

联合 GRACE 与 GPS 比较山西省垂向地表形变

刘任莉¹ 李建成^{1,2} 姜卫平³ 李 昭¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:利用 2009-05~2010-12 共 20 mon 的 GRACE 时变重力场反演了山西省境内陆地水储量变化造成的地表垂直位移,并与同期的 GPS 高程残差进行了比较。结果显示,对大部分 CORS 站而言,GRACE 反演的水文地壳垂向形变与 GPS 高程残差时间序变化量均在 -6~6 mm 之间;由二者提取的年周期信号平均振幅均为 2.5 mm 左右,但是相位存在较大差异。由于 GPS 数据处理过程未考虑周日、半周日大气潮汐,高阶电离层,及非潮汐海潮的影响,这三项误差会传播到测站坐标的时间序列,对 GPS 周年信号产生影响,所以可以认为 GRACE 与 GPS 结果的差异更多的是来自 GPS 数据处理的误差。

关键词:GRACE;地表垂向位移;GPS 形变监测

中图分类号:P228.42

陆地与海洋间季节性的水交换产生地表负荷的变化,这些变化会引起地面的弹性形变。如果已知地球的负荷和弹性性质,就可以估计此类形变变量^[1]。由美国宇航局和欧洲空间局联合研制的重力探测与气候实验卫星 GRACE 已于 2002-03 成功发射。GRACE 卫星在季节时间尺度上,可反应受气候驱使的地表水运输造成的质量迁移。地面水资源的重新分布会导致地壳负荷变化,在年际时间尺度上,地壳会表现出弹性形变。

为了减少 GPS 观测数据处理误差,得到精确的站坐标估值,近年来已进行了大量研究。时变投影函数的产生、流体静力学延迟先验值的改进、潮汐形变模型及误差传播的精细化等使得坐标估值的重复性大大增加。目前,IGS 站的垂向精度可达 mm 级,利用 GPS 技术可有效探测地表形变。

本文处理了 2009-05~2010-12 共 20 mon 的 GRACE 月重力场数据,及同期的山西省 CORS 站 GPS 观测数据,选择了数据完整率为 95%~100% 之间的 54 个 CORS 基准站,其分布如图 1 所示。本文首先比较了 GRACE 水文弹性形变与 GPS 高程残差时间序列,接着分别提取出二者的年变化信号,对其振幅和相位进行进一步研究。

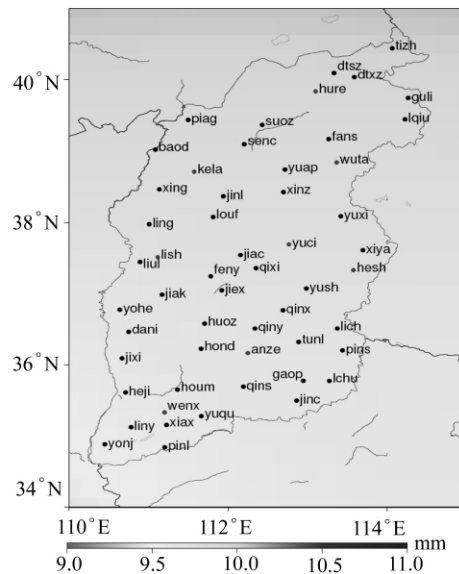


图 1 山西省 CORS 站分布

Fig. 1 Location of CORS Sites in Shanxi Province

1 GRACE 数据分析

本文采用的数据是由美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)提供的 GSMRL04 月重力场模型,时间跨度为 2009-05~2010-12 共 20 mon。该

收稿日期:2013-03-20。

项目来源:国家自然科学基金重点资助项目(40637034);武汉大学中央高校基本科研业务费专项资金自主科研资助项目(111026, 114055);中国博士后科学基金资助项目(2011M500886)。

重力场模型确定的 C_{20} 项精度相对较低,因此,在计算时采用 SLR 的 C_{20} 值进行了替换^[2]。由 GRACE 原始数据解算 GSM 重力场模型时,已利用相应的模型扣除了非潮汐大气、高频海洋信号以及各种潮汐的影响。本文先对 20 mon 的球谐系数取平均值,然后从每个月的球谐系数中扣除该平均值,剩下的球谐系数残余主要包括由于水质量的重新分布造成的重力变化,也包括测量和数据处理误差,以及大气和海洋改正的误差及混淆影响。

