



利用 CORS 站网监测温州-丽水区域环境负荷 对地壳垂直形变和重力变化的影响

毛卫华¹ 李婉秋^{2,3} 李爱勤¹ 蒋涛² 吉渊明¹ 刘立¹ 王伟²

1 浙江省测绘科学技术研究院,浙江 杭州,310012

2 中国测绘科学研究院,北京,100830

3 山东建筑大学测绘地理信息学院,山东 济南,250101

摘要:基于 CORS(continuously operating reference stations)站网综合解算,采用负荷场移去恢复技术,研究了温州-丽水区域环境负荷引起的地壳垂直形变与地面重力时空变化,并与 GRACE (gravity recovery and climate experiment)重力卫星结果进行比较。研究发现:①环境负荷对地壳垂直形变与重力变化的影响分别达到厘米和十几微伽量级,季节性变化特征显著;②冬季地壳垂直形变与重力变化分别呈现由西至东依次递减与增加趋势;③与 GRACE 结果相比,除局部区域存在差异,整体上时空变化趋势具有较高一致性;④ CORS 站网能够监测地表环境负荷引起的地壳垂直形变与重力场时空变化。该研究结果可为环境动力学研究与地质灾害监测预警提供重要参考。

关键词:CORS 站网;环境负荷;垂直形变;重力变化

中图分类号:P223

文献标志码:A

地表环境负荷迁移导致地球表层或固体地球内部质量重新分布,进而引起地表形变与重力场变化。环境负荷是指大气、地表水、地下水、海平面变化负荷之和,这些环境因素随时间动态变化^[1]。环境负荷对地表形变场与重力场变化产生综合影响,环境负荷的综合影响是诱发地质灾害的重要因素^[2]。因此,研究环境负荷影响对揭示区域地表形变与重力场变化机理及地质灾害监测预警具有重要意义。利用区域大气、地表水、地下水和海平面变化实测或模型数据可直接估算环境负荷影响。但这些环境负荷数据不可避免地存在一定误差,特别是地表水含量估算误差较大。GRACE (gravity recovery and climate experiment)重力卫星计划的出现为监测全球和区域陆地水变化提供了有效的技术手段^[3]。基于陆地水变化等效水高与弹性负荷理论,可进一步获取陆地水负荷形变及重力场变化^[4-5]。但 GRACE 卫星监测波段为中长波,加之阶次截断与空间平滑,限制反演结果空间分辨率。GNSS

精密定位可作为地表形变的高精度监测技术,通过 GNSS (global navigation satellite system) 站位置坐标非线性连续时间序列可反演陆地水变化引起的地表形变^[4,6-7],空间分辨率相比 GRACE 较高。但 GNSS 站坐标时序的非线性变化中不仅包含了地表质量负荷影响,还包含基岩热胀冷缩、校正模型适用性、相位中心模型误差等系统误差^[8-9],对于系统误差的处理仍需学者深入研究^[1]。

温州-丽水区域临近中国东南沿海,东海海平面变化对其产生负荷影响^[10]。此外,该区域水资源丰富,但极端气候频发^[11],因此多种环境负荷的动力学叠加过程复杂。目前,多数研究主要集中在分析当地气象变化方面,针对该区域的环境负荷影响研究则相对较少。

本文基于覆盖研究区及周边区域的 CORS (continuously operating reference stations) 站连续高精度坐标时序,在剔除噪声干扰与提高反演稳定性基础上,进行 CORS 站网综合解算。采用环

收稿日期:2020-01-08

项目资助:国家自然科学基金(41374081,41674024);国家重点研发计划(2016YFB0501702);中国测绘科学研究院基本科研业务费(7771806);中央级公益性科研院所基本科研业务费(AR1905)。

第一作者:毛卫华,教授级高级工程师,主要从事卫星导航定位基准、地理信息公共服务等领域研究。maoweihua@vip.qq.com

通讯作者:李婉秋,博士。24106@sdjzu.edu.cn

境负荷场移去恢复技术,从 CORS 站非线性变化时序中,移去含有误差的负荷形变,通过 CORS 站网解算地下水负荷,分离非负荷垂直形变,进一步恢复环境负荷形变场与重力变化,以揭示环境负荷迁移对研究区地壳垂直形变与重力场变化的影响特征。

1 理论方法

地表环境负荷等于大气、地表水、海平面变化与地下水变化负荷之和。每种负荷变化均可用等效水高变化表示^[12]。等效水高变化 Δh_w 引起的地面站点位置变化或地面重力变化 $\Delta\theta(\varphi, \lambda)$ 均可采用负荷格林函数积分方法进行表示,即:

$$\Delta\theta(\varphi, \lambda) = G\rho_w \frac{\Delta h_w(\varphi', \lambda')}{L} G(\psi) dS \quad (1)$$

式中, G 为万有引力常数; ρ_w 为水的密度; (φ, λ) 为地面点的地心纬度和经度; (φ', λ') 为地面流动点地心纬度和经度; L 为流动点到计算点的空间距离; S 为地球表面; ψ 为球面角距; $G(\psi)$ 为通用的负荷格林函数。

当 $\Delta\theta$ 分别为地面大地高变化和地面重力变化时, 径向格林函数 $G^r(\psi)$ 与重力格林函数

$$\Delta h_w(\varphi, \lambda) = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm}^q \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm}^q \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \quad (4)$$

