国西部 Moho 面深度结果 (a) 及沉积层效应引起的 Moho 面深度 (b)

Fig. 4 The result of Moho depth (a) and the Moho depth disturbed by sedimentary layer effects (b) in Western China

为分析沉积层重力异常对 Moho 面深度的影响,利用传统布格重力异常按照上述方法计算了同一区域的 Moho 面深度结果,将其与图 4a 相减,得到沉积层对 Moho 面深度的影响 (图 4b)。利用简化的三层沉积层密度模型引起的 Moho 面深度差值最大可达 2.2 km 。因此在利用重力异常反演 Moho 面深度时,需考虑沉积层的影响。

4 结论

由于地壳浅层(如大型沉积层)密度异常会对地表重力异常产生较大的影响,本文对传统布格重力异常进行了沉积层重力效应改正,基于 Par-

ker-Oldenburg 迭代算法进行了沉积层改正后布格重力异常数据的中国西部 Moho 面深度特征反演,反演结果与最新研究成果符合较好。利用简化的三层沉积层模型,计算出的中国西部沉积层引起的重力异常最大可达 25 mGal ,引起的 Moho 面深度最大可达 2.2 km ,因此在利用重力异常反演 Moho 面深度时,需考虑沉积层的影响。

参考文献:

- 段虎荣,张永志,刘锋,等. 2010. 利用卫星重力数据研究中国及邻域地壳厚度[J]. 地球物理学进展,25(2):494-499.
- 嵇少丞,王茜,孙圣思,等. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报,82(12):1643-1667.

- 王良书, 李成. 1996. 塔里木盆地岩石层热结构特征[J]. 地球物理学报, 39(6): 794–803.
- 熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 2011. 天山造山带的深部结构[J]. 地球物理学进展, 26(6): 1906–1914.
- Block A. E., Bell R. E., Studinger M. 2009. Antarctic crustal thickness from satellite gravity: Implications for the Transantarctic and Gamburtsev Subglacial Mountains[J]. Earth and Planetary Science Letters, 288(1): 194–203.
- Fullea J., Fernández M., Zeyen H. 2008. FA2BOUG—A FORTRAN 90 code to compute Bouguer gravity anomalies from gridded free-air anomalies; Application to the Atlantic-Mediterranean transition zone [J]. Computers & Geosciences, 34(12): 1665–1681.
- Gómez-Ortiz D., Agarwal B. N. P. 2005. 3DINVER. M; a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm[J]. Computers & geosciences, 31(4): 513–520.
- Kaban M. K., Tesauro M., Cloetingh S. 2010. An integrated gravity model for Europe's crust and upper mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 296(3): 195–209.
- Laske G., Masters G. 1997. A global digital map of sediment thickness [J]. Eos Trans. AGU, 78: F483.
- Lei J., Zhao D. 2007. Teleseismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 162(3): 165–185.
- Nagy D., Papp G., Benedek J. 2000. The gravitational potential and its derivatives for the prism [J]. Journal of Geodesy, 74(7–8): 552–560.
- Oldenburg D. W. 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies[J]. Geophysics, 39(4): 526–536.
- Parker R. L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31(4): 447–455.
- Sandwell D., Garcia E., Soofi K., et al. 2013. Toward 1-mGal accuracy in global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1 [J]. The Leading Edge, 32(8): 892–899.
- Shin Y. H., Choi K. S., Xu H. 2006. Three-dimensional forward and inverse models for gravity fields based on the Fast Fourier Transform [J]. Computers & geosciences, 32(6): 727–738.
- Shin Y. H., Xu H., Braitenberg C., et al. 2007. Moho undulations beneath Tibet from GRACE-integrated gravity data [J]. Geophysical Journal International, 170(3): 971–985.
- Smith W. H. F., Sandwell D. T. 1994. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry [J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth (1978–2012), 99(B11): 21803–21824.
- Stolk W., Kaban M., Beekman F., et al. 2013. High resolution regional crustal models from irregularly distributed data; Application to Asia and adjacent areas [J]. Tectonophysics, 602: 55–68.

Inversion of Moho Depth in Western China Considering Gravity Correction of Deposition Layer

JIANG Yong-tao^{1,2}, ZHANG Yong-zhi¹, WANG Shuai¹, JIAO Jia-shuang¹, HUAI Yan-ke¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

(2. College of Resource Environment and Tourist, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China)

Abstract

Firstly, the influence of the huge sedimentary basin on the surface gravity anomaly was studied. Secondly, based on the Parker-Oldenburg iterative algorithm, we inversed the depth of Moho surface in Western China by using the Bouguer gravity anomaly data after the correction of the sedimentary. The results show that the shallow density anomaly in the crust had the great influence on both surface gravity anomaly and the depth of Moho surface. Using the simplified 3-layers sedimentary model, we obtained that the gravity anomaly correction can be up to 25 mGal in the sedimentary basin in Western China, which induced the depth of Moho surface is 2.2 km, and the calculated depth of Moho surface is corresponding to the latest regional research result. In order to get better accuracy of the depth of Moho surface, the sedimentary effects should be considered in the process of inverting the depth of Moho surface by using gravity anomaly.

Key words: sedimentary basins; Bouguer gravity anomaly; depth of Moho surface; Parker-Oldenburg iterative algorithm; Western China