利用 GRACE 时变重力场模型提供的球谐系数计算地表垂向弹性形变的数学公式为^[3]:

$$dr(\theta, \lambda) = R \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^l \frac{h'_l}{1+k'_l} \bar{P}_{l,m}(\cos\theta) \cdot (C_{l,m} \cos(m\lambda) + S_{l,m} \sin(m\lambda)) \quad (1)$$

其中, $dr(\theta, \lambda)$ 为地表径向位移; h'_l 和 k'_l 为 l 阶负荷勒夫数; $\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)$ 为完全规格化的缔合勒让德函数; $C_{l,m}$ 、 $S_{l,m}$ 为质量变化的球谐系数。

由于 GRACE 月重力场模型球谐系数的误差随阶数的增大而迅速增加,为了减少高阶项误差对形变估值的影响,在式(1)中引入 Jekeli 构造的高斯平滑核函数 $W(\alpha)$ ^[4], 则地表径向位移可表示为:

$$dr(\theta, \lambda) = R \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^l \frac{h'_l}{1+k'_l} W_l \bar{P}_{l,m}(\cos\theta) \cdot (C_{l,m} \cos(m\lambda) + S_{l,m} \sin(m\lambda)) \quad (2)$$

其中, W_l 为 L 阶的各向同性高斯平滑权因子。 W_l 随着阶数的增加而衰减,且与高斯平滑半径的选取有关,可以由逐步递推的方法得到^[3]。为了在减少 GRACE 高阶项误差的同时,尽量保留质量变化信号,本文选择了 500 km 的高斯平滑半径。

GRACE 不能确定地球重力场的一阶项变化,而 GPS 观测中包含该项,因此,必须对 GRACE 数据进行一阶项改正^[5],以恢复一阶项形变量。

2 GPS 数据分析

本文选取了山西省 54 个 CORS 站(如图 1 所示)2009-05~2010-12 共 20 mon 的 GPS 坐标时间序列,日观测数据采用 GAMIT 软件解算,数据处理策略如下:电离层折射影响用 LC 观测值消除;对流层折射干分量延迟根据标准大气模型采用萨斯坦莫宁模型、niell 投影函数改正,湿分量延迟采用分段线性的方法估算偏差参数,每两个小时估计一个参数;卫星和接收机天线相位中心

偏差采用绝对天线相位中心改正;数据处理施加海潮、极潮和固体潮改正,但未进行大气潮和非潮汐海潮改正;截止高度角 15° ,历元间隔 30 s;考虑卫星轨道误差,即松弛 IGS 轨道。

GPS 坐标估值中包括由于地理物理现象造成的长期线性项,例如板块运动,该项与水文弹性形变无关。因此,首先扣除了 GPS 时间序列中的线性部分,然后求得其高程残差的月平均时间序列,以便与 GRACE 结果进行对比。

3 GPS 与 GRACE 垂直形变比较

图 1 显示了山西省境内 54 个 CORS 站的分布,背景场为由 GLDAS 水文模型得到的垂向弹性形变年周期振幅。将该水模型长达 38 a(1979~2010 年)的水储量月变化展开成 60 阶的球谐系数,利用式(2)将其转化为弹性形变,并提取出年周期项。由此得到的年变化振幅大概在 10 mm 左右,且北部略大于南部。图 2 的背景场为由 GRACE 计算得到的垂向弹性形变的年变化振幅,时间段为 2009-05~2010-12,平均量级大概在 1.5 mm 左右,南部的周年形变振幅大于北部。GLDAS 水文模型与 GRACE 时变模型在水文垂向弹性形变上的差异主要表现为两点:其一是量级上的差异,这主要是由于 GRACE 时变模型空间分辨率低,约为 330 km,很多的细节信号观测不到,导致 GRACE 观测到的水文信号比 GLDAS 弱;另外一个显著差异是 GLDAS 结果为北部年周期信号振幅略大于南部,与 GRACE 结果相反,在后面的分析可以发现,GPS 得到的结果与 GRACE 的结果是一致的。由于 GLDAS 在中国大陆的观测站少,其结果并不可靠,所以本文认为 GRACE 与 GLDAS 结果的不一致,更多是由于 GLDAS 的观测误差造成的。

图 3 选取了 8 个 CORS 站的 GRACE 垂向弹性形变与 GPS 坐标 U 分量残差时间序列。可以看出,GRACE 与 GPS 的大部分形变量均在 $-6 \sim 6$ mm 之间,且存在明显的周期项。研究时段内,二者在 2010 年下半年大致符合,其他时段符合得不好,在 2009 年的 7、8 月份甚至表现出相反的变化趋势。GRACE 观测到的形变量变化幅度略小于 GPS,且 8 个 CORS 站的 GRACE 垂向形变时间序列几乎是一样的,没有明显的区别,其他未列出的 CORS 站也表现出类似的变化曲线,这表明 GRACE 只能探测到大尺度的水文变化,局部变化在 GRACE 结果中不能得到反映。另外,

