



# 利用 CORS 站网监测三峡地区环境负荷引起的地壳形变与重力场时空变化

章传银<sup>1</sup> 王伟<sup>1</sup> 甘卫军<sup>2</sup> 李辉<sup>3</sup> 张庆涛<sup>4</sup>

1 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

2 中国地震局地质研究所, 北京, 100029

3 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉, 430071

4 国家测绘地理信息局第一大地测量队, 陕西 西安, 710054

**摘要:**受地球动力学因素特别是地球表层大气、地表水及地下水动力环境影响,地面站点位置、地球重力场及大地水准面随时间变化。以三峡地区 CORS 站网为主,少量重力台站为辅,采用负荷形变与地球重力场严密组合方法,综合确定了 2011-01—2015-06 三峡地区环境负荷驱动的地壳形变与重力场月变化,结果显示:(1)CORS 站网具备地壳垂直形变、大地水准面及地面重力变化的监测能力;(2)三峡地区地壳垂直形变年变化幅度 36.1 mm,大地水准面年变化幅度 28.2 mm,地面重力年变化幅度 117.4  $\mu\text{Gal}$ ;(3)CORS 站网地面重力变化监测精度水平不低于流动重力场重复测量;(4)CORS 站网地壳垂直形变与地面重力变化监测具有一定的外推预报能力。

**关键词:**GNSS CORS 站;环境负荷形变;区域重力场变化;三峡;地壳形变

**中图分类号:**P312.1;P223.7 **文献标志码:**A

时变地球重力场包含地球系统密度分布及物质运动的丰富信息,直接反映了地球各圈层最基本的物质及其变化特性,是地球环境变化导致地球形变最基本、最直接和最重要的物理量之一<sup>[1-3]</sup>。受引潮天体、海平面及大气变化、地表及地下水变化(包括冰川雪山、江河湖库、土壤水和地下水等变化,也称大陆水变化)、核幔耦合及内核动力作用等地球动力学因素影响,地面站点位置、地球重力场及大地水准面随时间变化<sup>[4]</sup>。

为方便高精度大地测量数据处理及定量分析,通常将地球重力场随时间变化分成潮汐影响和非潮汐地球重力场形变两部分。由于潮汐影响能随时随地从大地测量观测量和参数中予以移去或恢复,因此,时变地球重力场监测和研究的重点通常是是非潮汐地球重力场形变<sup>[5]</sup>。在大地测量基准维持涉及的数年到十年时间内,由非潮汐海平面变化、大陆水变化和非潮汐大气负荷变化等构成的地球表层环境负荷变化,对重力场变化及地壳非构造垂直形变的贡献占其时变量的 97% 以

上<sup>[6-7]</sup>。卫星重力场时变监测极大地推动了地球水循环与海洋、大气、水资源环境及相关地球科学的发展<sup>[8-10]</sup>。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)测量作为一种高精度地壳形变观测手段,也能够通过其连续观测的站点坐标变化时间序列,有效反映出大气和陆地水等环境负荷所引起地壳形变<sup>[11-19]</sup>。

本文以三峡地区卫星导航定位基准站网(Continuously Operating Reference Station, CORS)非潮汐垂直形变为主,少量重力台站非潮汐重力变化为辅,综合确定三峡地区环境负荷驱动的地壳形变与重力场时空变化。

## 1 监测原理与方法

地球表层环境负荷变化可用等效水高变化(或面密度变化)表示。本文的等效水高变化通常是指某一时刻等效水高相对于参考时刻等效水高的差值,或相对于某一段时间等效水高平均值之差<sup>[20]</sup>。

收稿日期:2017-09-07

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501702);国家自然科学基金(41374081,41304009)。

第一作者:章传银,博士,研究员,主要从事大地测量与地球重力场研究。zhangchy@casm.ac.cn

通讯作者:王伟,博士,副研究员。wangwei@casm.ac.cn

由地球负荷形变和地球重力场理论,地面等效水高

$$g_t(\varphi, \lambda) = -3 \frac{\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{R^2} \sum_{n=1}^N \frac{n + 2h'_n - (n + 1)k'_n}{2n + 1} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (1)$$

式中,  $(\varphi, \lambda)$  为地面点的地心纬度和经度;  $\rho_w \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$  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;  $G$  为万有引力常数;  $M$  为地球总质量;  $R$  为地球平均半径;  $n$  和  $m$  分别为阶和次;  $h'_n$  为  $n$  阶径向负荷数;  $k'_n$  为  $n$  阶位负荷勒

$$\Delta r(\varphi, \lambda) = 3 \frac{\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma R} \sum_{n=1}^N \frac{h'_n}{2n + 1} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为地面平均重力。

