

大气负荷对区域地壳形变和重力变化的影响分析

王 伟¹ 章传银¹ 杨 强¹ 邹正波² 朱锦杰³ 康胜军⁴

1 中国测绘科学研究院,北京,100830
2 中国地震局地震研究所,湖北 武汉,430071
3 山东省地矿工程勘察院,山东 济南,250014
4 国家测绘地理信息局第一大地测量队,陕西 西安,710054

摘 要:在高精度大地测量观测数据处理和相关地球物理解释中,大气负荷由于影响较大,需要考虑。利用全球大气模型和区域气象站气压数据,采用移去恢复方法和球谐分析方法,计算了三峡地区大气负荷对地壳形变和重力变化的影响。提供了一种利用局部气压数据改善该区域大气负荷影响变化计算效果的合理算法,提高局部气压数据和全球模型数据利用的合理性和准确性。研究发现,大气负荷对垂直形变的影响在空间分布上中长波占优,在三峡地区的年变化幅度大于 20 mm,对地面重力变化影响的年变化幅度一般不超过 10 μGal ,对水平形变影响较小。

关键词:大气负荷;移去恢复;地壳形变;重力变化;球谐系数

中图分类号:P312.1;P223.7 **文献标志码:**A

大气潮汐是由日月引力及太阳热力作用引起的大气压周期性的涨落现象^[1]。大气潮汐引起地球重力场变化,并按照负荷理论作用于固体地球,引起地壳形变和地面重力变化^[2-4]。由大气压变化引起的地壳垂直形变可达 $\pm 2.5\text{ cm}$,地面重力变化可达 $\pm 10\text{ }\mu\text{Gal}$ ^[5-6]。在高精度大地测量观测数据处理和相关地球物理解释中必须考虑大气负荷影响。大气负荷影响的变化可用于区域环境负荷影响中的长期变化分析和地下水储量变化分析等方面。

大气负荷影响主要采用负荷格林函数积分、大气导纳方法等进行计算,采用的数据有全球大气模型数据或区域气象站观测气压数据。针对全球和区域的大气负荷影响,学者们开展了一系列研究^[7-10]。文献[11]利用全球气压资料计算了大气负荷对重力、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等观测数据的影响。文献[12]利用国际大气模型构建大气重力格林函数,在台站周围区域进行积分,计算了大气变化对重力场观测的影响。文献[6]采用积分分区方法计算了大气负荷影响,指出重力观测中约 90%的

气压变化贡献来自于 50 km 的近区域,而负荷形变对重力场的贡献主要来自于台站远区^[6]。在大气负荷影响变化中,受全球大气模型精度的影响,单独使用模型数据计算区域影响的精度一般较低;而直接采用负荷格林函数积分计算大气负荷影响时是全球积分,单独采用局部气象站观测数据不够合理。如何利用局部气象站观测数据优势提高区域大气负荷影响变化计算精度,是一个值得关注的问题。

在局部重力场数据处理和大地水准面精化中,移去恢复方法应用广泛,取得了很好的效果^[13-14]。本文采用局部实测大气压数据和全球大气模型,在对全球大气模型数据进行球谐分析的基础上,引入移去恢复法,计算了大气负荷对三峡地区地壳形变和重力变化的影响,并分析了大气负荷影响的变化特征。

1 负荷形变理论与移去恢复法

1.1 负荷形变理论

地球表层负荷可用等效水高表示,将地面点

处的等效水高变化 $\Delta h_w(\varphi, \lambda)$ 用规格化负荷球谐系数的展开式表示为^[1]:

$$\Delta h_w(\varphi, \lambda) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n [\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda] \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (1)$$

式中, R 为地球平均半径; N 为最大阶数; (φ, λ) 为地面点的地心纬度和经度; $(\Delta C_{nm}, \Delta S_{nm})$ 为 n 阶 m 次规格化负荷球谐系数; $\bar{P}_{nm}(\cdot)$ 为 n 阶 m 次规格化勒让德函数。