依据地球弹性负荷与地球重力场理论, 地面等效水高变化引起的地面站点垂直形变和重力

$$\begin{cases} \Delta r(\varphi, \lambda) = 3 \frac{\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{\gamma R} \sum_{n=1}^N \frac{h'_n}{2n+1} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm}^q \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm}^q \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \\ \Delta g(\varphi, \lambda) = -3 \frac{\rho_w}{\rho_e} \frac{GM}{R^2} \sum_{n=1}^N \frac{n+2h'_n-(n+1)k'_n}{2n+1} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm}^q \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm}^q \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, $(\Delta C_{nm}^q, \Delta S_{nm}^q)$ 为规格化的 n 阶 m 次负荷球谐系数变化量; $\bar{P}_{nm}(\cdot)$ 为规格化的 n 阶 m 次缔合勒让德函数; h'_n 为 n 阶径向负荷勒夫数; k'_n 为 n 阶位负荷勒夫数; $\rho_e \approx 5.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为地球平均密度。

从区域实测或模型数据(比如大气压模型与实测资料、全球土壤水模型、卫星测高数据)中“移去”球谐分析法(即大气模型、土壤水模型、卫星测高数据经球谐展开得到的球谐系数)计算全球数据等效水高,得到每种负荷的区域残差等效水高格网,进而利用格林积分函数法计算残差负荷影响,“恢复”球谐分析法得到的相同位置对应负荷的地表形变与重力场变化,实现移去-恢复。通过移去-恢复法可提高全球数据在局部区域的适用度。

$G^s(\psi)$ 可表示为:

$$\begin{cases} G^r(\psi) = \frac{R}{M} \sum_{n=1}^{\infty} h'_n P_n(\cos\psi) \\ G^s(\psi) = -\frac{\gamma}{M} \sum_{n=1}^{\infty} (n-(n+1)k'_n + 2h'_n) P_n(\cos\psi) \end{cases} \quad (2)$$

式中, R 为地球平均半径。

将式(2)代入式(1), 可将 CORS 站 (φ, λ) 大地高变化 Δr 表示为:

$$\Delta r = G\rho_w \iint_s \frac{\Delta h_w(\varphi', \lambda')}{L} G^r(\psi) dS + \epsilon \quad (3)$$

式中, ϵ 为被分离的非负荷垂直形变(包括构造垂直形变与地下水均衡垂直形变)。由于研究区降水量充沛,地下水均衡效果不明显,加上构造垂直形变在研究区很小, 本文将 ϵ 视为随机噪声。

利用 CORS 站网残差大地高变化 Δr (此步可称为“移去”)可综合解算残差等效水高变化 Δh_w (地下水等效水高); 反之已知残差等效水高 Δh_w , 便可利用格林函数积分法计算出 Δr 与 Δg , 进一步回加球谐系数分析法对应结果, 实现“恢复”。

球谐分析法体现在地面等效水高 Δh_w 的规格化球谐展开, 展开式如下:

变化可表示为:

2 采用的数据

2.1 CORS 站数据

本文 CORS 站数据来自浙江省 2015—2017 年的连续 GNSS 观测。数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件为主, 通过对每站逐日的 GNSS 观测量数据解算(包括观测站位置、接收机钟差与卫星钟差等在内的多种参数), 获得测站和卫星轨道的单天区域松弛解, 利用 GLOBK 软件进行整网平差, 得到 ITRF(international terrestrial reference frame) 2008 框架下的站点坐标变化时间序列。CORS 站解算时采用 IERS 2010 协议进行地球动力学改正, 其中的固体潮、海潮、周日与半日大气潮负荷影响已被移除^[13]。温州-丽水及周边区域 CORS 站位置分布如图 1 所示。

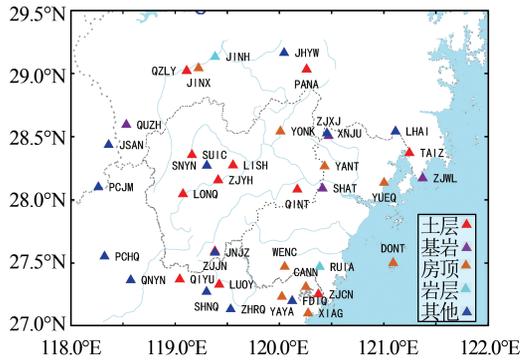


图1 温州-丽水及周边区域 CORS 站位置分布图

Fig.1 Location of CORS Stations in Both Wenzhou-Lishui, and Their Surrounding Region

2.2 大气压资料

全球大气压模型数据采用ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的再分析地表气压产品资料,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,每月一值(下载地址:<https://www.ecmwf.int/>)。区域大气压月变化数据来自浙江地区98个气象站每日实测数据的月平均结果^[14](下载地址:<http://data.cma.cn/>)。时段为2015-01—2017-12。

2.3 全球土壤水模型

全球陆地信息模型 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 由美国宇航局哥达航空中心和美国国家环境预报中心共同建立^[15],反映陆地表面土壤水和冰雪变化(下载地址:<https://mirador.gsfc.nasa.gov/>)。空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,每月一值,从2015-01—2017-12,包括NOAH、VIC、CLM、MOSAIC 4种陆地表面模式。本文地表水负荷影响采用NOAH土壤水模式进行计算。