地面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如下通用形式:

$$\Delta\theta(\varphi, \lambda) = G\rho_w \iint_S \frac{\Delta h_w(\varphi', \lambda')}{L} G(\psi) dS \quad (3)$$

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

同理,可列出环境负荷变化引起的垂线偏差、负荷水平形变、地面扰动重力变化球谐展开式负荷格林函数式。因此,通过构建以卫星重力、卫星测高或各种地面大地测量变化量为观测量,以负荷等效水高或其球谐系数为待估参数的观测方程,采用适当的参数估计算法,可反演地壳负荷形变及地面重力场变化<sup>[20]</sup>。

## 2 数据处理与综合反演

### 2.1 采用的数据与处理方法

1) 三峡地区 26 座 CORS 站非潮汐大地高变化。CORS 网解算时的地球动力学改正采用国际地球自转和参考系统服务 IERS2010 协议,移去了固体潮、海潮负荷、周日和半日大气潮负荷影响。以 2010 年 11 月平均值为基准,生成 2011 年 1 月至 2015 年 6 月 CORS 站大地高月变化,如三峡地区湖北荆门(HBJM)和湖南麻阳(HNMY)两个 CORS 站大地高所示。

2) 三峡地区 8 座重力台站非潮汐重力变化。重力台站都配置便携式潮汐重力仪,连续观测时间跨度 1~3 a。采用 IERS2010 协议,移去了固体潮和海潮负荷影响。由于周日和半日大气潮负荷影响量级在 1~2  $\mu\text{Gal}$ ,与重力测量精度相比,忽略该影响。以 2010 年 11 月平均值为基准,生成重力台站非潮汐重力变化。CORS 站与重力台站点位分布见图 1。

变化  $\Delta h_w$  引起的地面重力变化  $g_t(\varphi, \lambda)$  为:

夫数;  $(\Delta C_{nm}, \Delta S_{nm})$  为  $n$  阶  $m$  次规格化负荷球谐系数;  $\bar{P}_{nm}(\cdot)$  为  $n$  阶  $m$  次规格化连带勒让德函数。

引起的地面站点大地高变化(负荷垂直形变)  $\Delta r(\varphi, \lambda)$  为:

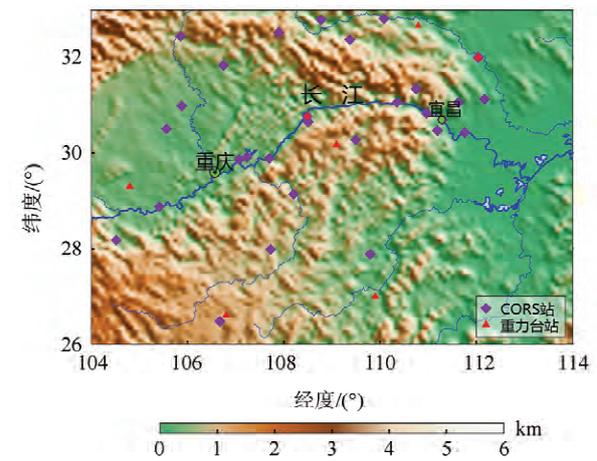


图 1 三峡地区 CORS 站与重力台站点位分布图  
Fig.1 Location of CORS and Gravity Stations in the Three Gorges Area

3) 三峡地区江河湖库水月变化。采用多时相资源三号高分辨率卫星影像和江河湖库水位实测数据,计算每月江河湖库水等效水高变化。

4) 三峡地区大气压月变化。从 77 个气象站中国地面气候资料日值数据集中生成三峡地区 2011 年 1 月至 2015 年 6 月大气压月变化格网模型。

5) 全球大气与土壤水模型。全球大气压月变化数据采用欧洲中期天气预报中心的全球大气重分析产品,全球土壤水等效水高月变化采用美国国家海洋和大气管理局气象预报中心的模型数据。

全球大气负荷和土壤水负荷影响采用球谐分析方法,构建了 360 阶球谐系数,由球谐系数分别按式(1)和式(2)计算;区域大气负荷和江河湖库水负荷影响采用式(3)计算,积分半径不大于 2.5°。基于全球和区域大气数据,采用重力场移去恢复法分离中长波分量,精化计算了区域大气负荷影响<sup>[5]</sup>,部分站点结果如图 2 所示。

### 2.2 综合反演

将每月作为独立计算单元,分别以 CORS 站

非潮汐大地高月变化和重力台站非潮汐重力变化为观测量,按式(3)组成观测方程。实际计算中,从大地高月变化和重力变化观测量中分别移去模型全球土壤水负荷影响、区域大气负荷影响、区域江河湖库水负荷影响,组成残差观测量方程,数学

模型采用基于时域潮汐分析的空间同化法构建,联合解算残差等效水高格网,从而获得区域残差负荷影响。图 2 中列出了 HBJM 和 HNMY 两个 CORS 站上用于解算的残差大地高。

