

DOI: 10.13203/j.whugis20130367

文章编号: 1671-8860(2015)04-0540-07

基于地表负载一阶变化反演季节性地球形变

于 男^{1,2} 程鹏飞³ 成英燕²

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079

2 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

3 国家测绘产品质量检验测试中心, 北京, 100830

摘要: 基于 SNREI 地球模型, 利用 IGS 数据反演得到近 10 a 的地表负载力矩变化, 探索了季节性地球形变机制, 发现地表负载力矩在 m_x 、 m_y 、 m_z 三个方向均有明显的周年项变化, 进而指明固体地球也存在明显的季节性形变。 m_z 方向的相位表明, 每年的 2、3 月份北半球地表负载最大, 而 8、9 月份南半球地表负载最大; 每年的 12 月份地表负载力矩出现在中国境内, 将会导致中国范围的测站在水平和垂直方向分别产生 1 mm 和 2 mm 左右的位移, 这个位移量级对我国 mm 级 CGCS2000 框架所造成的影响是不容忽视的。

关键词: 负载力矩; SNREI 地球; 负载勒夫数; 功率谱分析; 回归分析

中图法分类号:P223

文献标志码:A

在漫长的时间里, 地球表面液体层的质量是守恒的, 其在地表的再分布周期从 1 d~1 a 不等, 与地球的自转(来自太阳的热量驱使大气)和公转(每年的全球水循环)相关^[1]。对于一个弹性地球来说, 地表液体层的质量再分布势必会引起固体地球的形变^[2]。从全球范围来看, 如果地表液体层由于季节性循环主要集中在北半球, 导致北半球的负载增加, 则北半球被挤压, 南半球扩张, 反之亦然, 这就是季节性地球形变的原因。

目前, 对于弹性地球形变的研究, 传统上习惯使用 Farrell 的表面负荷理论即负载勒夫数理论。该理论广泛应用于大气层和水体等负载模型的理论建模中。1972 年, Farrell 首次对弹性地球进行建模, 阐述了地球的形变响应是由地表负载所引起的引力位变化的球谐分量的函数^[3]。随着地球模型研究的不断深入和完善, SNREI 模型逐渐成为人们普遍接受的“标准地球模型”。在这个模型下, 地球是对称、非旋转、完全弹性和各向同性的, 当其表面负载发生变化的时候, 固体地球会产生静态形变^[4-5]。Blewitt 首次利用地表引力位一阶球谐分量的变化和负载勒夫数理论, 通过 GPS 数据反演得到了季节性的地球形变^[6]。孙付平等利用 GPS 和 VLBI 组合的站坐标、站速度, 采用 Delaunay 算法生成的三角形来逼近地形表面, 研究了地球的表面积、体积及它们的变化趋势。结

果表明, 目前地球半径每年大约缩短 3~4 mm, 地球整体上处于压缩变形中^[7-8]。申文斌等基于 ITRF2000 框架的 671 个台站, 利用同样的方法研究得到地球目前正处于南胀北缩的状态中, 但地球整体处于膨胀状态^[9]。此外, 夏一飞等研究了日月引潮力以及变化着的地球自转惯性离心力的作用下所产生的地球周期性弹性形变^[10]; 徐建桥等研究了地球固体部分对液核动力学效应引发的核幔边界和内核边界上压力和引力扰动的形变响应^[11]。

1 弹性地球形变与地球参考框架原点

国际地球参考框架的原点定义在整个地球系统的质量中心(CM), 由于地球整体在惯性空间下不受外力作用, 所以 CM 的位置并不会因为地球表面的质量再分布而产生变化, 变化的是固体地球质量中心(CE)。虽然参考框架的原点定义在 CM, 但实际上却是通过与 CE 相差只有 2% 的固体地球外表面的几何中心(CF)来实现的^[1-2]。地表质量再分布, CF 框架点是由地球表面覆盖的统一的、无限多的点构成的, 这些点的运动也需要考虑。实际上可以通过在全球建立合适密度的观测站来实现, 使用 GPS 易于实现。

