DOI:10.14075/j.jgg.2017.11.004
文章编号:1671-5942(2017)11-1118-03

华北地区 2009～2013 年地下物质密度变化及其地壳运动含义

韩美涛[1]　玄松柏[2,3]　张永奇[1]　曹建平[1]　郑增记[1]

1　陕西省地震局，西安市水文巷 4 号，710068
2　中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室)，武汉市洪山侧路 40 号，430071
3　北京劳雷物理探测仪器有限公司(上海)，上海市龙吴路 777 号，200232

摘　要：基于华北地区 2009～2013 年半年尺度重力复测资料，利用扣除半年和年周期获得的重力年变率反演计算华北地区地下物质密度变化。结果显示，华北地区总体上呈现东、西两侧的山西地区和渤海湾盆地为负变化，中间地带的华北平原表现为正变化，揭示了华北平原中下地壳因两侧膨胀和岩石圈热物质上涌而使物质处于压缩状态。

关键词：重力变化；趋势拟合；重力变化率；密度变化；反演；华北地区
中图分类号：P312　　**文献标识码**：A

作为世界上最古老克拉通之一的华北克拉通是中朝克拉通的一部分[1]，是印度板块与欧亚板块碰撞作用和太平洋板块俯冲作用在中国大陆的交汇部位，著名的南北重力梯度带几乎与北北东-南西西走向的太行山一致地纵贯该区。该梯度带西部为地壳不断拉伸的山西断陷盆地带[2]，东部为具有较厚新生代沉积的华北平原以及被郯庐断裂带分隔的胶辽块体，是现今中国大陆地壳运动较为活跃的地区。

地表重复观测获得的重力场变化在一定程度上反映地球内部形变和物质迁移现象，解释分析地表隆升[3-4]、火山喷发[5]、地震孕育和发生机理[6-7]等地球动力学过程方面具有重要意义。利用较高空间分辨率的重复观测的重力资料反演计算地下物质的重新分布(即密度变化)，为地壳运动研究提供重要参考[8]。本文利用华北流动重力网半年尺度的复测资料，获得 2009～2013 年重力年变化率(gravity change rate，GCR)，基于 GCR 反演计算地下物质密度变化，分析现今华北地区地壳运动的基本特征。

1　重力场变化率

重力复测资料来源于中国地震局实施的华北强震强化跟踪项目的流动重力网，该网每半年(分别约在每年的 4 月和 10 月)施测一次，覆盖 11 个省、自治区和直辖市，包括 1 000 多个流动点和 11 个绝对点，平均点距和空间分辨率分别为 30 km 和 44 km[9]，相对重力联测使用 LCR-G 型和 CG-5 型重力仪，绝对重力测量使用 FG5 型绝对重力仪。利用绝对重力控制的经典平差方法获得了 2009～2013 年共 9 期重复重力资料，各期点值平均精度最小值为 8.9 μGal，最大值为11.3 μGal，平均值为 9.8 μGal(表 1)。

对于空间测量点随时间变化的重力值 $g(\varphi,\lambda,\Delta t)$ 可用长期性变化与周期性变化之和的模型拟合[3]：

$$g(\varphi,\lambda,\Delta t)=A+B\Delta t+\sum_{i=1}^{3}[C_i\cos(\omega_i\Delta t)+D_i\sin(\omega_i\Delta t)]+\varepsilon \quad (1)$$

表 1　各期数据点值平均精度统计

Tab. 1　Statistics of the points' mean accuracy of the gravity measurements

时间	2009s	2010f	2010s	2011f	2011s	2012f	2012s	2013f	2013s	平均值/μGal
点值平均精度/μGal	10.2	9.1	10.1	11.3	9.3	9.5	8.9	9.7	10.4	9.8

注：f 表示上半年，s 表示下半年。

收稿日期：2017-04-17
项目来源：陕西省地震局启航与创新基金(201506，201514)；中国地震局“三结合”课题(162704)。
第一作者简介：韩美涛，工程师，主要从事重力场及其变化与解释研究，E-mail：68335933@qq.com。
通讯作者：玄松柏，博士，副研究员，主要从事重力场及其变化与解释研究，E-mail：song_bai_whu@163.com。

式中,B 为长期性变化,等式右边第 3 项是以 C_i 和 D_i 为振幅、ω_i 为标准周期的周期项,ε 为拟合残差。$i=1$ 和 $i=2$ 分别表示半年周期和年周期,$i=3$ 对应更长周期,本文选取的数据时间长度约为 4 a,反映不出该周期,因此在式(1)中取 $i=1$ 和 $i=2$ 计算周期项。

利用上述方法获得了华北地区 2009～2013 年观测点的重力变化率(图 1),特征点的时序变化特征见参考文献[10]。由图 1 看出,山西地区(太行山以西)大部分点为负变化,山西南部存在较小的正变化区域;华北平原的京津冀地区的观测点除少数观测点呈现较小的负变化以及渤海湾北部具有小片区负变化外,大多数为正变化;胶东半岛除部分点呈现正变化,大部分观测点呈现负变化。大致将研究区域分成 4 个典型地区,即山西断陷带、华北平原、渤海湾盆地南部的山东地区和渤海湾盆地北部的河北地区,重力年变率分布基本呈现了从西向东为负(太行山以西)-正(华北平原)-负(渤海湾盆地)的基本特征,可能是山西断陷带地区 NNW-SSE 向膨胀和整个华北地区呈现 ENE-WSW 向压缩导致的结果[2,10]。