2.4 卫星测高数据

卫星测高数据采用AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanography) 提供的月平均海面高异常MSLA (Monthly Mean Maps of Sea Level Anomaly) 格网数据(下载地址:<https://www.aviso.altimetry.fr/>)。空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,每月一值。数据融合了TOPEX/Poseidon、Jason-1/2和Envisat等多颗卫星的测高数据,并进行了必要的地球物理改正,包括潮汐改正、逆气压计改正等^[16]。本文所使用的MSLA数据的时间跨度与前面数据相同。

2.5 GRACE 卫星重力数据

卫星重力数据采用美国德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, University of Texas at Austin, CSR) 于2018年4月最新发布

的GRACE重力反演与气候实验卫星level-2 (RL06)月重力场模型数据。该数据为正则化球谐系数,扣除了固体潮、海潮、固体极潮、非潮汐大气和海洋影响,以及由于日月等其他行星引起的重力扰动。RL06版本的月重力场模型数据时间序列反映了相同的地表质量重分布过程,包括水文学、冰冻圈过程以及海洋和大气背景场相关的变化。由于RL06新产品在参数选择、处理算法、数据编辑及背景场引力模型等方面有所改进,相对RL05产品精度上有一定提升^[17]。

3 结果与分析

本文基于温州-丽水区域CORS站网,结合大气、地表水和海平面变化等资料,采用卫星精密定位、地表负荷形变与重力场移去-恢复方法^[18],确定2015-01—2017-12研究区地表环境负荷引起的地壳垂直形变与重力变化。时间基准为36个月平均值,空间分辨率为 $1' \times 1'$,时间间隔为1个月。

首先利用移去-恢复方法分别计算大气负荷、土壤水负荷以及海平面变化负荷影响。为了减小边界效应影响,本文选择大于温州-丽水边界的矩形范围作为计算区域,空间范围为 $118.5^{\circ}E \sim 121.5^{\circ}E, 27.0^{\circ}N \sim 29.2^{\circ}N$,空间分辨率为 $1' \times 1'$ 。表1统计了2015—2017年3种负荷引起的地壳垂直形变与重力变化的最大与最小值等信息。

本文认为长周期占优的信号不宜用标准差表示其统计性质,这里用年变化幅度表示其周期信号特征。图2给出了两个CORS站的大地高月变化以及3种负荷引起的地壳垂直形变时序曲线。

从表1和图2可以发现,相比土壤水与海平面变化负荷,大气负荷引起的地壳垂直形变特征比较突出,变化特征以周年信号为主。大气与土壤水负荷对研究区整体的地壳垂直形变影响接近零,海平面变化对区域整体存在负影响。其中大气负荷对垂直形变最大影响值接近7 mm,年变化幅度可达12.4 mm,海平面变化对重力变化最大影响接近 $15 \mu Gal$ 。但土壤水负荷产生的影响均相对较小。

CORS站网综合解算地下水采用的观测量是基于非线性大地高变化获取的。由于CORS站实测大地高时序中包含线性变化与非线性变化,本文移除其线性变化得到非线性变化量。进一步从非线性变化中移去测站的大气、土壤水与海平面变化负荷垂直形变影响,得到CORS站残差大地高月变化,组成式(3)中的 Δr 残差观测方程,进而利用CORS站网综合解算。大地高月变化时序可通过FFT全频谱分析重构获得。在综合

解算中,根据文献[19]中的原理,利用高斯函数配置平滑系数,以加快收敛速度,采用较小积分半径(如 100~200 km),并增加积分半径外的零影响约束,提高残差负荷确定的稳定性,利用正则化方法解算法方程组,确定地下水储量变化格

网。其中不满足格林积分方程的残余量视为非负荷垂直形变被分离掉(如式(3)所述),不予考虑。进一步采用格林函数积分法计算地下水负荷影响。地下水负荷引起的地壳垂直形变与重力变化,分别如图 3 和图 4 中的 2016 年结果所示。

表 1 温州-丽水区域 2015—2017 年 3 种负荷引起的地壳垂直形变与重力变化统计

Tab.1 Statistics of Crustal Vertical Deformation and Gravity Change Caused by Three Loads in Wenzhou-Lishui Region in 2015—2017

大地测量要素非潮汐变化	大气负荷影响			土壤水负荷影响			海平面变化影响	
	最大/最小值	均值/标准差	年变化幅度	最大/最小值	均值/标准差	年变化幅度	最大/最小值	均值/标准差
垂直形变/mm	6.86/-6.85	-0.00/4.33	12.4	2.72/-2.22	-0.00/0.92	3.5	1.26/-8.77	-2.23/1.38
重力变化/ μGal	6.57/-6.64	0.00/3.82	12.1	4.24/-6.06	0.00/1.32	5.2	15.23/-6.16	-0.54/1.72