地球表层负荷变化引起的地球外部任意点的总重力位变化为:

$$\Delta\Phi = \frac{3GM\rho_w}{R\rho_e} \sum_{n=2}^N \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \frac{1+k'_n}{2n+1} \cdot$$

$$\sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$$

式中, $\Delta\Phi$ 表示总重力位变化; G 为万有引力常数; M 为地球质量; $\rho_w \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为水的密度; $\rho_e \approx 5.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为固体地球平均密度; k'_n 为 n 阶位负荷勒夫数。

等效水高变化引起的地面站点位置或地面重力场参数变化 $\Delta\theta(\varphi, \lambda)$ 还可采用负荷格林函数积分方法表示为通用形式^[1]:

$$\Delta\theta(\varphi, \lambda) = G\rho_w \iint_S \frac{\Delta h_w(\varphi', \lambda')}{L} G(\psi) dS \quad (2)$$

式中, (φ', λ') 为地面积分流动点; S 为地球表面; L 为流动点到计算点的空间距离; ψ 为球面角距; $G(\psi)$ 为通用的负荷格林函数。

1.2 全球大气模型移去恢复

根据参考重力场移去恢复技术, 将移去恢复法应用到大气负荷影响的计算中。采用移去恢复方法能够充分利用局部气压数据优势, 减小单独采用该数据格林函数积分计算时的截断误差影响, 有效利用全球气压模型数据。借助全球大气模型数据, 利用局部地区大气压测量数据来精化该地区的大气负荷影响时, 需要将式(2)进行变化。将式(2)的积分域 S 分成近区 S_0 和远区 $S-S_0$ 两个部分, 则近区被积等效水高参数的积分形式可表示为:

$$\Delta\theta(\varphi, \lambda) |_{S_0} = G\rho_w \iint_S \frac{\Delta h_{wM}(\varphi', \lambda')}{L} G(\psi) dS + \iint_{S_0} [\Delta h_w(\varphi', \lambda') - \Delta h_{wM}(\varphi', \lambda')] G(\psi_0) dS + \epsilon_M \quad (3)$$

其中, $\Delta h_{wM}(\varphi', \lambda')$ 为模型数据对应的等效水高。对应的简化形式为:

$$\Delta\theta(\varphi, \lambda) |_{S_0} = \Delta\theta_M(\varphi, \lambda) |_{S_0} +$$

$$\iint_{S_0} dh_w(\varphi', \lambda') G(\psi_0) dS + \epsilon_M \quad (4)$$

式中, $dh_w(\varphi', \lambda') = \Delta h_w(\varphi', \lambda') - \Delta h_{wM}(\varphi', \lambda')$, 为观测值与模型值之差, 称为残差等效水高。

利用移去恢复法计算大气负荷对地壳形变和重力变化影响的流程为:

1) 根据负荷理论, 将全球大气压月值数据转换为等效水高, 扣除平均值, 形成各月等效水高变化。根据球谐分析方法, 将等效水高变化转换为等效水高球谐系数。

2) 利用等效水高球谐系数计算气象站点处的等效水高模型值。将气象站点气压转换成等效水高, 移去模型值, 得到残差等效水高。将残差等效水高格网化, 基于格林函数积分方法计算残差等效水高对地壳垂直形变和重力变化的影响。

3) 将残差等效水高对垂直形变或重力变化的影响加上全球大气模型相应影响的计算值, 得到大气负荷的间接影响。

4) 大气负荷对重力变化的影响还应包含负荷的直接影响, 即大气负荷对重力变化的影响为间接影响与直接影响之和。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域

本文的研究区域选择东经 $104^\circ \sim 114^\circ$ 、北纬 $26^\circ \sim 33^\circ$ 范围内的三峡地区, 如图 1 所示。