收稿日期: 2014-10-15

项目来源: 国家 863 计划资助项目(2013AA122501); 国家自然科学基金资助项目(41374014)。

第一作者: 于男, 博士生, 主要从事 GNSS 数据处理及动态地心参考框架方面的研究。E-mail: yunanya11@163.com

地表液体层质量再分布的过程会通过两种方式影响到大地测量网络: 1) 伴随地表质量再平衡的过程所产生的 CE 相对于 CM 的位移, 即地心运动, 其对 ms 级地球参考框架所造成的影响是不容忽视的^[12]; 2) 地表跟踪站本身伴随着固体地球形变而产生的位移^[1,12]。基于此, 如果能够得到地表跟踪站的精确位置变化, 应用相应的弹性地球负载模型, 就可以探索固体地球的弹性形变机制。目前的研究表明, 地表负载的一阶变化项与地表负载的质量中心和地心直接相关, 而高阶项与负载的质量中心之间的关系尚不明确, 所以本文只讨论一阶负载下的地球弹性形变。

2 负载力矩理论及其与弹性地球形变的关系

2.1 负载力矩的基本理论

由于整个地球系统在惯性空间下的运动是不受外力的, 即满足动量守恒的条件, 因此伴随地表质量再分布的过程有:

$$(M_E + M_L)\Delta r_{CE} + M_L\Delta r_L^- = 0$$

式中, Δr_L^- 是地表液体层的质量中心在 CE 框架下的位置变化; M_L 为地表液体层的质量; M_E 为固体地球的质量; 则 CE 相对于 CM 的变化为:

$$\Delta r_{CE} = -M_L\Delta r_L^-/(M_E + M_L) \quad (1)$$

负载力矩矢量被定义为:

$$\mathbf{m} = M_L\Delta r_L^-$$

应用“负载力矩”理论可以更加方便地研究地表负载变化驱使固体地球形变的机制。

2.2 负载力矩理论反演弹性地球形变的方法

由于地表质量再分布所引起的 CE 相对于 CM 的位置变化会导致地球表面引力位发生变化, 其一阶分量的球谐函数可以表示为:

$$\mathbf{V}_1(\Omega) = -g\hat{\mathbf{h}}(\Omega) \cdot \Delta r_{CE} = g\hat{\mathbf{h}}(\Omega) \cdot \mathbf{m}/M_E \quad (2)$$

式中, Ω 为地理位置(纬度 φ , 经度 λ); $\hat{\mathbf{h}}(\Omega)$ 是径向单位向量; g 为地表重力加速度。式(2)是一个纯粹的球谐函数, 可以直接应用负载勒夫数理论。根据负载勒夫数理论, CE 框架下地球表面位移 $\Delta S_h(\Omega)$ (径向), $\Delta S_l(\Omega)$ (切向)可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta S_h(\Omega) = [h'_1]_{CE} V_1/g = h'_1 \hat{\mathbf{h}}(\Omega) \cdot \mathbf{m}/M_E \\ \Delta S_l(\Omega) = [l'_1]_{CE} \hat{\mathbf{l}} \cdot \nabla V_1/g = l'_1 \hat{\mathbf{l}}(\Omega) \cdot \mathbf{m}/M_E \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{l}}(\Omega)$ 是切向单位向量; 地表梯度算子 $\nabla = \hat{\varphi}\partial\varphi + \hat{\lambda}(1/\cos\varphi)\partial\lambda$; 此处使用 Farrell 的负载勒夫数模型^[4]:

$$[h'_1]_{CE} = -0.290 [l'_1]_{CE} = 0.113$$

理论上, CF 框架原点满足地球表面位移场的积分为 0 的条件, 这与沿着各个轴向的投影的无网络变换是一致的。CE 框架的最大不足之处在于它不可以被直接观测。而 CF 框架与 CE 框架特别近似, 相比之下, CF 框架更方便于实际观测^[13], CE 框架更适合于理论研究。若将 CF 框架与 CE 框架进行严格比较, 则需要一个从 CE 框架到 CF 框架的坐标转换。根据 Blewitt 的负载勒夫数转换理论, CF 框架下的负载勒夫数与 CE 框架下的负载勒夫数之间的关系为^[2]:

$$\begin{cases} [h'_1]_{CF} = \frac{2}{3}([h'_1]_{CE} - [l'_1]_{CE}) = -0.268 \\ [l'_1]_{CF} = -\frac{1}{3}([h'_1]_{CE} - [l'_1]_{CE}) = 0.134 \end{cases} \quad (4)$$