注:年变化幅度为每年中最大值与最小值之差的平均值

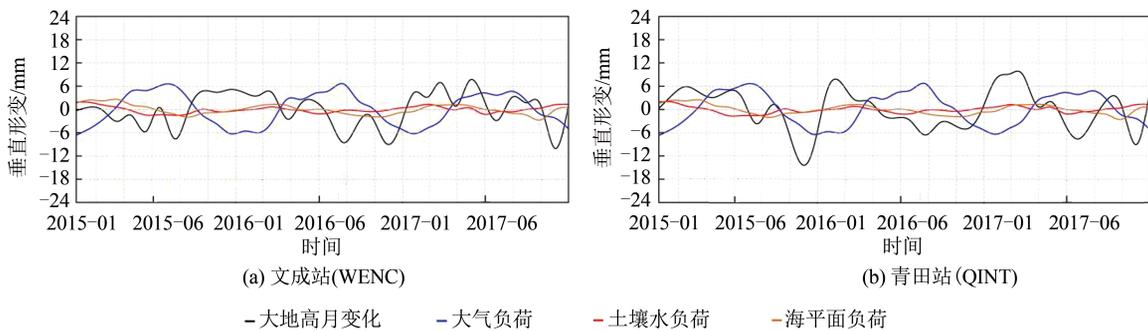


图 2 CORS 站大地高月变化及 3 种负荷对地壳垂直形变的影响

Fig.2 The Monthly Geodetic Height Change of CORS and the Effect of Three Loads on Crustal Vertical Deformation

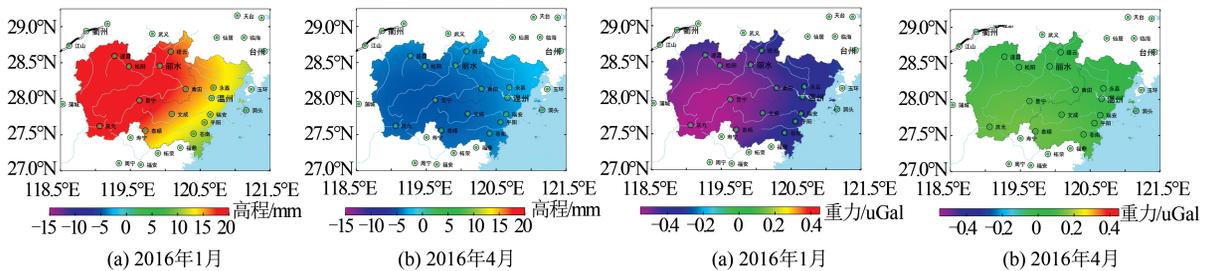


图 3 地下水负荷对温州-丽水区域地壳垂直形变的影响
Fig.3 Influence of Underground Water Load on Crustal Vertical Deformation in Wenzhou-Lishui Region

图 4 地下水负荷对温州-丽水区域地面重力变化的影响
Fig.4 Influence of Underground Water Load on Gravity Change in Wenzhou-Lishui Region

综合分析地下水负荷影响格网时间序列可以发现,地下水负荷引起的地壳垂直形变与重力变化具有一定负相关性。在冬、春、夏、秋季,地面先后出现大幅上升、微弱下降、小幅回弹的空间特征;同时地面重力则呈现相反的变化,分别为大幅下沉与小幅上升。统计 36 个月变化结果,如表 2 所示。

根据表 2 可知,地下水负荷引起的地壳最大上升值为 20.50 mm,最大沉降值为 15.43 mm,年变化幅度为 28.60 mm。同期地面重力变化最大增加量为 0.44 μGal ,最大减小量为 0.59 μGal ,年

变化幅度为 0.80 μGal 。

表 2 温州-丽水区域 2015—2017 年地下水负荷垂直形变与重力变化统计

Tab.2 Statistics of Crustal Vertical Deformation and Gravity Change in Wenzhou-Lishui Region in 2015—2017

影响类型	最大值	最小值	年变化幅度
地壳垂直形变/mm	20.50	-15.43	28.60
地面重力变化/ μGal	0.44	-0.59	0.80

地表环境负荷影响是在解算的地下水变化负荷基础上,回加大气压、土壤水、海平面变化通

过移去-恢复方法计算的负荷影响,以分析区域环境负荷对地壳垂直形变与重力变化的影响特征。为了分析环境负荷在周年尺度上的空间变化特

征,本文给出了2017年1月、4月、7月、10月地壳垂直形变和重力变化的环境负荷影响,分别如图5和图6所示。

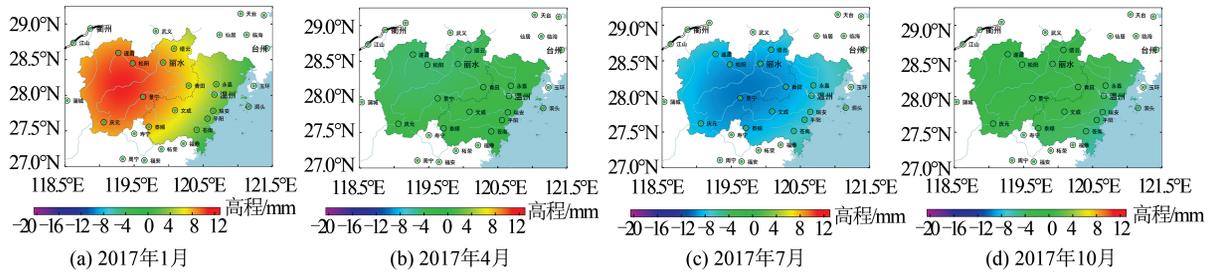


图5 地表环境负荷对温州-丽水区域地壳垂直形变的影响

Fig.5 Influence of Surface Environmental Load on Crustal Vertical Deformation in Wenzhou-Lishui Region