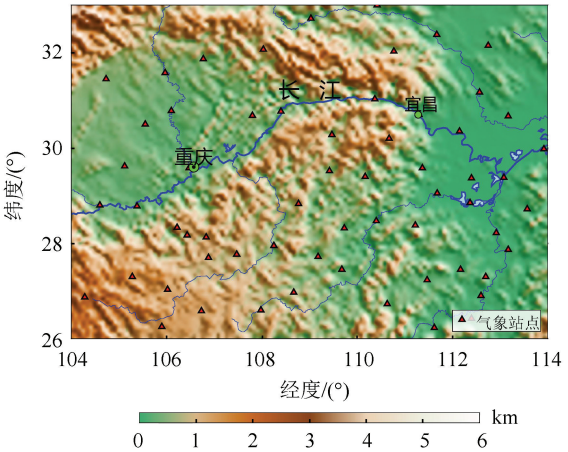


图 1 研究区域和气象站点分布图

Fig.1 Location of Weather Stations and Study Area

2.2 数据与预处理

1) 全球大气模型数据。全球大气模型数据采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的全球大气重分析产品, 为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 全球格网

的月平均气压值,由每日数值进行月平均得到^[8]。

根据负荷理论,按照 1 hpa 大气压等于 10.2 mm 等效水高的换算关系,将全球大气数据转换为相应的等效水高。为了减少计算量,扣除一个平均值,形成各月剩余等效水高。

由于全球大气等效水高的分辨率为 30′,将剩余等效水高直接内插到气象站点处有较大的误差,而且存在全球尺度和区域尺度的不对应。基于球谐分析方法^[15-16],利用式(1)将剩余等效水高转换为等效水高球谐系数,再利用等效水高球谐系数计算气象站点处的等效水高,以便进行“移去”。

2)区域地面气象站气压数据。区域地面气压数据来自中国气象数据网提供的中国地面气候资料日值数据集,共 77 个气象站的气压数据。将气象站点的气压转换成等效水高,移去由全球大气等效水高球谐系数计算的等效水高,即移去模型等效水高,得到残差等效水高,并采用 Kriging 方法进行格网化^[17]。

3 地壳形变和重力变化计算与分析

3.1 地壳形变

利用负荷理论计算残差等效水高对地壳形变的影响,加上全球大气模型数据计算的形变影响,即恢复全球大气对地壳形变的影响,得到大气负荷总影响。为了获得历元一致的变化量,选择 2010 年 11 月作为参考历元,2010 年 10—12 月 3 个月的平均值作为参考历元值,本文涉及到的变化都是相对于这个参考历元。负荷总影响减去相应的参考历元值,获得最终大气负荷对地壳形变的影响。本文计算了 2011-01—2015-06 空间分辨率为 2′×2′的每月大气负荷影响。

图 2 和图 3 是 2014 年 3 月、6 月、9 月和 12 月大气负荷对地壳垂直形变和水平形变的影响。大气负荷地壳对垂直形变的影响在空间分布上中长波占优,对水平形变的影响较小。