在 GPS 信号中存在明显的突变(2009 年 7 月份, 2010 年五月份),可能是由于扣除线性项引起的。

为了评估 GRACE 与 GPS 信号的一致程度, 本文比较了 GPS 高程残差扣除 GRACE 垂向弹性形变量前后的 RMS 值。图 2 上带颜色的圆点表示了山西省境内 CORS 站 RMS 值减少的百分比。

图 2 中,各种颜色的点表示从 GPS 高程残差中扣除 GRACE 信号后 RMS 值的增减。从图 2 中可以看出,大部分的站点表现为 RMS 值增加, 只有 jiac 和 hond 两个站的 RMS 值表现为减少。即通过扣除 GRACE 弹性形变,54 个 CORS 站中,只能减少其中 2 个站的 RMS 值。所以,从 GPS 信号中扣除 GRACE 反演得到的形变量,并

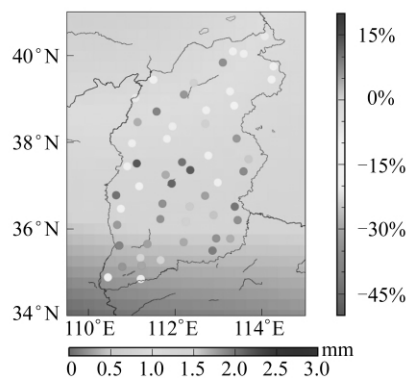


图 2 GPS 高程残差扣除 GRACE 形变量后 RMS 减少百分比

Fig. 2 RMS Reduction Percentage in GPS Height Residuals when Total GRACE Signal is Removed

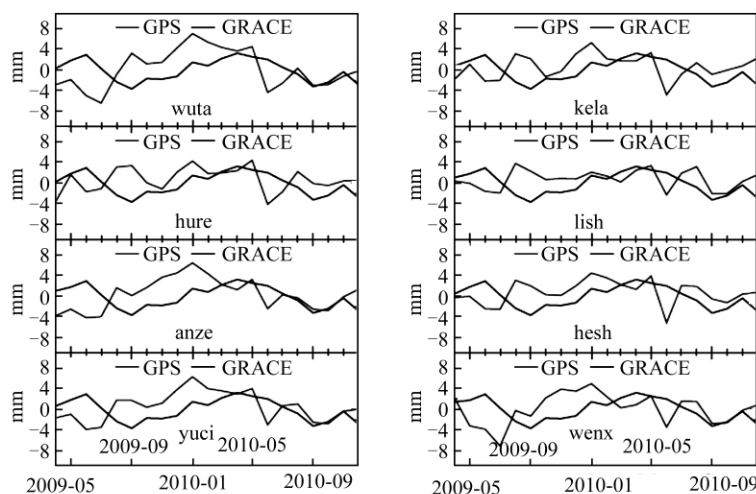


图 3 wuta, hure, anze, yuci, kela, lish, hesh, wenx 站的 GPS 坐标残差 U 分量与 GRACE 垂向弹性形变比较

Fig. 3 Comparison Between U Component of GPS Coordinate Anomalies and Vertical Elastic Deformation Derived from GRACE for wuta, hure, anze, yuci, kela, lish, hesh and wenx

图 4 为 GRACE 与 GPS 年周期信号振幅的比较,背景场同图 2。采用多项式拟合的方法提取出年周期信号。其中,图 4(a)表示的是 GRACE 年周期信号振幅,箭头的长度表示振幅大小。由于 GRACE 分辨率低,所以 54 个站的振幅基本一致,振幅在 2.5 mm 左右。图 4(b)表示 GPS 年周期信号振幅,表示方法同 GRACE。GPS 观测到的形变大多数为 2~4 mm,站间差异较 GRACE 大,南部站点的振幅略大于北部。比较 GRACE 与 GPS 的年周期信号可以发现,在大部分 CORS 站,二者的振幅相近,极少数站点的 GPS 周年信号振幅明显小于 GRACE。表 1 列出了部分站点的 GRACE 与 GPS 周年振幅及相位值。从表 1 中可以发现,二者的振幅较一致,但相位存在很大差异。相位差异主要与以下两个因素