CF 框架下地表某处点位移(为了看起来更简洁, 这里省略了 Ω):

$$\begin{cases} [\Delta s_h]_{CF} = [h'_1]_{CF} \hat{\mathbf{h}} \cdot \mathbf{m}/M_E \\ [\Delta s_l]_{CF} = [l'_1]_{CF} \hat{\mathbf{l}} \cdot \mathbf{m}/M_E \end{cases} \quad (5)$$

因此, CF 框架下地表 GPS 测站的位移 $[\Delta s]_{CF} = (\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z)^T$ 可以表示为:

$$[\Delta s]_{CF} = \mathbf{G}^T \text{diag}[[l'_1]_{CF} [l'_1]_{CF} [h'_1]_{CF}] \mathbf{G} \frac{\mathbf{m}}{M_E} \quad (6)$$

式中, \mathbf{G} 是 3×3 维的将地心坐标转换为地面(东西、南北、垂直)坐标的雅可比矩阵:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix}$$

事实上, 由于框架点全球分布的不均匀性, 地球参考框架从本质上来说只是 CF 框架的一个近似, 实际上为 CN(the center of network) 框架, 即由地面网实现的参考框架。利用 GPS 数据得到的 $[\Delta s]_{CF}$ 是 CN 框架下测站的形变, 而式(6)直接采用的是 CF 框架下的负载勒夫数, 这个误差可以通过附加平移参数 t 来减弱或消除^[14]:

$$[\Delta s]_{OBS} = t + \mathbf{G}^T \text{diag}[[l'_1]_{CF} [l'_1]_{CF} [h'_1]_{CF}] \mathbf{G} \frac{\mathbf{m}}{M_E} \quad (7)$$

因此, 通过计算全球范围内的 GPS 跟踪站的位移 $[\Delta s]_{OBS}$, 就可以通过式(7)计算得到“地表负载力矩” \mathbf{m} , 进而探索固体地球形变规律; 相反, 如果地表负载变化能够被建模, 我们也可以通过式(7)计算得到由于弹性地球形变而造成的测站位移。

2.3 最小二乘法的设计矩阵

根据式(7),其未知参数矩阵为:

$$\boldsymbol{x} = (t_x \ t_y \ t_z \ m_x \ m_y \ m_z)^T$$

设计矩阵为:

$$\boldsymbol{A}_i =$$

$$\begin{cases} 1 \ 0 \ 0 : \\ 0 \ 1 \ 0 : \frac{1}{M_E} \cdot \boldsymbol{G}_i^T \text{diag}[[l'_1]_{\text{CF}} [l'_1]_{\text{CF}} [h'_1]_{\text{CF}}] \boldsymbol{G}_i \\ 0 \ 0 \ 1 : \end{cases}$$

3 负载力矩时间序列

国际GNSS服务(IGS)每星期为用户提供精确的IGS跟踪站坐标及变化率,这为利用IGS数据探索固体地球形变提供可能。截至目前,IGS

共有11个分析中心, GPS卫星跟踪网中共有856个跟踪站^[15]。利用这些可靠的数据源,可以精确解算地表负载力矩,进而研究固体地球形变机制。本文选择IGS05框架的132个框架点(图1),利用IGS重新处理得到的近10 a的igl周解数据^[16](共522周),反演得到了近10 a地球表面负载力矩变化的时间序列(图2)。图2中 m_x 、 m_y 、 m_z 的方向与WGS-84定义的XYZ三轴方向一致,igl解在数据处理时根据阈值剔除了质量不好的测站,较为完善地考虑了各种突变,同时,igl解准确合理地消除了由板块运动、冰后回弹等引起的测站位置的长期变化,剔除了仪器变动和同震位移等引起的测站位置突变。