在联合解算中,根据重力和大地高两者的量

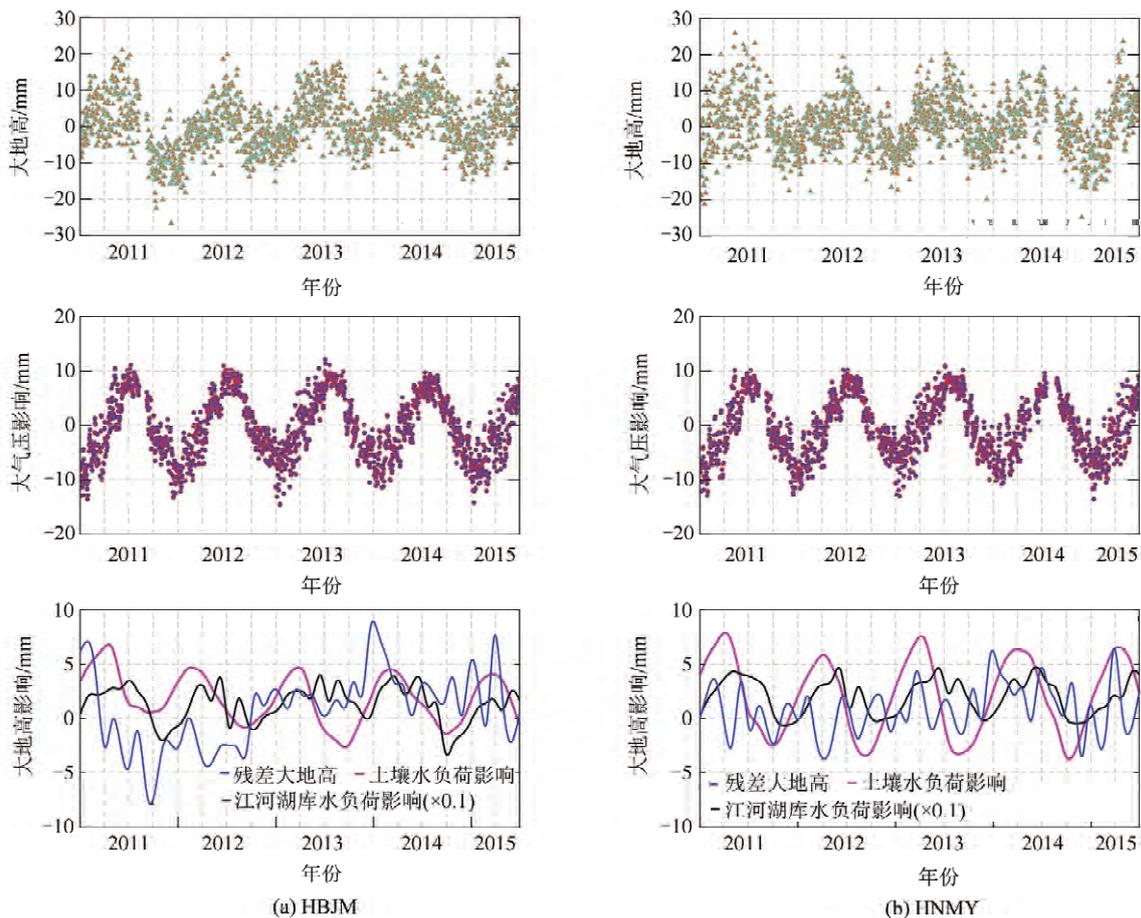


图 2 CORS 站上大地高变化和各種环境负荷影响

Fig.2 Geodetic Height Change and Environmental Impact on CORS Stations

纲、数据质量情况,对反演后的残差大小进行对比分析,最终确定重力数据配权为 2.0、4.0 或 6.0,大地高数据配权 0.8 或 1.0,各站数据分别配权。本文以测站为中心按高斯函数配置平滑系数<sup>[15]</sup>,以控制收敛的速度,并根据实际收敛情况调整比例系数,采用基于岭估计的正则化方法解算法方程,采用迭代算法解决高分辨率参数逼近问题,获得等效水高格网。

环境总负荷形变及重力场变化等于残差负荷影响、江河湖库水负荷影响、区域大气负荷影响,以及模型土壤水负荷影响的综合。空间分辨率为  $2' \times 2'$ ,时间分辨率为 1 个月,时间跨度为 2011 年 1 月至 2015 年 6 月。部分结果如图 3 和图 4 所示,图 3、4 中数据为相对于参考时间 2010 年 11 月。为突出地面重力变化的空间分布结构,图 4 中将大于  $40 \mu\text{Gal}$  的色彩直接用  $40 \mu\text{Gal}$  表示,