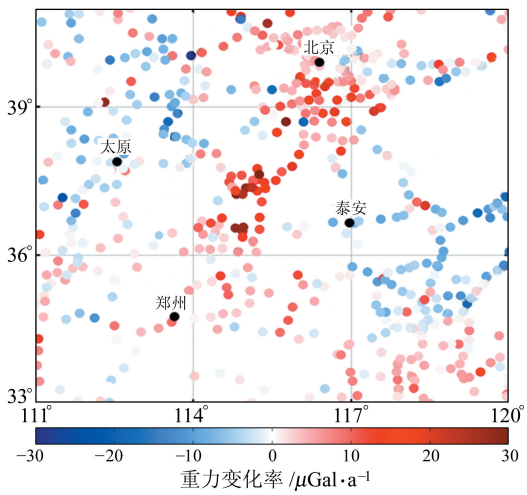
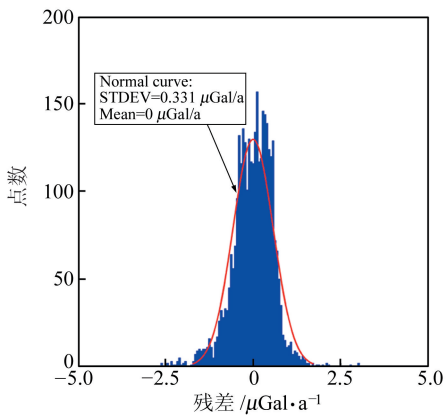


图 1　华北地区重力变化率

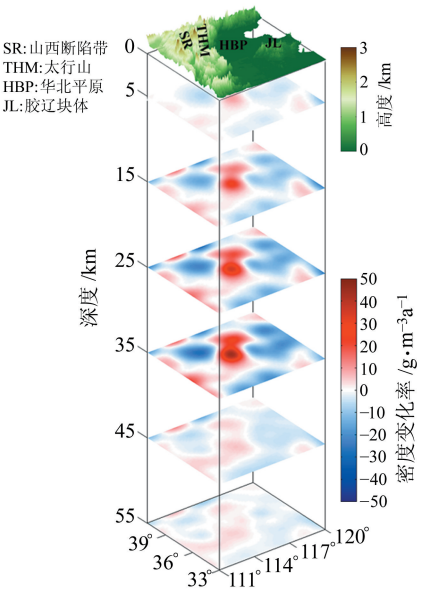
Fig. 1　Gravity change rate in north China

2　地下物质密度变化

重力反演模型采用 Last 等[11]提出、经 Barbosa 等[12]完善的反演方法,该方法在反演过程中采用了模型紧密约束,对探测芦山 2013 年 M_S7.3 地震前地下物质密度变化具有较好的效果[8]。将研究区域(111°～120°E,33°～40.5°N)地下从地表到 60 km 空间剖分成尺寸为 16.8 km×16.8 km×10 km 的长方体(共19 764个),在重力变化率(图 1)的基础上扣除区域趋势(一阶趋势)效应,反演获得地下物质密度变化。反演过程经过 10 次迭代,结果的均方差为 3.3 μGal/a,模型残差统计分析(图 2(a))得到标准差为 0.331 μGal/a,残差平均值约为 0 μGal/a,符合正态分布规律,反演结果具有可信度。图 2(b)给出的是华北地区地下物质密度变化每 10 km 一层解释模型的水平切片。



(a) 最终模型残差统计分析



(b) 地下物质密度变化率

图 2　地下物质密度变化率切片和最终模型残差统计

Fig. 2　Slice map of subsurficial density change rate and statistical analysis of the final model

重力场变化率反演的密度变化结果显示,山西地区 10～40 km(2～4 层)的负变化较为明显,幅值达到−20 g/m³ 左右。中下地壳具有较为明显的膨胀作用,体现了山西断陷带的拉张效应[2,13]。鄂尔多斯块体整体东向 2～4 mm/a 推挤作用使山西地区呈现 ENE-WSW 向的压应力作用[14],在山西断陷带切穿 Moho 的正交纯剪切的深大断裂作用下形成 NNW-SSE 向的拉张作用,密度变化最大值出现在太原盆地附近,说明拉张作用在该地区占主导。物质东向运动和岩石圈

整体下行也是导致中下地壳膨胀而密度减小的重要因素[15]。

渤海湾盆地除京津地区地壳整体呈现负变化,中下地壳(2～4层)幅值在－20 g/m³左右。该地区的深沉基层、浅Moho和岩石圈受到热的软流圈作用更为明显,韧性的中下地壳在受热的情况下较易具膨胀特性[16-17]。在太平洋板块西向俯冲的作用下,渤海湾盆地成为岩石圈厚度变化的陡变带,从60 km增至华北平原的80 km左右[17],岩石圈板片西向下行的拖拽作用可能也是中下地壳膨胀而导致密度变小的主要原因。