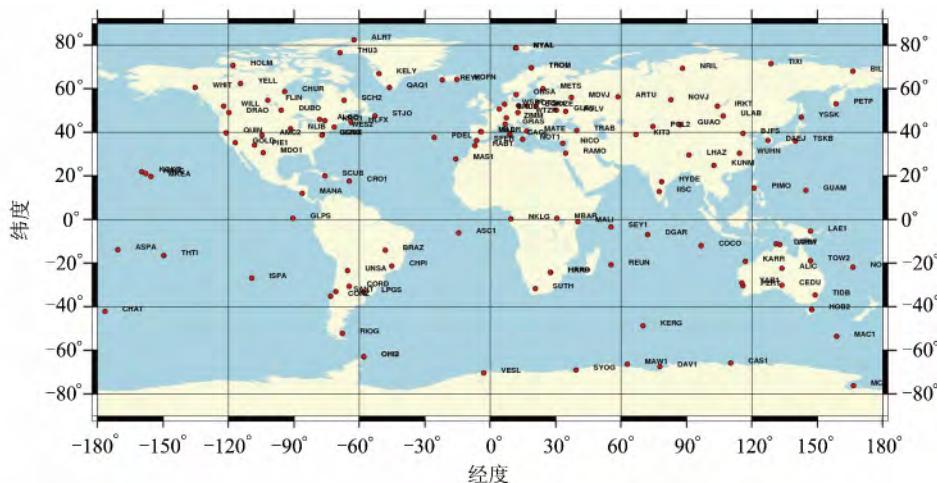


图1 IGS05框架的132个框架点

Fig. 1 132 Sites of the IGS05 Reference Frame

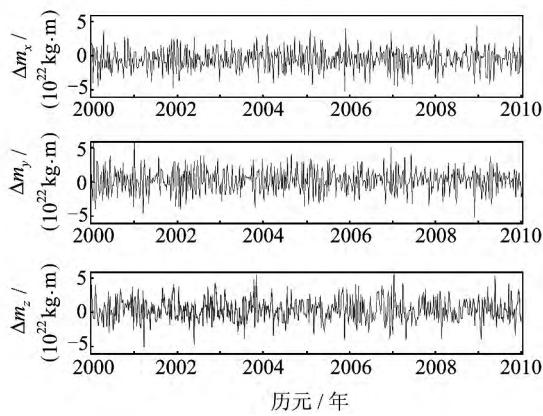


图2 近十年地表负载力矩变化

Fig. 2 The Variations of Load Moment in Recent Ten Years

4 实验结果分析

4.1 负载力矩时间序列的谱分析

为了计算负载力矩时间序列能量谱密度并确

定其主要周期,对 m_x 、 m_y 、 m_z 序列分别进行傅里叶变换,得到其功率谱(图3)。功率谱密度越大,说明该频率对负载力矩分量的贡献就越大,因此可由图3确定负载力矩各分量的主频率。

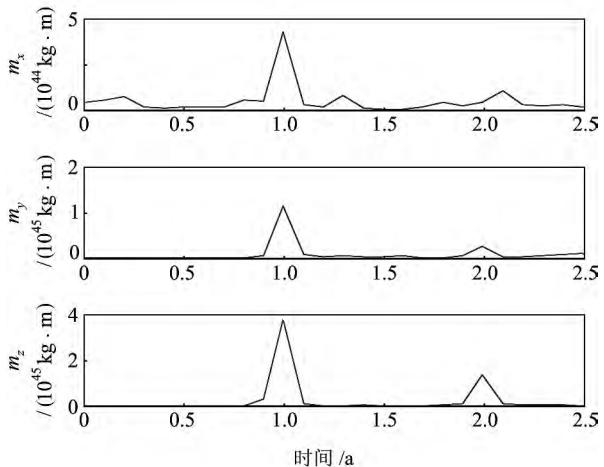


图3 地表负载力矩时间序列的功率谱分析

Fig. 3 The Power Spectrum Analysis of Load Moment Time Series

计算分析表明: 负载力矩各分量都有明显的年周期变化和相对较弱的长周期变化, m_x 方向有一个 1.3 a 和一个 2.1 a 的周期, m_y 和 m_z 均有一个 2 a 周期。由于反演的数据源采用的是周解, 相当于采样率为一周, 因此还不足以发现更短的周期。