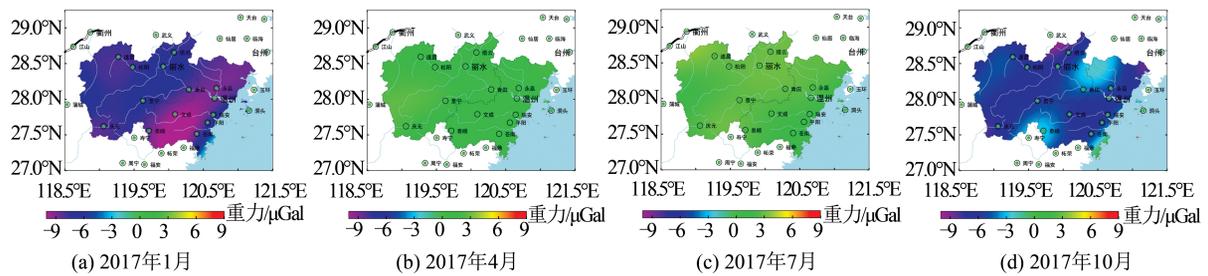


图6 地表环境负荷对温州-丽水区域地面重力变化的影响

Fig.6 Influence of Surface Environmental Load on Gravity Change in Wenzhou-Lishui Region

图5显示地表环境负荷对地壳垂直形变的影响年变化趋于平衡。分析36个月格网时间序列可以发现,每年冬季,研究区环境负荷变化引起地面明显抬升,对垂直形变影响呈现由西至东依次递减的空间分布特征;每年夏季,地面出现下沉。这种显著的季节性变化可能与降雨有关。相比之下,春季与秋季研究区的环境负荷对地壳垂直形变的影响则较小。由图6可知,冬季研究区环境负荷变化导致了地面重力存在不同程度的减小,靠近沿海地区减小程度明显加剧;夏季地面重力影响则表现出小幅增加。可以发现,研究区地表环境负荷变化导致的地壳垂直形变与重力变化存在关联性。

变在近3年内波动较大。特别是8个CORS站处垂直形变时序曲线均在2015年12月出现下降突变,可能与此时地面环境负载质量较大或原始测站数据解算有关。2017年2月左右,地壳出现明显隆升;接近4月,这种隆升程度逐渐减缓;2017年下半年,地壳垂直方向发生不同程度的起伏变化。

为了进一步分析地壳垂直形变与重力变化影响之间的关系,将环境负荷影响格网时序在CORS站点位置进行内插,获取CORS站环境负荷影响变化时序。同时考虑选择的站点应均匀覆盖研究区,本文给出了永康(YONK)、龙泉(LONQ)、文成(WENC)、乐清(YUEQ)、丽水(LISH)、青田(QINT)、临海(LHAI)、浙江景宁(ZJJN)共8个CORS站点处的环境负荷地壳垂直形变与重力变化影响,如图7中的黑色和蓝色曲线所示。

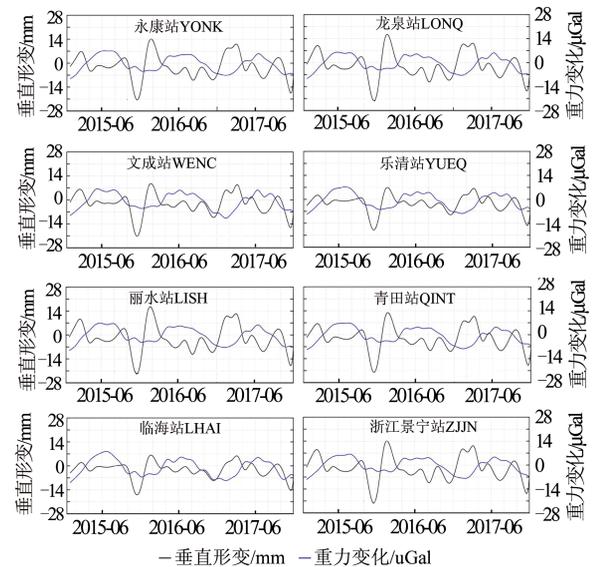


图7 地表环境负荷对CORS站位置处的地壳垂直形变与重力变化影响

Fig.7 Influence of Surface Environmental Load on Crustal Vertical Deformation and Gravity Change at CORS Position

图7显示,环境负荷变化引起的地壳垂直形

综合 8 个 CORS 站地面重力变化影响时序,可以看出 3 年内环境负荷迁移引起的地面重力变化相对平稳,周年特征比较显著。此外还可以发现,除局部时段外,在整体时间尺度上,地壳垂直形变时序特征与重力变化之间具有明显的规律性,即地面下沉,重力增大;地面回弹,重力减小。

为了定量分析环境负荷对地壳垂直形变与重力变化的影响,本文对 2015—2017 年地壳垂直形变与重力变化影响的空间格网进行统计,如表 3 所示。

表 3 温州-丽水区域 2015—2017 年地表环境负荷影响统计
Tab.3 Statistics of the Impact of Total Surface Environmental Load in Wenzhou-Lishui Region in 2015—2017