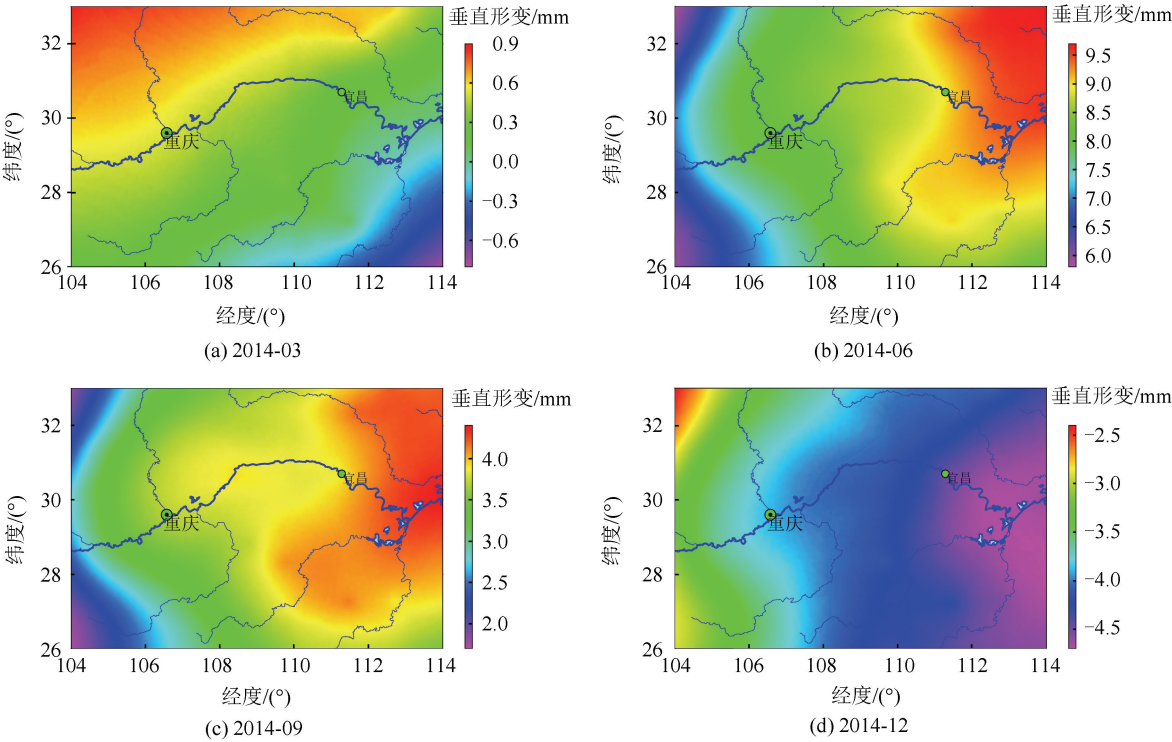


图 2 大气负荷对垂直形变的影响
Fig.2 Vertical Deformation Caused by Atmospheric Pressure Loading

本文选择了研究区域内贵州凤岗(GZFG)、湖北秭归(HBZG)、四川遂宁(SCSN)和湖北襄樊(HBXF)共 4 个具有代表性的卫星导航定位基准站(continuously operating reference station, CORS)处大气负荷对垂直形变的影响,如图 4 实线所示,该影响由每月区域负荷影响采用距离平方反比法内插获得。从图 4 中实线可以发现,大

气负荷影响具有明显的中长波特征,相关性强。图 4 中虚线为增加局部实测气压值后与单独采用全球大气模型计算的垂直形变的差值。从图 4 中虚线可以发现,在月这个分辨率时间尺度上,增加局部实测气压值对大地负荷垂直形变的计算结果影响较小,因此,本文的作用更多的是体现一种更合理的算法,为区域更高分辨率的大气负荷影响