4.2 负载力矩时间序列的回归分析

本文负载力矩时间序列 $m(t)$ 的回归模型定义为:

$$m(t) \approx a_0 + a'_0 \Delta t + a_1 \cos(\omega_1 \Delta t - \varphi_1) + a_2 \cos(\omega_2 \Delta t - \varphi_2) + \dots + a_n \cos(\omega_n \Delta t - \varphi_n) \quad (8)$$

式中, a_0 为偏差; a'_0 为变化趋势项; ω_n 为不同周期变化的角频率; a_n 和 φ_n 为相应周期变化的振幅和相位; $\Delta t = t_i - t_0$, 本文中 $t_0 = 2000.0$ 。

根据式(8), 计算得到三个方向负载力矩时间序列的周年项振幅和相位, 并将本文估计结果和 Blewitt 的实验结果分别列于表 1。

表 1 地表负载力矩的周年变化

Tab. 1 Annual Variations of Load Moment

负载力矩	m_x		m_y		m_z	
	振幅/ 10^{22} kg·m	相位/(°)	振幅/ 10^{22} kg·m	相位/(°)	振幅/ 10^{22} kg·m	相位/(°)
本文实验结果 (2000.0~2010.0)	3.0 ± 0.2	37 ± 3	0.6 ± 0.2	336 ± 2	3.7 ± 0.2	60 ± 2
Blewitt 实验结果 (1995.642~2001.046)	2.0 ± 0.2	86 ± 3	2.9 ± 0.2	345 ± 3	6.6 ± 0.1	56 ± 1

4.3 实验结果

根据负载力矩各方向的周年相位, 我们可以大致推断出负载力矩每年在地表的运动轨迹(图 4)。分析表 1 中 m_z 方向的相位可知, 北半球地表负载力矩的最大值出现在每年的 2、3 月份, 而南半球出现在 8、9 月份; 结合表 1 和图 4 可知, 地表负载力矩的最小值分别于 5 月和 11 月出现在古巴和印度尼西亚附近; 每年的 6~11 月地表负载力矩主要集中在南半球, 而 12~5 月主要集中在北半球, 其中 12 月份出现在中国境内, 这个时候地表负载力矩对中国范围的影响相对来说最为明显; 此外, 无论南北极点, 其地表负载力矩最大值均出现在各自的冬季, 中国也是如此。