将小于  $-60 \mu\text{Gal}$  的色彩用  $-60 \mu\text{Gal}$  表示。

从图 3 和图 4 中可以发现,在三峡水库和重庆周边有负荷变化的明显特征区域。综合时间跨度内的所有图像可知,环境负荷对垂直形变、大地水准面、地面重力和垂线偏差影响具有丰富的时间变化特征和空间分布结构,这些时空变化规律与地质环境稳定性时空变化存在较大的相关性,并且具有较明显的年变化规律。

将环境负荷变化引起的大地高变化和重力变化总影响分别内插到 CORS 站上,与实测大地高进行比较,两者之间的残差普遍在 5 mm 内。计算的大地高负荷总影响为月分辨率,与实测月平均大地高在数值和趋势上非常一致,如图 5 所示。图 5 中分别列出了三峡地区丰都(FEDU) CORS 站大地高变化连续观测数据、负荷形变及重力场月变化成果。统计全部 CORS 站点的观测结果

和反演结果,普遍存在小于 5 mm 的残差,可能是地下水均衡效应影响或构造影响。

统计结果如表 1 所示,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。

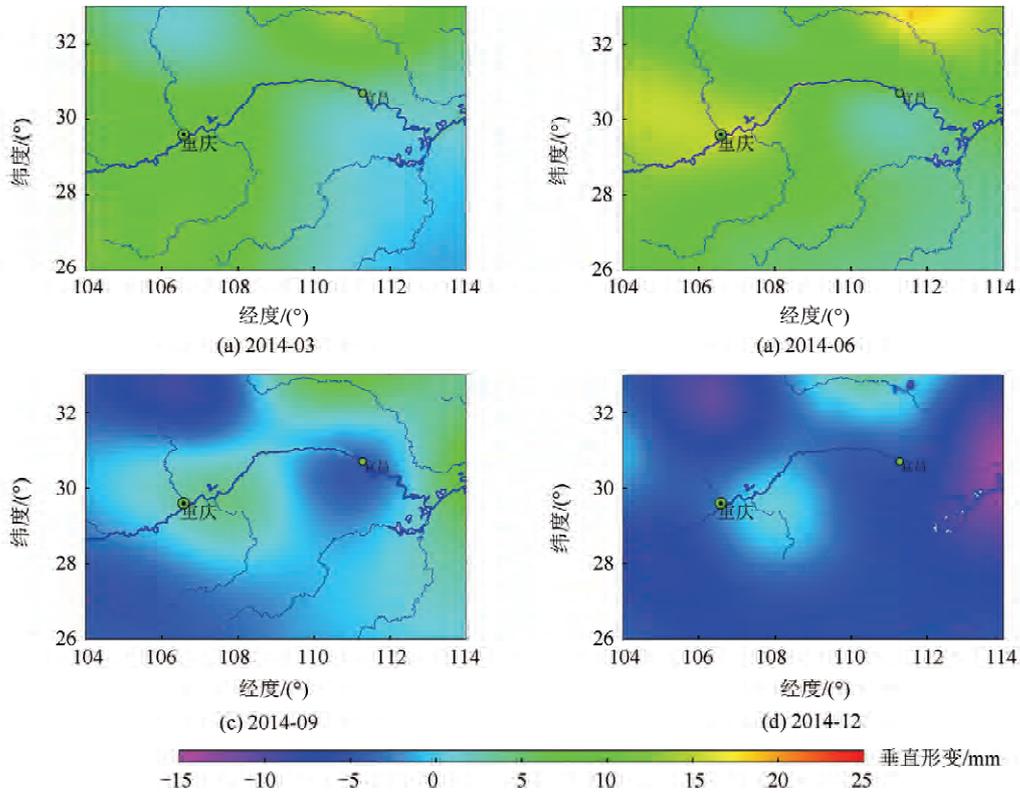


图 3 环境负荷变化引起的地壳垂直形变

Fig.3 Crustal Vertical Deformation by Loading

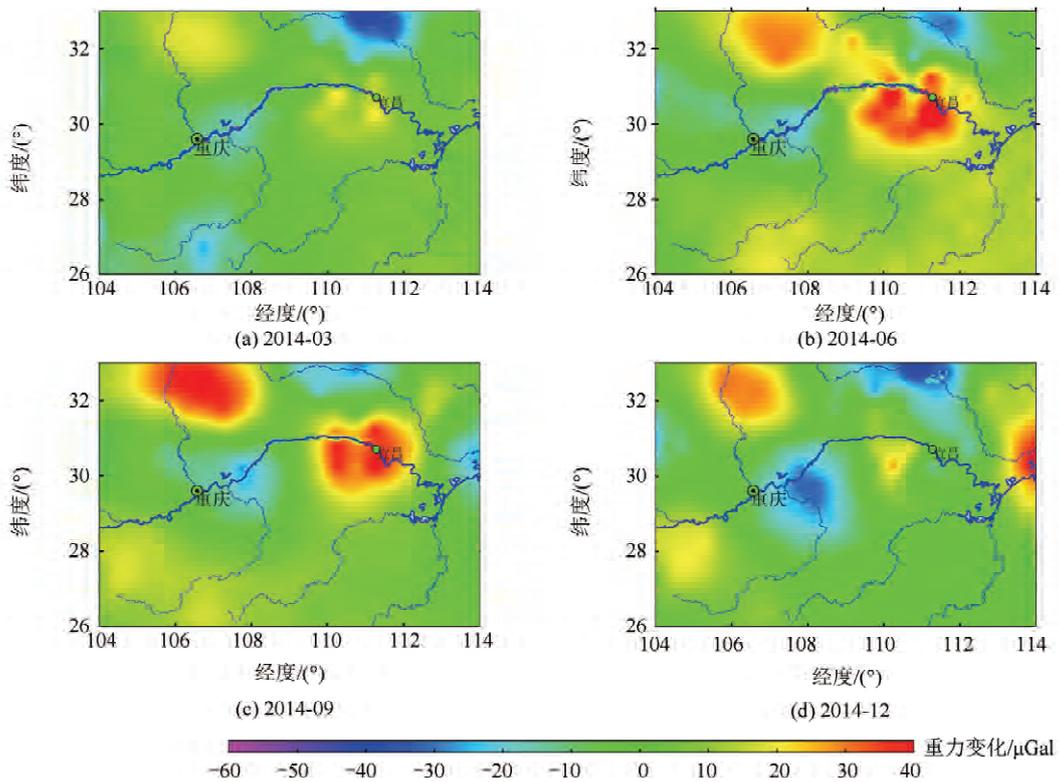


图 4 环境负荷变化引起的地面重力变化

Fig.4 Ground Gravity Changes by Loading

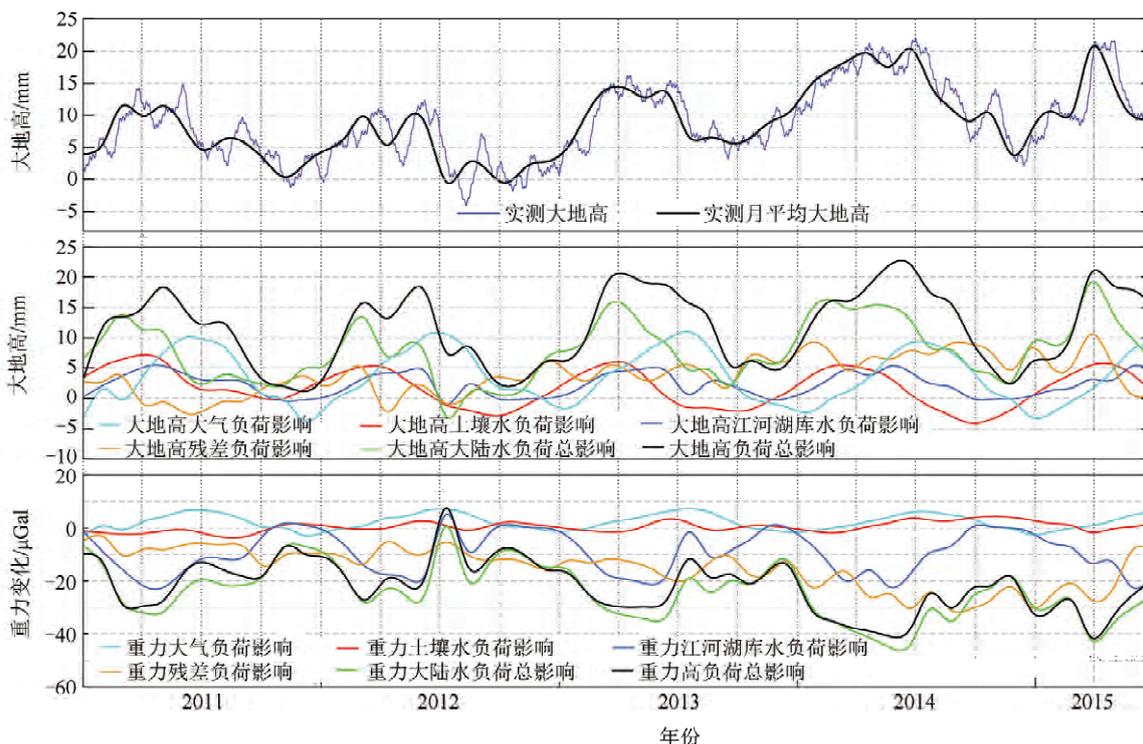


图 5 丰都站地壳垂直形变和重力变化的负荷影响

Fig.5 Environmental Impact of Vertical Deformation and Gravity Variation in FEDU CORS Station