计算提供理论和算法基础,为相关研究提供参考。

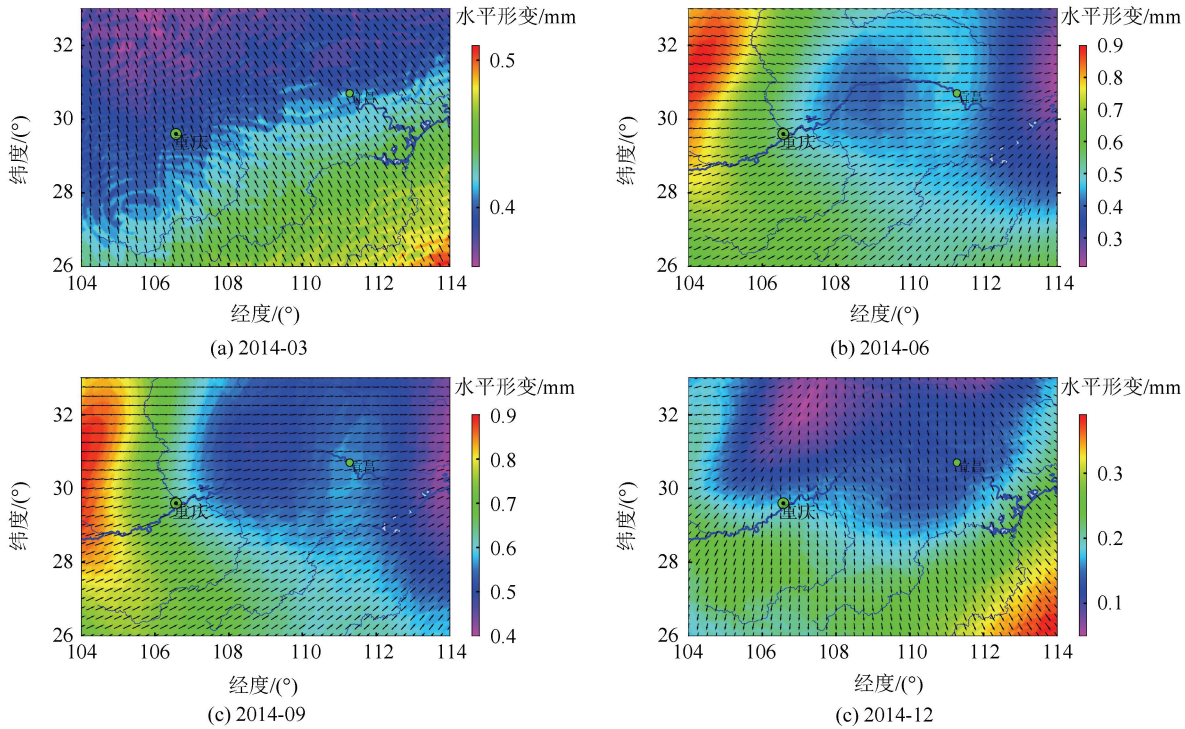


图 3 大气负荷对水平形变的影响
Fig.3 Horizontal Deformation Caused by Atmospheric Pressure Loading

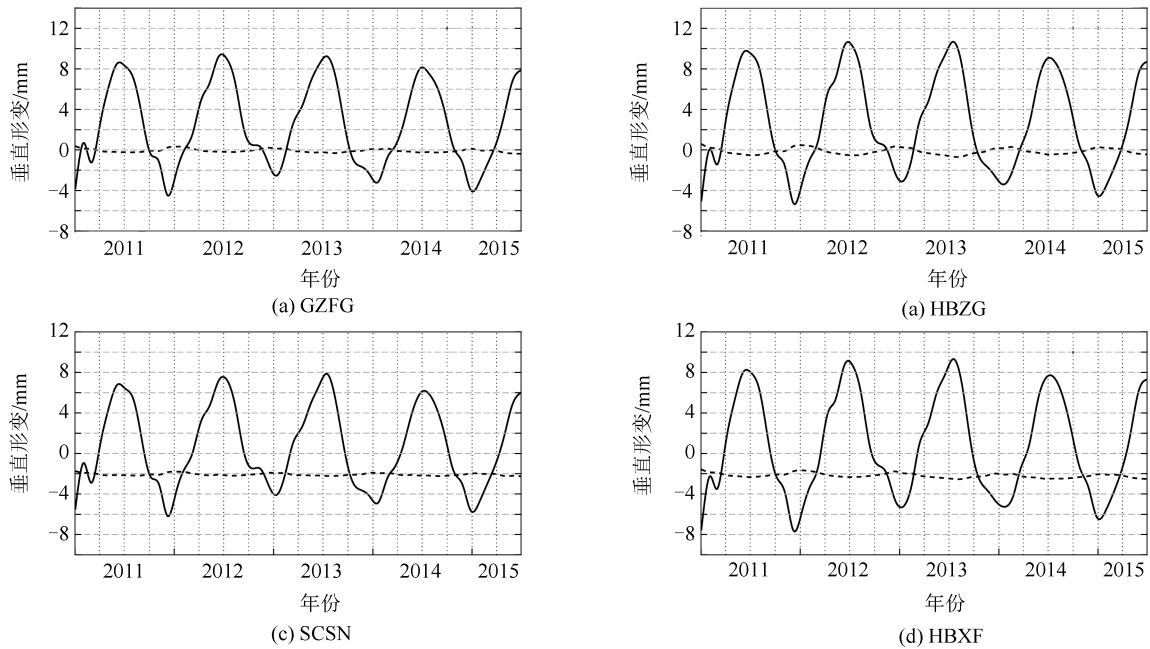


图 4 CORS 站处大气负荷对垂直形变的影响
Fig.4 Vertical Deformation Caused by Atmospheric Pressure Loading on CORS Sites