影响类型	最大值	最小值	年变化幅度
地壳垂直形变/mm	13.12	-20.39	26.6
地面重力变化/ μGal	9.00	-10.78	17.9

由表 3 可知,地表环境负荷引起的地面最大隆升为 13.12 mm,地面重力减小 10.78 μGal ;引起的地面最大下沉为 20.39 mm,地面重力增加

9 μGal ;年变化幅度分别为 26.6 mm、17.9 μGal 。表明环境负荷对地壳垂直形变与重力变化的影响分别达到厘米与十几微伽量级。

4 与 GRACE 结果比较

针对 GRACE 位系数的高频噪声与相关误差,本文采用去相关滤波 P3M15 与 300 km Fan 组合滤波进行处理^[20-21]。由于 GRACE 数据时段更新至 2016 年 12 月,本文采用 2015-01—2016-12 的月重力场模型计算温州-丽水区域 1'×1' 的地表负荷变化对地壳垂直形变与重力变化影响。GRACE 的低阶项 C_{20} 可使用卫星激光测距 SLR 数据替换^[22]。同时扣除 2015 年 1—3 月平均值获得月重力场相对变化量,计算中缺失月份暂不考虑。

为方便比较,本文给出了 2015 年与 2016 年 3 月、7 月地表环境负荷变化引起的地壳垂直形变与重力变化空间分布。图 8 为 GRACE 重力卫星监测的地壳垂直形变,地面重力变化如图 9 所示。

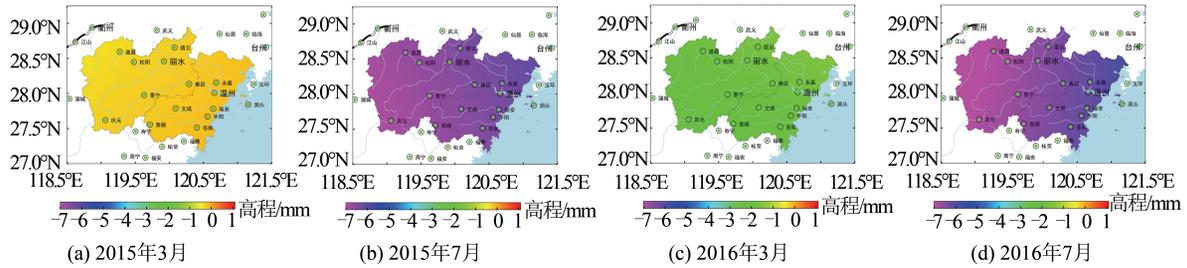


图 8 GRACE 重力卫星监测的温州-丽水区域地壳垂直形变

Fig.8 Crustal Vertical Deformation in Wenzhou-Lishui Region Monitored by GRACE Gravity Satellite

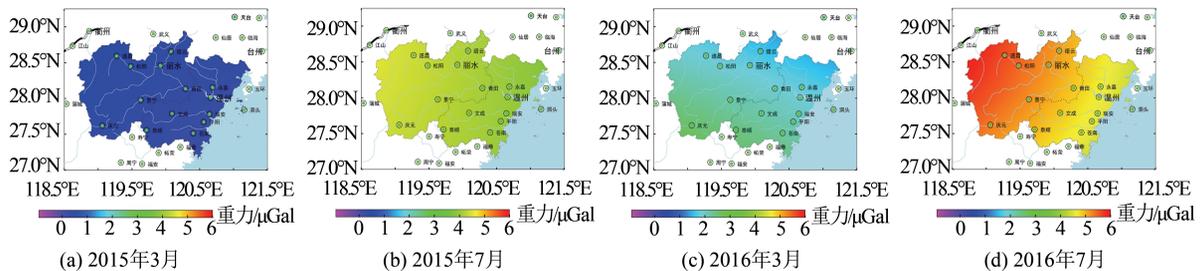


图 9 GRACE 重力卫星监测的温州-丽水区域地面重力变化

Fig.9 Gravity Change in Wenzhou-Lishui Region Monitored by GRACE Gravity Satellite

由于 GRACE 月重力场模型数据不含大气负荷影响,为了增强两种结果对比的可靠性,本文从 CORS 站网监测的环境负荷形变结果中移去大气负荷影响,再与 GRACE 结果进行逐月比较,分析 CORS 站网监测研究区环境负荷形变场与重力场变化的可靠性。图 10 和图 11 分别为同期 CORS 站网监测的地壳垂直形变与重力变化时空

分布。

从图 8 和图 10 可知,GRACE 和 CORS 站网监测结果显示 2015 年春季地壳垂向信号均变化较弱;同时也都监测出夏季地面发生大幅下沉。2016 年春季,地面沉降的程度减缓,接近夏季,地面沉降幅度均有所增强。GRACE 监测的两年内春季信号幅值约在 -2~0 mm 范围内,夏季信号

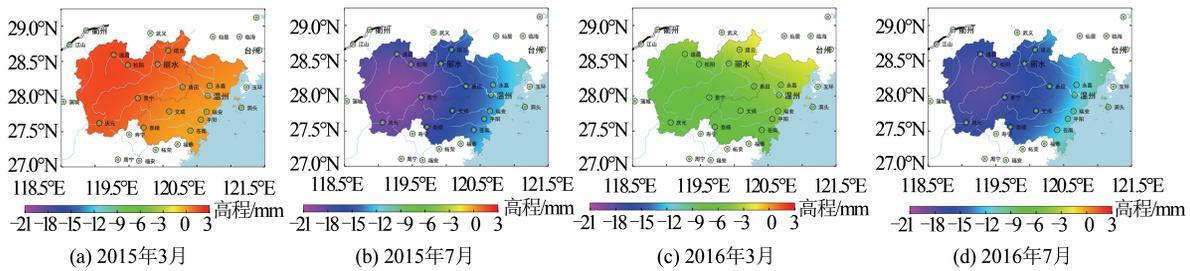


图10 CORS站网监测的环境负荷变化对温州-丽水区域地壳垂直形变的影响

Fig.10 Influence of Environmental Load Changes on Crustal Vertical Deformation in Wenzhou-Lishui Region Monitored by CORS Network