表 1 CORS 站网监测的环境负荷形变及重力场时空变化统计

Tab.1 Statistics of Spatial and Temporal Changes of Deformation and Gravity Field Caused by Environmental Load Based on CORS Network

大地测量 变化类型	2011-01—2014-12				2015-01—2015-06				年变化 幅度
	最大	最小	均值	标准差	最大	最小	均值	标准差	
地壳垂直形变/mm	30.7	-21.8	3.6	5.5	18.7	-19.6	5.0	5.3	36.1
大地水准面变化/mm	8.2	-25.2	-4.9	4.9	5.8	-17.0	-6.3	4.1	28.2
地面重力变化/ $\mu$ Gal	241.4	-398.8	2.9	11.7	219.9	-359.3	3.3	12.2	117.4
地壳水平形变*/mm	2.5	0.0	0.9	0.4	1.8	0.0	0.7	0.3	1.8
垂线偏差变化/ms	111.5	0.0	2.7	1.9	99.4	0.0	2.5	2.1	9.0

注: \*水平形变是对其模进行的统计

### 3 分析与结论

#### 3.1 与德国 GFZ 卫星重力产品对比情况

检核数据来源:德国波茨坦地学中心(Helmholtz-Zentrum Potsdam-German Research Centre for Geosciences, GFZ)重力场恢复和气候实验卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)负荷形变及重力场月变化产品,该产品不含大气负荷影响,为大陆水负荷影响。

检核方法:将 CORS 站网监测成果(环境总负荷变化影响,下同)与 GRACE 产品(加上大气负荷影响)逐月进行对比,时间跨度为 2011 年 1 月至 2014 年 12 月,共 42 个月。

从表 2 对比结果可得到:

1)CORS 站网具备地壳垂直形变、大地水准面及地面重力变化监测能力。两者的差别主要是因为 GRACE 产品空间分辨率约为 300 km,低于 CORS 站网监测。

2)CORS 站网监测统计结果显示,三峡地区地壳垂直形变年变化幅度 36.1 mm,大地水准面年变化幅度 28.2 mm,地面重力年变化幅度 117.4  $\mu$ Gal。

#### 3.2 与流动 GNSS 网和流动重力复测成果对比情况

检核数据来源:中国地壳运动观测网络流动 GNSS 网、流动重力网重复测量成果。

检核方法:从 CORS 网  $2' \times 2'$ 地壳形变与重力场时空变化监测成果中,内插与流动 GNSS 网点位和时间一一对应的大地高变化,并与流动 GNSS 网对应时间的大地高变化相减,获得大地

高变化的互差。内插与流动重力网点位和时间一一对应的重力变化,并与流动重力网对应时间的重力变化相减,获得地面重力变化的互差。从表3、表4对比结果可得:

1) CORS 站网大地高变化和流动 GNSS 网复测的大地高变化互差的标准差相对较小,因此用 CORS 站网监测成果内插三峡地区任意地面点的大地高变化,与 GNSS 重复实测的大地高变化相

比,监测精度有所提高。

2) CORS 站网地面重力变化与流动重力网复测重力变化互差的标准差相对较小,因此区域 CORS 站网具备较高水平的地面重力变化监测能力。

3) 通过标准差的比较可以得出,用 CORS 站网监测成果内插三峡地区任意地面点的重力变化,与重力网重复实测的重力变化相比,监测精度有所提高。

表2 CORS 站网监测成果与 GRACE 产品对比

Tab.2 Comparison of CORS Network Monitoring Results and GRACE Product

成果类型	CORS 站网监测成果					GRACE 产品(GFZ)				
	最大	最小	均值	标准差	年变化幅度	最大	最小	均值	标准差	年变化幅度
地壳垂直形变/mm	26.6	-19.8	1.0	5.7	36.1	41.8	-29.5	3.4	7.8	42.7
大地水准面变化/mm	8.2	-25.2	-4.9	4.9	28.2	10.6	-17.6	-3.5	4.7	26.3
地面重力变化/ $\mu$ Gal	241.4	-398.8	2.9	11.7	117.4	94.8	-112.6	1.0	19.2	124.7