华北平原主要表现为NE-SW向正变化带,以中下地壳最为显著,主要体现在京津冀和冀中南地区,冀中南地壳40 km层甚至达到了30 g/m³。东侧渤海湾盆地和西侧山西地区中下地壳的膨胀作用可能是华北平原中下地壳物质累积密度增大的一种因素。另外一个主要原因是太平洋板块俯冲使热的软流圈物质上涌而取代拆沉部分[15-16],使该地区岩石圈减薄,岩石圈地幔上隆形成较明显的地壳东西向压缩现象。华北平原是岩石圈拆沉最为明显的地区,岩石圈厚度明显小于西侧山西地区的100～150 km[15,17],受软流圈上涌影响最为明显。如果考虑地表沉降的重力效应,不到30 mm/a的地表平均沉降速率[18]不足以使重力变化达到20～30 μGal/a的量级(图1),因此虽然本文并没有在模型中考虑地表垂直形变的影响,但地下物质密度变化的幅值可以说明,华北平原地区中下地壳具有明显的压缩效应,致使密度增大。

3 结 语

本文利用重力复测资料获得了2009～2013年华北地区重力变化率,基于该变化率反演计算地下物质密度变化,结果表明:

1)山西地区的负变化主要体现了拉张作用占主导和西侧岩石圈向下拖拽作用。

2)太平洋板块板片俯冲和岩石圈减薄使渤海湾盆地中下地壳表现为膨胀。

3)华北平原受东西两侧的山西地区和渤海湾盆地地壳膨胀作用以及软流圈上涌作用的综合效应,地壳压缩致使密度增大。

致谢:感谢国家重力台网中心(GNCC)为本研究提供重力资料。

参考文献

[1] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton[J]. Geology, 1992, 20(4): 339-342

[2] Xu X W, Ma X Y. Geodynamics of the Shanxi Rift System, China[J]. Tectonophysics, 1992,208(1-3): 325-340

[3] Steffen H, Gitlein O, Denker H, et al. Present Rate of Uplift in Fennoscandia from GRACE and Absolute Gravimetry[J]. Tectonophysics,2009,474(1): 69-77

[4] Sun W K,Wang Q, Li H,et al. Gravity and GPS Measurements Reveal Mass Loss beneath the Tibetan: Geodetic Evidence of Increasing Crustal Thickness[J]. Geophysical Research Letters, 2009,36(2)

[5] Battaglia M, Segall P, Roberts C. The Mechanics of Unrest at Long Valley Caldera, California: 2. Constraining the Nature of the Source Using Geodetic and Micro-Gravity Data[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003,127(3): 219-245

[6] Zhu Y Q, Zhan F B, Zhou J C, et al. Gravity Measurements and Their Variations before the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010,100(5B): 2 815-2 824

[7] 申重阳, 李辉, 孙少安, 等. 重力场动态变化与汶川M_S8.0地震孕育过程[J]. 地球物理学报, 2009,52(10): 2 547-2 557(Shen Chongyang, Li Hui, Sun Shaoan, et al. Dynamic Variations of Gravity and Preparation Process of the Wenchuan M_S8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(10): 2 547-2 557)

[8] Xuan S B, Shen C Y, Li H, et al. Characteristics of Subsurface Density Variations before the 4.20 Lushan M_S7.0 Earthquake in the Longmenshan Area: Inversion Results[J]. Earthquake Science, 2015,28(1): 49-57

[9] 李辉, 徐如刚, 申重阳, 等. 大华北地震动态重力监测网分形特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010,30(5): 15-18(Li Hui, Xu Rugang, Shen Chongyang, et al. Fractal Characteristics of Seismological Dynamic Gravity Network in Northern China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,30(5):15-18)

[10] Shen C Y, Xuan S B, Zou Z B, et al. Trends in Gravity Changes from 2009 to 2013 Derived from Ground-Based Gravimetry and GRACE Data in North China[J]. Geodesy and Geodynamics, 2016, 6(6): 423-428

[11] Last B J, Kubik K. Compact Gravity Inversion[J]. Geophysics, 1983,48(6): 713-721

[12] Barbosa V C F, Silva J B C. Generalized Compact Gravity Inversion[J]. Geophysics, 1994. 59(1): 57-68

[13] Zhang Y Q, Mercier J L, Vergély P. Extension in the Graben Systems around the Ordos (China), and Its Contribution to the Extrusion Tectonics of South China with Respect to Gobi-Mongolia[J]. Tectonophysics, 1998,285 (1-2): 41-75

[14] Liu M, Yang Y Q,ShenZ K, et al. Active Tectonics and Intracontinental Earthquakes in China: The Kinematics and Geodynamics[J]. Geological Society of America Special Papers, 2007,425: 299-318

[15] Xu P F, Zhao D P. Upper-Mantle Velocity Structure beneath the North China Craton- Implications for Lithospheric Thinning[J]. Geophysical Journal International, 2009,177 (3):1 279-1 283

(下转第1135页)