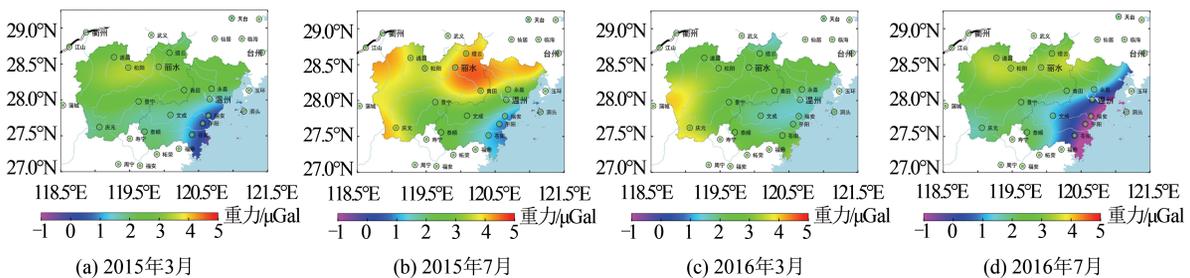


图11 CORS站网监测的环境负荷变化对温州-丽水区域地面重力变化的影响

Fig.11 Influence of Environmental Load Changes on Gravity Change in Wenzhou-Lishui Region Monitored by CORS Network

幅值约在 $-7\sim-6$ mm范围内;CORS网监测的春季信号约在 $-6\sim 0$ mm范围内,夏季信号约在 $-19\sim-9$ mm范围内。比较图8和图10可知,两种方法监测的环境负荷地壳垂直形变总体上具有较一致的季节性变化特征。

从图9和图11可知,GRACE监测结果显示2015年春季与夏季地面重力先呈现小幅增加而后大幅升高,与CORS站网结果比较吻合。相比2015年春季,2016年同期GRACE与CORS站网监测的地面重力明显增大。比较2016年7月两种监测结果可以发现,该时段内GRACE与CORS站网监测的地面重力空间分布均表现由内陆至沿海方向逐渐递减的趋势。

上述分析结果表明,CORS站网与GRACE监测的地壳垂直形变与重力变化总体上具有较为一致的时空分布规律。二者不一致性可能由于空间分辨率差别,以及在CORS站网综合解算时忽略了地下水均衡效应和构造形变影响所导致^[23]。

5 结语

本文基于大气压气象站实测及全球模型数据、土壤水全球模型以及卫星测高数据,采用移去-恢复方法与CORS站网综合解算相结合,分析

温州-丽水区域地表环境负荷引起的地壳垂直形变与重力变化特征,并与GRACE结果进行比较。研究发现:

1)CORS站网能够监测地表环境负荷引起的地壳垂直形变与重力场时空变化。与GRACE卫星重力结果相比,除局部区域存在差异,二者总体上的时空变化趋势具有较高的一致性。

2)在时间分布上,地表环境负荷变化导致的地壳垂直形变与重力变化均具有显著季节性变化特征。二者之间规律性较明显,即地面下沉,重力增大;地面回弹,重力减小。冬季环境负荷影响空间分布特征较突出,均呈现由西至东依次递减与增加趋势。

3)通过CORS站负荷形变信息的有效分离,可提高CORS站网监测地壳垂直形变及重力变化的能力和时空灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Hongfei, et al. Cause Analysis of the Non-Linear Variation of the IGS Reference Station Coordinate Time Series Inside China [J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(7): 2 228-2 237 (姜卫平, 李昭, 刘鸿飞, 等. 中国区域IGS基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(7):2 228-2 237)