表3 CORS 站网监测成果与流动 GNSS 网复测成果对比/mm

Tab.3 Comparison of CORS Network Monitoring Results with Flow GNSS Network/mm

大地高变化的 时间跨度	CORS 站网监测成果提取的 大地高变化				中国地壳运动网络 GNSS 网 复测的大地高变化				大地高变化的互差			
	最大	最小	平均	标准差	最大	最小	平均	标准差	最大	最小	平均	标准差
	2011-03—2013-04	15.9	0.5	4.6	2.6	29.5	-19.4	5.8	8.1	10.5	-4.7	-0.0
2011-03—2013-05	15.4	-3.2	3.1	3.6	28.3	-7.6	7.9	8.4	7.1	-14.2	-1.3	3.7
2011-05—2013-04	11.6	-14.3	0.1	4.0	9.9	-17.5	-0.72	5.5	10.3	-17.9	0.1	5.4
2011-05—2013-05	9.1	-17.2	-1.3	4.4	11.6	-21.6	0.29	6.0	5.7	-10.9	0.6	2.3

表4 CORS 站网监测成果与流动重力网复测成果对比/ $\mu$ Gal

Tab.4 Comparison of CORS Network Monitoring Results with Flow Gravity Network/ $\mu$ Gal

地面重力变化 时间跨度	CORS 站网监测成果提取的 地面重力变化				中国地壳运动网络重力网 复测的重力变化				地面重力变化的互差			
	最大	最小	平均	标准差	最大	最小	平均	标准差	最大	最小	平均	标准差
	2012-05—2013-09	71.7	-44.8	-2.2	7.1	73.0	-33.7	-2.8	31.3	47.7	-44.9	-9.8
2012-11—2014-09	119.9	-146.1	5.1	14.0	254.7	-58.7	13.8	60.1	50.6	-68.4	16.7	19.6
2013-04—2013-09	151.1	-23.1	4.8	14.1	138.8	-30.1	6.4	32.3	34.8	-47.5	-38.7	9.0
2013-09—2015-04	124.4	-57.4	-0.0	10.6	43.3	-19.4	1.3	12.63	5.7	-10.9	0.6	2.3

3.3 用实测成果检核其外推预报能力

检核数据来源:国家测绘地理信息局第一大地测量队(简称国测一大队)2015年实测的三峡库区3个GNSS重力并置站点,2组2015年8月、10月相对于4月的地面大地高变化与地面重力变化数据。

检核方法:由2011年1月至2015年6月2'

表5 CORS 站网监测成果与实测成果对比检核(大地高)/mm

Tab.5 Comparison of CORS Network Monitoring Results with the Measured Results(Geodetic Height)/mm

点名	国测一大队实测 大地高变化		CORS 网监测成果外推 大地高变化		大地高变化互差	
	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10
	CQKX	0.7	-10.2	-3.9	-3.9	4.6
CQWL	1.3	-8.2	-0.6	-7.4	1.9	-0.8
HBYC	-1.1	2.3	2.5	0.0	-3.6	2.3

$\times 2'$ 地壳及重力场时空变化环境负荷总影响监测成果格网,内插GNSS重力并置站点处每月大地高变化和重力变化,并外推(预报)GNSS重力并置站点处2015年8月、10月相对于4月的地面大地高变化与重力变化,与对应时间实测结果对比(表5、6)。

表 6 CORS 站网监测成果与实测成果对比检核(地面重力)/ $\mu\text{Gal}$ Tab.6 Comparison of CORS Network Monitoring Results with the Measured Results(Ground Gravity)/ $\mu\text{Gal}$ 

点名	国测一大队实测		CORS 网监测成果外推		重力变化互差	
	地面重力变化		地面重力变化			
	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10	2015-04— 2015-08	2015-04— 2015-10
CQKX	12.1	-12.8	2.1	-2.5	10.1	10.3
CQWL	-5.2	-10.5	2.8	-0.0	-8.0	-10.5
HBYC	1.0	6.4	-0.0	-3.6	1.0	10.0

从表 5、6 对比结果显示:CORS 站网监测外推结果与实测结果的大地高变化互差在 5 mm 左右,重力变化互差在 10  $\mu\text{Gal}$  左右,满足监测精度的需要。CORS 站网地壳垂直形变与地面重力变化监测外推成果具有较高的精度和一定的外推预报能力。