3.2 重力变化

大气负荷对地面重力变化的影响包括间接影响和直接影响两部分。采用类似计算大气负荷对地壳形变影响的方法,采用移去恢复法计算的是对地面重力变化的间接影响。

大气负荷的直接影响采用大气导纳方法进行计算。首先,由扣除参考历元值的站点大气压数据拟合区域大气压数据;然后,乘以三峡地区重力大气导纳系数平均值 $-0.3^{[18]}$,得到区域大气直接影响。

将间接影响和直接影响相加,获得大气负荷变化对地面重力的总影响,如图 5 所示。研究发现,地面重力的大气负荷影响与地壳垂直形变方向相反,随着大气压增大,地面重力减小。

3.3 统计分析

为了分析大气负荷对区域大地测量要素的影响,对大气负荷月平均影响进行了统计,如表 1 所

示。长周期占优的信号,由于不宜用标准差表示其统计性质,本文采用年变化幅度来表示年周期占优信号的典型特征。年变化幅度是区域内点下半年与对应点上半年差值的最大值。例如,某地面站点大地高年变化幅度为 3 cm,即该站点上半年的大地高和下半年大地高有可能相差 3 cm。

大气负荷对垂直形变的影响最大超过 10

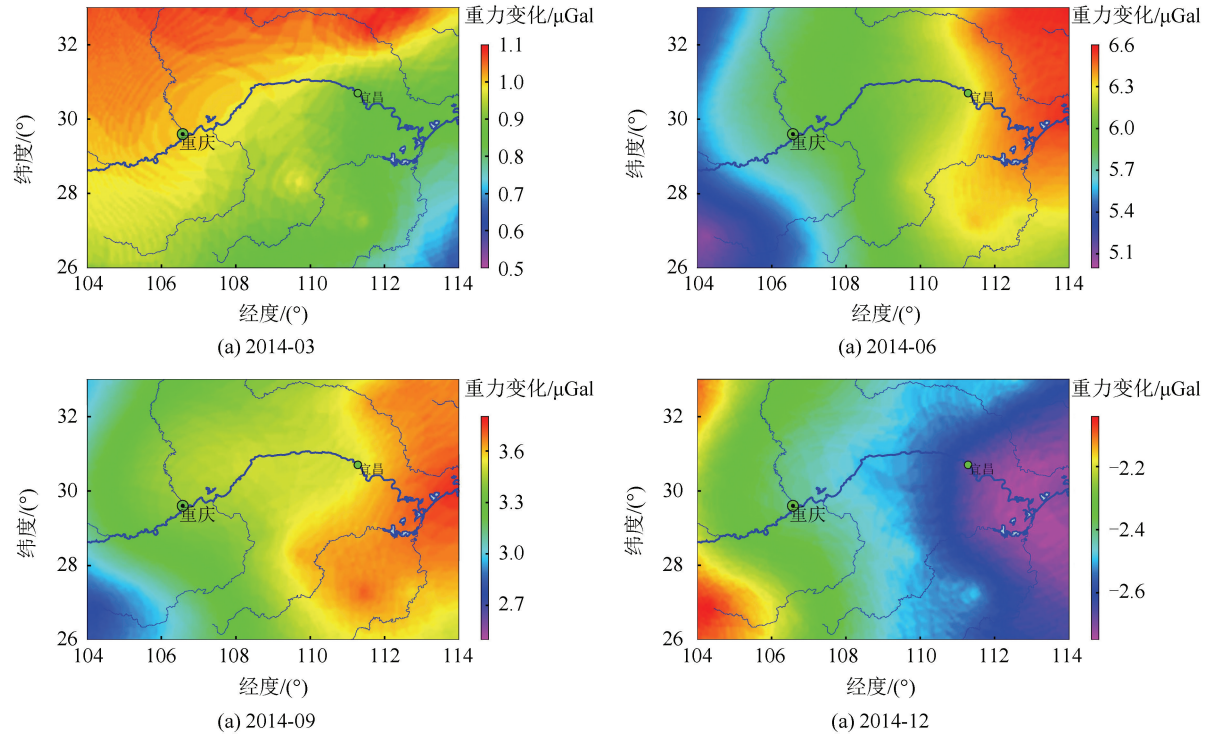


图 5 大气负荷对地面重力变化的影响

Fig.5 Gravity Change Cause by Atmospheric Pressure Loading

表 1 地壳及重力场形变的大气负荷影响统计

Tab.1 Statistics of Crust Deformation and Gravity Field Change Caused by Atmospheric Pressure Loading									