有关:一是 GRACE 观测能实时观测到由于水变化引起的重力变化,但实际上,由水变化到地表面形变有个响应过程,该响应过程在时间序列上表现为相位的延迟;另外,GRACE 数据处理中的平滑过程会使相位置前^[6]。这两方面的原因,都会

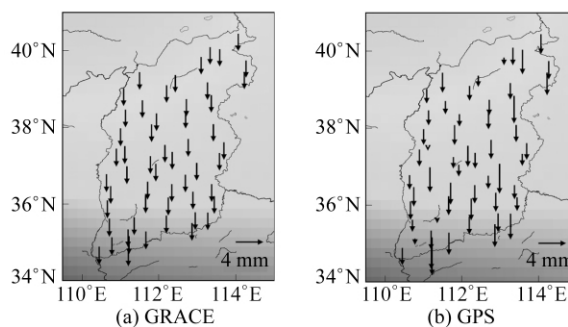


图 4 GRACE 与 GPS 年周期信号振幅

Fig. 4 Annual Amplitude of GRACE and GPS Signals

导致 GRACE 与 GPS 周年信号表现出相位差异。另外,从 GPS 数据处理策略来讲,本文的 GPS 数据处理中未考虑周日、半周日大气潮汐,高阶电离层,及非潮汐海潮的影响。研究发现未模型化的周日、半周日大气潮汐会导致约 351.4 d 的周年及 175.7 d 的半年信号^[7];高阶电离层影响也会造

成地球参考框架转换参数达 10 mm 的差异。此外,本文的海潮改正采用 fes2004 模型提供的 11 个主分量振幅及相位计算,未模型化的周日、半周日海潮可能导致 GPS 时间序列产生虚假的周年及半年信号。这些差异会传播至测站坐标时间序列,可能是导致 GPS、GRACE 相位差异的原因。

表 1 GRACE 与 GPS 年周期信号振幅与相位

Tab. 1 Annual Amplitude and Phase Derived from GRACE and GPS

站点	GRACE		GPS		站点	GRACE		GPS	
	振幅/mm	相位/rad	振幅/mm	相位/rad		振幅/mm	相位/rad	振幅/mm	相位/rad
anze	2.60±0.06	-0.56±0.02	3.15±0.98	1.05±0.32	piag	2.56±0.06	-0.56±0.02	2.89±1.03	0.57±0.34
dani	2.62±0.06	-0.55±0.02	2.82±1.01	0.67±0.35	pinl	2.63±0.06	-0.55±0.02	2.90±1.07	0.72±0.36
dtxz	2.52±0.06	-0.57±0.02	3.57±1.07	0.68±0.29	qins	2.60±0.06	-0.56±0.02	2.57±1.01	0.87±0.39
gaop	2.58±0.06	-0.56±0.02	2.71±0.97	1.02±0.36	qiny	2.59±0.06	-0.56±0.02	2.64±0.97	0.67±0.36
heji	2.63±0.06	-0.55±0.02	1.76±1.03	1.09±0.60	senc	2.56±0.06	-0.56±0.02	2.13±1.01	0.90±0.48
hesh	2.55±0.06	-0.56±0.02	1.72±0.96	0.82±0.56	tunl	2.58±0.06	-0.56±0.02	2.73±0.96	0.78±0.35
jiex	2.59±0.06	-0.56±0.02	1.70±0.94	1.35±0.57	wenx	2.62±0.06	-0.55±0.02	2.80±1.03	0.99±0.37
jinc	2.59±0.06	-0.56±0.02	3.31±0.95	1.39±0.29	xing	2.58±0.06	-0.56±0.02	2.16±1.01	0.72±0.46
jixi	2.62±0.06	-0.55±0.02	2.67±1.03	1.12±0.40	xinz	2.56±0.06	-0.56±0.02	2.56±0.98	0.83±0.38
lchu	2.58±0.06	-0.56±0.02	3.73±0.94	1.12±0.26	yohe	2.62±0.06	-0.55±0.02	2.11±1.01	1.08±0.48
lich	2.57±0.06	-0.56±0.02	2.02±0.94	1.07±0.47	yonj	2.64±0.06	-0.55±0.02	2.52±1.07	1.21±0.43
ling	2.59±0.06	-0.56±0.02	2.30±1.00	0.74±0.43	yuci	2.57±0.06	-0.56±0.02	2.79±0.97	0.72±0.34
liul	2.60±0.06	-0.56±0.02	2.44±1.01	0.64±0.41	yuqu	2.62±0.06	-0.55±0.02	3.22±1.03	0.90±0.32
louf	2.58±0.06	-0.56±0.02	2.90±1.00	0.72±0.34	yush	2.57±0.06	-0.56±0.02	4.31±0.93	1.19±0.22