- [2] Ju Huiyang, Gu Renjie. Basic Theory on Study of Geological Calamities-Theory of Environmental Factors Control [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1994, 3(4):15-22(居恢扬, 顾仁杰. 地质灾害研究的基础理论:环境因素控制论[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(4):15-22)
- [3] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9):4-5
- [4] Dam V, Wahr J, Lavallée D. A Comparison of Annual Vertical Crustal Displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B3):200-203
- [5] Khan S A, Wahr J, Bevis M, et al. Spread of Ice Mass Loss into Northwest Greenland Observed by GRACE and GPS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6):460-472
- [6] Bevis M, Alsdorf D, Kendrick E, et al. Seasonal Fluctuations in the Mass of the Amazon River System and Earth's Elastic Response [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(16): L16308
- [7] Wang Linsong, Chen Chao, Zou Rong, et al. Using GPS and GRACE to Detect Horizontal Deformation Caused by Loading Terrestrial Water: A Case Study in the Himalayas [J]. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(6):1 792-1 804(王林松, 陈超, 邹蓉, 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)
- [8] 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: Solid Earth*, 2002, 107(B4):ETG-1-ETG 9-16
- [9] Yan H M, Chen W, Zhu, Y Z, et al. Contributions of Thermal Expansion of Monuments and Nearby Bedrock to Observed GPS Height Changes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13):88-97
- [10] Zhou Dongxu, Zhou Xinghua, Zhang Huayi, et al. Analysis of the Vertical Deformation of China Coastal Tide Stations Using GPS Continuous Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4):516-522(周东旭, 周兴华, 张化疑, 等. 利用 GPS 连续观测进行中国沿海验潮站地壳垂直形变分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(4):516-522)
- [11] Li Shaokui. Analysis of Extreme Climate Events and Its Causes in Yangtz River Delta Region [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014(李少魁. 长江三角洲地区极端气候事件及其成因分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014)
- [12] Wu X P, Heflin M B, Ivins E R, et al. Seasonal and Interannual Global Surface Mass Variations from Multisatellite Geodetic Data [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(B9): B09401
- [13] Petit G, Luzum B. IERS Conventions 2010. International Earth Rotation and Reference Systems Service [R]. IERS Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010
- [14] Wang Wei, Zhang Chuanyin, Yang Qiang, et al. Impact of Atmospheric Pressure Loading on Regional Crustal Deformation and Gravity Change [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9):1 302-1 308(王伟, 章传银, 杨强, 等. 大气负荷对区域地壳形变和重力变化的影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1 302-1 308)
- [15] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The Global Land Data Assimilation System [R]. Bull Amer Meteor SOC, 2004, 85(3): 381-394
- [16] Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, et al. A New Assessment of the Error Budget of Global Mean Sea Level Rate Estimated by Satellite Altimetry over 1993-2008 [J]. *Ocean Science*, 2009, 5(2):193-201
- [17] Save H, CSR Level-2 Team. "GRACE RL06 Reprocessing and Results from CSR" EGU2018-10697 [R]. EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, 2018
- [18] Zhang Chuanyin, Wang Wei, Gan Weijun, et al. Monitoring Temporal and Spatial Changes of Crustal Deformation and Gravity Field Caused by Environmental Load in the Three Gorges Reservoir Region Based on CORS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9):1 287-1 294(章传银, 王伟, 甘卫军, 等. 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[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1 287-1 294)
- [19] Argus D F, Fu Y, Landerer F W. Seasonal Variation in Total Water Storage in California Inferred from GPS Observations of Vertical Land Motion [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 1 971-1 980
- [20] Han S C, Shum C K, Jekeli C, et al. Non-Isotropic Filtering of GRACE Temporal Gravity for Geophysical Signal Enhancement [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(1): 18-25

- [21] Zhang Z, Chao B F, Yang L, et al. An Effective Filtering for GRACE Time-Variable Gravity: Fan Filter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): 1 397-1 413
- [22] Cheng M, Tapley B D. Variations in the Earth's Oblateness During the Past 28 Years [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2005, 110(B9): 1 404-1 406
- [23] Wang Wei, Dang Yaming, 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表形变和重力变化的影响[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(3):962-971)

Monitoring of Crustal Vertical Deformation and Gravity Change Caused by Environmental Load in Wenzhou-Lishui Region Using CORS Network

MAO Weihua¹ LI Wanqiu^{2,3} LI Aiqin¹ JIANG Tao² JI Yuanming¹ LIU Li¹ WANG Wei²

¹ Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou 310012, China

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

³ School of Surveying and Geo-Informatic, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: Based on the comprehensive calculation of CORS network, this paper uses the load field removal-recovery technology to study the crustal vertical deformation and ground gravity spatio-temporal changes caused by environmental load in Wenzhou-Lishui region and compares it with GRACE gravity satellite results. Some conclusions are drawn as follows: ① The effects of environmental load on the vertical deformation and gravity change of crust are up to the centimeter and ten micro-gauge levels, respectively, and the seasonal variation characteristics are significant. ② The vertical deformation and gravity change in winter show a decreasing and increasing trend from west to east, respectively. ③ Compared with GRACE results, in addition to local region differences, the overall trend of spatiotemporal changes has a higher consistency. ④ The CORS network can monitor the spatiotemporal changes of crustal vertical deformation and gravity field caused by total surface environmental load. The research methods and results of this paper can provide an important reference for environmental dynamics research and geological disaster monitoring and early warning.

Key words: CORS network; environmental load; vertical deformation; gravity change

First author: MAO Weihua, professor-level senior engineer, specializes in satellite navigation positioning reference and geographic information public services. E-mail: maoweihua@vip.qq.com

Corresponding author: LI Wanqiu, PhD. E-mail: 24106@sdjzu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41374081, 41674024); the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0501702); Fundamental Research Funds for Chinese Academy of Surveying and Mapping (7771806); Fundamental Research Funds for Welfare Scientific Research Institutes of Central Level (AR1905).

引文格式: MAO Weihua, LI Wanqiu, LI Aiqin, et al. Monitoring of Crustal Vertical Deformation and Gravity Change Caused by Environmental Load in Wenzhou-Lishui Region Using CORS Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1508-1516. DOI:10.13203/j.whugis20190004(毛卫华, 李婉秋, 李爱勤, 等. 利用 CORS 站网监测温州-丽水区域环境负荷对地壳垂直形变和重力变化的影响[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(10):1508-1516. DOI:10.13203/j.whugis20190004)