## 参 考 文 献

- [1] Xu Houze. Solid Earth Tide [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2010(许厚泽. 固体地球潮汐[M]. 武汉:湖北科技出版社,2010)
- [2] Guo Junyi. Fundamentals of Geophysics [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2001(郭俊义. 地球物理学基础[M]. 北京:测绘出版社,2001)
- [3] Li Hui, Shen Chongyang, Sun Shaoan, et al. Dynamic Gravity Change in Recent Years in China Continent [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 1-10(李辉, 申重阳, 孙少安,等. 中国大陆近期重力场动态变化图像[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(3):1-10)
- [4] Milly P C D, Shmakin A B. Global Modeling of Land Water and Energy Balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) Model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3(3): 283-299
- [5] Dang Yamin, Zhang Chuanyin, Chuen Junyong, et al. Modern Geodetic Datum [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2015(党亚民, 章传银, 陈俊勇, 等. 现代大地测量基准[M]. 北京: 测绘出版社, 2015)
- [6] Blewitt G. Self-consistency in Reference Frames, Geocentric Definition, and Surface Loading of the Solid Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B2): 2 103-2 133
- [7] Petit G, Luzum B. IERS Conventions 2010 [R]. IERS Technical Note, IERS Convention Centre, Paris, France, 2010
- [8] 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 J Geophys*, 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)
- [9] Kusche J, Schrama E J O. Surface Mass Redistribution Inversion from Global GPS Deformation and GRACE Gravity Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B9):409-416
- [10] Zhou Xuhua, Wu Bin, Peng Bibo, et al. Detection of Global Water Storage Variation Using GRACE [J]. *Chinese J Geophys*, 2006, 49(6):1 644-1 650(周旭华, 吴斌, 彭碧波, 等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1 644-1 650)
- [11] 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
- [12] Liu Jingnan, Zhang Huayi, Liu Yanxiong, et al. Progress of Ocean Tide Loading Inversion Based on GNSS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1):9-14(刘经南, 张化疑, 刘焱雄, 等. GNSS 研究海潮负荷效应进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(1):9-14)
- [13] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS-Derived Site Position Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B4):2 075-2 081
- [14] Tesmer V, Steigenberger P, van Dam T, et al. Vertical Deformations from Homogeneously Processed GRACE and Global GPS Long-Term Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(5): 291-310
- [15] Argus D F, Fu Y N, Landerer F W. Seasonal Variation in total Water Storage in California Inferred from GPS Observations of Vertical Land Motion [J]. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 1 971-1 980
- [16] Zhang Shiyu, Zhong Min, Tang Shihua. Vertical Crustal Displacements Due to Atmospheric Loading Effects at GPS Fiducial Stations in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12):1 090-1 093(张诗玉, 钟敏, 唐诗华. 我国 GPS 基准站地壳垂直形变的大气负荷效

- 应[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(12):1 090-1 093)
- [17] Wang Linsong, Chen Chao, Zou Rong, et al. Using GPS and GRACE to Detect Seasonal Horizontal Deformation Caused by Loading of Terrestrial Water; A Case Study in the Himalayas [J]. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(6):1 792-1 804(王林松, 陈超, 邹容, 等. 利用 GPS 与 GRACE 监测陆地水负荷导致的季节性水平形变:以喜马拉雅山地区为例[J]. 地球物理学报, 2014, 57(6):1 792-1 804)
- [18] 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)
- [19] Farrell W. Deformation of the Earth by Surface Loads [J]. *Rev Reviews of Geophysics & Space Physics*, 1972, 10(3): 761-797
- [20] Blewitt G, Clarke P. Inversion of Earth's Changing Shape to Weigh Sea Level in Static Equilibrium with Surface Mass Redistribution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B6): 2 311-2 320

## Monitoring Temporal and Spatial Changes of Crustal Deformation and Gravity Field Caused by Environmental Load in the Three Gorges Reservoir Region Based on CORS Network

ZHANG Chuanyin<sup>1</sup> WANG Wei<sup>1</sup> GAN Weijun<sup>2</sup> LI Hui<sup>3</sup> ZHANG Qingtao<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China

<sup>2</sup> Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

<sup>3</sup> Institute of Earthquake, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

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

**Abstract:** Due to the geodynamic factors, especially the earth's surface atmosphere, surface water and groundwater hydrodynamic environment, ground site location, earth gravity field and geoid level change over time. Based on the Three Gorges CORS stations network and a small number of gravity stations, the crustal deformation and monthly gravity change of the Three Gorges area from January 2011 to June 2015 are calculated and analyzed in this paper by combination of load deformation and gravity field. The results show that: (1)CORS network has the ability to monitor the vertical deformation of the crust, ground gravity and geoid change. (2)The annual variation of the crustal vertical deformation in the Three Gorges area is 36.1 mm, the annual variation range of the geoid is 28.2 mm, and the annual variation of ground gravity is 117.4  $\mu$ Gal. (3)The accuracy of ground gravity change monitoring level of CORS network is not lower than the accuracy of flow gravity field. (4)Vertical deformation and ground gravity change monitoring has a certain ability of extrapolation forecasting.

**Key words:** GNSS CORS; environmental load deformation; regional gravity field changes; the Three Gorges; crustal deformation

**First author:** ZHANG Chuanyin, PhD, professor, specializes in geodesy and earth gravity field. E-mail: zhangchy@casm.ac.cn

**Corresponding author:** WANG Wei, PhD, associate professor. E-mail: wangwei@casm.ac.cn

**Foundation support:** The National Key R&D Program of China, No.2016YFB0501702; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374081, 41304009.