大地测量要素	2011-01—2014-12				2015-01—2015-06				年变化
非潮汐变化	最大	最小	均值	标准差	最大	最小	均值	标准差	幅度
垂直形变/mm	11.41	−5.98	2.59	4.37	9.55	−4.32	2.37	4.28	21.0
大地水准面/mm	4.52	−11.48	−2.81	4.45	2.40	−9.40	−1.86	3.71	18.3
地面重力/μGal	7.70	−3.56	2.14	2.95	6.66	−1.80	2.13	2.68	10.9
水平形变/mm	1.32	0.00	0.44	0.24	1.00	0.04	0.34	0.51	1.9
垂线偏差/ms	5.01	0.00	0.84	0.63	4.16	0.00	0.80	0.24	4.3

注:水平形变、垂线偏差只对其模进行统计。

mm,年变化幅度大于 20 mm,对水平形变的影响最大不到 1.5 mm。大气负荷对地面重力变化影响的年变化幅度一般不大于 10 μGal。

4 结 语

本文利用全球大气模型数据和区域气象站大气压数据,采用移去恢复方法和球谐分析方法,基

于负荷理论,以三峡地区为例,计算了大气负荷对区域地壳形变和重力变化的影响。以月为分辨率时间尺度进行研究发现,大气负荷对垂直形变影响在空间分布上中长波占优,在三峡地区的年变化幅度大于 20 mm,对地面重力影响的年变化幅度一般不超过 10 μGal,对水平形变影响较小。本文的研究成果可为 GNSS 和重力等数据处理中大气影响分离、数据分析解释等提供参考。