为了更加深入研究地表负载力矩对中国范围内测站的影响, 选择 09 年 12 月的地表负载力矩

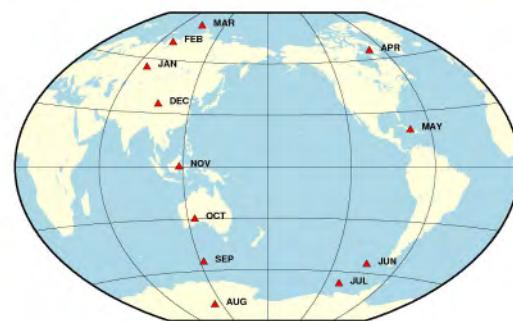


图 4 每年负载力矩在地球表面的运动轨迹

Fig. 4 Annual Trajectory of the Load Moment on the Earth Surface

时间序列, 利用式(7)反算中国境内 6 个 IGS 站(BJFS、SHAO、WUHN、LHAZ、URUM、KUNM)的位移, 结果列于表 2。

表 2 地表负载力矩所引起的中国范围内 IGS 站的位移/mm

Tab. 2 The Displacement of IGS Stations Within China Caused by Load Moment

位移	BJFS	SHAO	WUHN	LHAZ	URUM	KUNM
$\sqrt{\Delta B^2 + \Delta L^2}$	0.281 1	0.179 1	0.172 7	0.181 7	0.275 8	0.180 6
	0.354 1	0.193 1	0.179 5	0.181 4	0.336 2	0.188 3
	0.352 6	0.261 5	0.199 6	0.234 3	0.374 8	0.164 5
	0.400 7	0.236 6	0.193 3	0.201 3	0.395 6	0.205 0
ΔH	-0.469 5	-0.573 4	-0.605 6	-0.307 6	-0.521 8	-0.636 9
	-0.370 3	-0.511 5	-0.593 1	-0.390 9	-0.510 6	-0.614 4
	-0.381 6	-0.638 9	-0.621 8	-0.414 4	-0.493 1	-0.771 6
	-0.557 2	-0.372 7	-0.661 4	-0.324 8	-0.420 8	-0.403 0

注: 因为本文负载力矩时间序列是由周解反演得到的, 故由负载力矩反算得到的测站位移均有 4 部分, 其位移即为整月 IGS 站的位移。

由表 2 可知, 由于地表负载力矩的作用, 中国范围内的 IGS 站在 12 月份会下降 2 mm 左右, 同

时伴有 1 mm 左右的水平位移。

4.4 分析与讨论

与 Blewitt 实验结果相比,本文估计的 m_x 方向相位比 Blewitt 的结果要小,振幅与 Blewitt 的结果基本一致; m_y 和 m_z 方向相位与 Blewitt 的结果符合较好,振幅均比 Blewitt 的结果小得多。

分析认为,造成与 Blewitt 结果振幅相差较大的原因是 Blewitt 反演的数据源时间跨度为 1995.642~2001.046,要早于本文数据源 2000.0~2010.0,且时间跨度较短;本文所选用的测站坐标统一归算到 ITRF05 框架,其数据处理所采用

模型的精度及接收机质量较 Blewitt 所使用的 ITRF97 框架的站点均有显著提高;此外,Blewitt 选取的站点是 3 个 IGS 分析中心的 66 个 GPS 跟踪站(图 5),而本文选取的站点是 IGS05 框架的 132 个框架点(图 1),测站分布更广,更均匀,尤其在海洋上也有一定的观测资料,较之 Blewitt 的数据源更加稳定可靠。最后,Blewitt 的模型中没有加入平移参数来削弱 CN 框架和 CF 框架之间的误差。