4 讨论与总结

本文采用 GRACE 和 GPS 两种监测手段对山西省境内 54 个 CORS 站的水文地壳垂向形变进行了研究。通过比较同期的 GRACE 与 GPS 结果可以发现,二者得到的形变量均在 -6~6 mm 之间,但在细节上符合得并不理想。从 GPS 高程残差中扣除 GRACE 弹性形变量后,绝大部分 CORS 站 RMS 值增加 15%~40%,这表明从 GPS 时间序列中扣除 GRACE 反演的陆地水储量变化长波部分,并不能将 GPS 非线性高程残差进行细化,这与二者相位上的差异有很大关系。此外,GRACE 与 GPS 周年信号的振幅大致一致,均在 2.5 mm 左右,但是相位差异较大。这可能是由某些对两种监测手段有不同影响的地球物理现象所致,例如,一个局部的水文变化过程,可能对 GPS 时间序列有重要影响,但是由于所影响的空间范围太小,根本不能被 GRACE 探测到。另外,二者相位上的差异与 GPS 信号中的伪信号及 GRACE 的平滑过程都有关系,其中,伪信号的影响较为复杂^[8-9]。

由于在本文的 GPS 数据处理过程中未考虑周日、半周日大气潮汐,二、三阶电离层及非潮汐海潮的影响;另外,获得的 GPS 数据时间段较短,

使得提取高程残差线性项及周年信号存在较大误差。未来将对 GPS 数据采用最新的模型进行重新处理,消除因 GPS 数据处理策略不完善造成的差异;同时,对 GRACE 信号进行泄漏改正,再对二者进行细致的比较分析。

参 考 文 献

- [1] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads[J]. Rev Geophys, 1972, 10:761-797
- [2] Cheng M, Tapley B D. Variations in the Earth's Oblateness During the Past 28 Years[J]. J Geophys Res, 2004, 109:135-143
- [3] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time-Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. J Geophys Res, 1998, 103 (B12): 30 205-30 230
- [4] Jekeli C. Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field[R]. Dep. Of Geod. Sci. and Surv., Ohio State Univ., Columbus, 1981
- [5] Swenson S, Chambers D, Wahr J. Estimating Geocenter Variations from a Combination of GRACE and Ocean Model Output[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113:114-125
- [6] Chen J L, Wilson C R, Famiglietti J S, et al. Attenuation Effects on Seasonal Basin-Scale Water Storage Change From GRACE Time-Variation Grav-

- ity[J]. *J Geodesy*, 2007, 81(4):237-245
- [7] Petrie E J, King M A, Moore P, et al. Higher-Order Ionospheric Effects on the GPS Reference Frame and Velocities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115:107-114
- [8] 姜卫平, 邹璇. 精密 GPS 定位中大气模型误差的研究与分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(11):1 106-1 109
- [9] 邹璇, 姜卫平. 潮汐改正对精密 GPS 基线解算的影响[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(1): 6-8
- 第一作者简介: 刘任莉, 博士, 主要从事 GRACE 卫星应用研究。
E-mail: lrlwuhan@yahoo. cn

Comparing Vertical Surface Displacements Using GRACE and GPS over Shanxi Province

LIU Renli¹ LI Jiancheng^{1,2} JIANG Weiping³ LI Zhao¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geospace Environment & Geodesy of Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Hydrological processes cause variation in gravitational potential and surface deformations, both of which are detectable using space geodetic techniques. We computed surface vertical displacements due to inland water storage changes using GRACE time-variable gravity field for GORS sites in Shanxi province, during from May 2009 to Dec. 2010, and compared the results with GPS height residuals during the same period. The results demonstrate that variations of hydrological surface deformation derived from GRACE and GPS height residual time series, for most CORS sites, are both about ± 6.0 mm. The average amplitudes of annual signal extracted from GRACE and GPS are both about 2.5 mm, however, the phase discrepancy is large. Since no corrections were applied for diurnal and semi-diurnal atmospheric loading, high order ionosphere, and non-tidal ocean loading, which would propagate into site coordinates time series and affect GPS annual signals. Therefore, we believe that the disagreement between GRACE and GPS is more due to errors in the GPS data processing.

Key words: GRACE; surface vertical displacement; GPS deformation monitorin

About the first author: LIU Renli, Ph. D. majors in application of GRACE satellite.

E-mail: lrlwuhan@yahoo. cn