参 考 文 献

- [1] Wang Wei, Dang Yamin, Zhang Chuanyin, et al. Monitoring of Crustal Deformation and Gravity Variation from Terrestrial Water Loading in the Three Gorges Region by the CORS Network [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(3): 962-971(王伟, 党亚民, 章传银, 等. 基于 CORS 站网监测三峡地区陆地水负荷对地壳形变和重力变化的影响[J]. 地球物理学报, 2017, 60(3):962-971)
- [2] Farrell W. Deformation of the Earth by Surface Loads [J]. *Rev Reviews of Geophysics & Space Physics*, 1972, 10(3): 761-797
- [3] Boy J P, Gegout P, Hinderer J. Reduction of Surface Gravity Data from Global Atmospheric Pressure Loading [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 149:534-545
- [4] Petrov L, Boy J P. Study of the Atmospheric Pressure Loading Signal in Very Long Baseline Interferometry Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(3):287-294
- [5] Rabbel W, Zschau J. Deformations and Gravity Changes at the Earth's Surface Due to Atmospheric Loading [J]. *Journal of Geophysics*, 1985, 56(2): 81-89
- [6] Luo Shaocong, Sun Heping, Xu Jianqiao. Theoretical Computation in the Precision Estimation of the Change in Gravity and Displacements Due to Atmospheric Loading [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4):309-315(罗少聪, 孙和平, 徐建桥. 大气负荷引起的重力与位移变化理论计算的精度估计[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 309-315)
- [7] Dong D, Gross R S, Dickey J O. Seasonal Variations of the Earth's Gravitational Field: An Analysis of Atmospheric Pressure, Ocean Tidal, and Surface Water Excitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(7):725-728
- [8] Ray R D, Ponte R M. Barometric Tides from ECMWF Operational Analyses [J]. *Ann Geophys*, 2003, 21(8):1 897-1 910
- [9] Li Yingbing, Huang Yong, Guo Junyi, et al. Green's Function of Atmospheric Gravity Loading [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(4):435-439(李英冰, 黄勇, 郭俊义, 等. 大气引力负荷格林函数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(4):435-439)
- [10] Dach R, Böhm J, Lutz S, et al. Evaluation of the Impact of Atmospheric Pressure Loading Modeling on GNSS Data Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(2):75-91
- [11] van Dam T M, Blewitt G, Heflin M B. Atmospheric Pressure Loading Effects on Global Positioning System Coordinate Determinations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(12):23 939-23 950
- [12] Sun Heping, Luo Shaocong. Theoretical Computation and Detection of the Atmospheric Gravity Signals [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(5): 634-641(孙和平, 罗少聪. 大气重力信号的理论计算及其检测[J]. 地球物理学报, 1998, 41(5):634-641)
- [13] Pail R, Reguzzoni M, Sansó F, et al. On the Combination of Global and Local Data in Collocation Theory [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2010, 54(2):195-218
- [14] Wan Xiaoyun, Yu Jinhai. Accuracy Analysis of the Remove-Restore Process in Inverse Stokes Formula [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1):77-80(万晓云, 于锦海. 移去恢复法在逆 Stokes 公式计算中的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(1):77-80)
- [15] Fukushima T. Numerical Computation of Spherical Harmonics of Arbitrary Degree and Order by Extending Exponent of Floating Point Numbers [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(4):271-285
- [16] Gruber C, Abrykosov O. High Resolution Spherical and Ellipsoidal Harmonic Expansions by Fast Fourier Transform [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 58(4):595-608
- [17] Sun Heping, Luo Shaocong. Preprocessing of the Surface Meteorological Data in China and Its Neighbor Area and Analysis of the Gridding Numerical Results [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1998, 18(3):51-56(孙和平, 罗少聪. 中国及其邻区地表气象数据预处理和网格化数值结果分析[J]. 地壳形变与地震, 1998, 18(3):51-56)
- [18] Luo Shaocong. Study on the Loading Effects on the Atmospheric Pressure [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2003(罗少聪. 大气负荷效用问题研究 [D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2003)

Impact of Atmospheric Pressure Loading on Regional
Crustal Deformation and Gravity Change

WANG Wei¹ ZHANG Chuanyin¹ YANG Qiang¹ ZOU Zhengbo² ZHU Jinjie³ KANG Shengjun⁴

1 Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China

2 Institute of Earthquake, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

3 Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan 250014, China

4 The First Geodetic Brigade, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China

Abstract: Atmospheric pressure loading needs to be considered due to the great impact on the processing of high precision geodetic observations data and related geophysical interpretation. In this study, we use the global atmospheric model and regional atmospheric pressure data on weather stations, and calculate the impact of atmospheric pressure loading on crustal deformation and gravity change in the Three Gorges region of China on the basis of the remove-restore method and spherical harmonic analysis method. The proposed method can effectively solve global-scale model data being applied to the region, to improve the utilization of local data and global pressure model. This study finds that the impact of atmospheric pressure loading on the vertical deformation in the spatial distribution is mainly on the long wave. The amplitude of annual variation is greater than 20 mm in the Three Gorges region. The magnitude of gravity change on the ground is generally not more than 10 μ Gal. However, the impact on the horizontal deformation is very little. The results of this study have important reference value for separating the atmospheric effects in the processing of GNSS data and gravity data, and for analyzing.

Key words: atmospheric pressure loading; remove-restore; crustal deformation; gravity change; spherical harmonic coefficient

First author: WANG Wei, PhD, associate professor, specializes in physical geodesy. E-mail: wangwei@casm.ac.cn

Corresponding author: ZHANG Chuanyin, PhD, professor. E-mail: zhangchy@casm.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374081, 41674024; the National Key R & D Program of China, No. 2016YFB0501702.