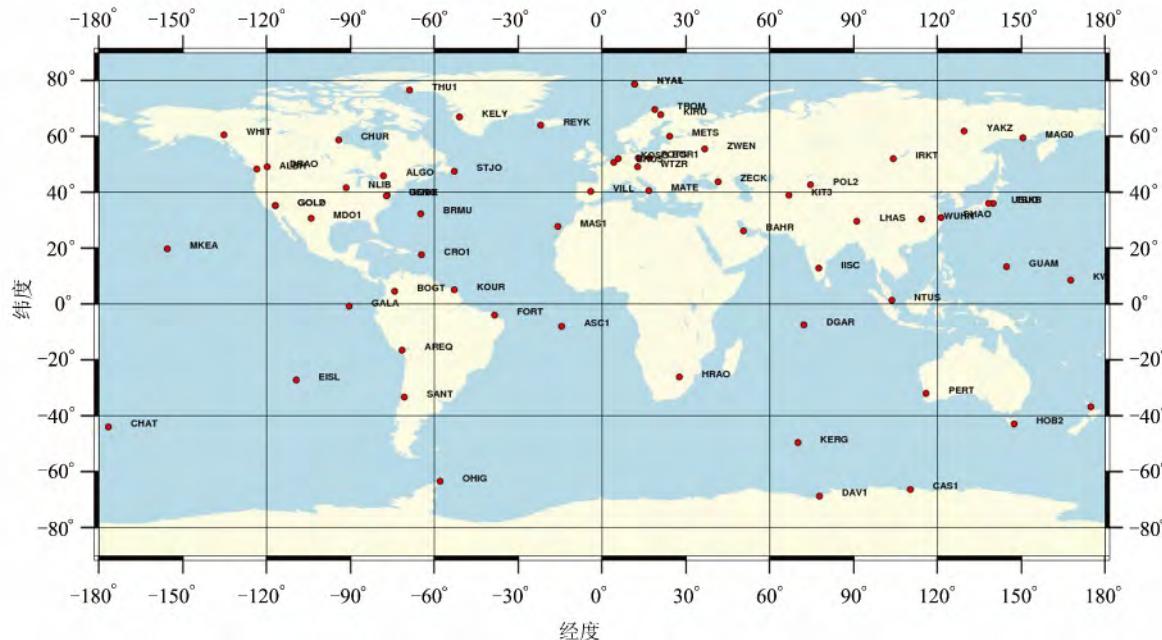


图 5 Blewitt 实验数据源的测站分布

Fig. 5 The Distribution of Blewitt's Experimental Data Source

5 结语

本文利用 IGS 数据反演得到的季节性固体地球形变机制与已知的地球物理知识基本相符。研究结果显示,每年的 2、3 月份北半球地表负载最大,而 8、9 月份南半球地表负载最大;12 月份地表负载力矩出现在中国境内,这将会造成中国范围的测站在水平和垂直方向分别产生 1 mm 和 2 mm 左右的位移。因此,季节性固体地球形变对我国 mm 级 CGCS2000 框架的影响是不容忽视的。

地表液体层的质量再分布与地心运动密切相关,因此深入研究季节性固体地球形变对于季节性地心变化的研究具有十分重要的借鉴意义。

随着 IGS 服务的不断完善和发展,GPS 对固体地球物理过程研究的意义越来越重大,然而

GPS 也有自身的缺陷,即 IGS 其跟踪站主要集中在陆地,占地球面积 70% 的海洋却缺少足够的观测资料;此外 GPS 跟踪站在陆地上的分布南北半球也不均匀,这会对单独使用 GPS 数据反演地表负载力矩的精度带来影响。如何将海洋数据和 GPS 数据融合来研究地表负载力矩,是下一步本文需要研究的内容。

参 考 文 献

- [1] David A, Lavalle'e, Tonie van D, et al. Geocenter Motions from GPS: A Unified Observation Model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: B05405
- [2] Blewitt G. Self-consistency in Reference Frames, Geocenter Definition, and Surface Loading of the Solid Earth[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B2): 210-220
- [3] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface

- Loads[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1972, 10(3): 761-797
- [4] Dziewonski A, Anderson D L. Preliminary Reference Earth Model[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1981, 25: 297-356
- [5] Lambeck K. Geophysical Geodesy: The Slow Deformations of the Earth[M]. New York: Oxford Univ Press, 1988
- [6] Blewitt G, Lavallee D, Clarke P, et al. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected[J]. *Science*, 2001, 294(5 550): 2 342-2 345
- [7] Sun Fuping, Zhao Ming, Ning Jinsheng, et al. Detection of the Asymmetry of Global Tectonic Change Based on Space Geodetic Data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 2 225-2 229(孙付平, 赵铭, 宁津生, 等. 用空间大地测量数据检测地球的非对称性全球构造变化[J]. 科学通报, 1999, 44(20): 2 225-2 229)
- [8] Sun Fuping, Zhu Xinhui, Wang Ren, et al. Detection of Changes of the Earth's Volume and Geometry by Using GPS and VLBI Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1 015-1 021(孙付平, 朱新慧, 王刃, 等. 用GPS和VLBI数据检测固体地球的体积和形状变化[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1 015-1 021)
- [9] Shen Wenbin, Zhang Zhenguo. Detecting the Earth Expansion Effect Based on Space-geodetic Data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(3): 5-6(申文斌, 张振国. 利用空间大地测量数据探测地球膨胀效应[J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 5-6)
- [10] Xia Yifei, Xiao Naiyuan, Ding Yuerong. The Deformation of the Elastic Earth and the Station Displacements[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1988, 29(3): 278-286(夏一飞, 肖耐园, 丁月蓉. 弹性地球形变和台站位移[J]. 天文学报, 1988, 29(3): 278-286)
- [11] Xu Jianqiao, Sun Heping. Earth's Deformation due to the Dynamical Perturbations of the Fluid Outer Core[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(4): 397-406(徐建桥, 孙和平. 液核动力学扰动引起的地球形变[J]. 地震学报, 2002, 24(4): 397-406)
- [12] Song Shuli, Zhu Wenyao, Xiong Fuwen, et al. Construction of mm-level Terrestrial Reference Frame[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(11): 2 704-2 711(宋淑丽, 朱文耀, 熊福文, 等. 毫米级地球参考框架的构建[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2 704-2 711)
- [13] Dong D, Dickey J O, Chao Y, et al. Geocenter Variations Caused by Atmosphere, Ocean, and Surface Ground Water[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24: 1 867-1 870
- [14] Davies P, Blewitt G. Methodology for Global Geodetic Time Series Estimation: A New Tool for Geodynamics[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B5): 11 083-11 100
- [15] Jan K. A Guide to Using International GNSS Service(IGS) Products, Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada[OL]. ftp://igscb.jpl.nasa.gov/components/IGSProducts_user_v17.pdf, 2009
- [16] Steigenberger P, Romero I, Fang P. Reprocessing Issues, Standardization, New Models [C]. IGS Workshop 2006, Darmstadt, Germany, 2006

Seasonal Earth Deformation from the Change of the Degree-1 Surface Mass Load

YU Nan^{1,2} CHENG Pengfei³ CHENG Yingyan²

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

3 National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products, Beijing 100830, China

Abstract: This article is based on SNREI earth model, inverting earth's surface load moment of recent 10 years by IGS data, explored the mechanism of seasonal earth deformation, and the results indicate that surface load moment has significant annual changes in m_x , m_y and m_z directions, and then there exists obvious seasonal deformation of the solid earth. The phase in m_z direction shows that, the maximum surface mass load within northern hemisphere is between February and March of each year, and that of southern hemisphere is between August and September, the load moment occurs within China during every December, which will cause the stations within China have a downward deformation of 2 mm and a lateral deformation of 1mm, and this influence for maintaining the stability of our millimeter

level CGCS2000 reference frame cannot be ignored.

Key words: load moment; SNREI earth; load love numbers; power spectrum analysis; regression analysis

First author: YU Nan, PhD candidate, specializes in GNSS data processing and the maintenance of Geocentric Reference Frame. E-mail: yunanya11@163.com

Foundation support: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2013AA122501; the National Natural Science Foundation of China, No. 41374014.

(上接第 520 页)

[14] Du Qingyun, Yu Changbin, Ren Fu. Organization Tile Map Data Based on Nested Pyramids Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 564-567 (杜清运, 虞昌

彬, 任福. 利用嵌套金字塔模型进行瓦片地图数据组织[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(5): 564-567

Organization and Indexing Mechanism for Global Tile Map Data Under Embedded Environment

LIU Ailong^{1,2,3} DU Qingyun¹ ZHANG Dong^{2,3} CAI Zhongliang¹ LI Heyuan⁴

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

4 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: Tile map data is an important data type in the embedded geographic information system, but the resources of calculation, storage and display are very limited in embedded environment. How to organize, storage and index the global tile map data, that is an important problem to be solved in embedded geographic information system. Based on the analysis of the constraint conditions, a resource constraints variable set and a demand variable set of global tile data organization are defined. Then, a restrictive relation model of tile map data is constructed based on embedded environment, and an organization model for global tile map data is further proposed. At same time, a storage model of tile map data is designed, and a two-dimensional linear coding method is introduced to realize quick query. The experiments show that the data organization model is well adapted to embedded environment especially regarding both efficiency and effect for tile maps.

Key words: embedded system; tile map; data organization model; storage model

First author: LIU Ailong, PhD candidate, associate professor, specializes in the embedded GIS. E-mail: ailong_liu@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41371427.