

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.10

# CORS 网和 GNSS 技术在地面变形监测中的应用

## ——以浙江东南部为例

王 伟<sup>1,2</sup>, 党亚民<sup>1</sup>, 章传银<sup>1</sup>, 杨 强<sup>1</sup>

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用  
重点实验室, 广东 广州 510300)

**摘要:**地面变形对工程建设安全稳定具有一定影响,对工程建设规划、地质灾害防治等具有重要意义。本文利用卫星导航定位基准站(CORS)网全球卫星导航系统(GNSS)连续观测,实现了区域地面大地高、地面重力和地倾斜变化面的监测,通过与部分地质灾害信息进行时空分析,确定了用于地面稳定性变化分析的要素和权重,进而定量分析了地面稳定性变化。该方法在浙江省东南部地区进行了测试验证,获得了较好的效果。利用CORS网连续观测能够定量监测地面变形整个面的变化,分析区域地面稳定性变化情况,可为区域规划和地质灾害防治提供技术支持和参考。

**关键词:**地面形变监测;稳定性变化;GNSS连续观测;CORS网;负荷形变

**中图分类号:** P228.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-8035(2021)02-0073-05

## Application of CORS network and GNSS technology in ground deformation monitoring: Taking southeast Zhejiang Province as an example

WANG Wei<sup>1,2</sup>, DANG Yamin<sup>1</sup>, ZHANG Chuanyin<sup>1</sup>, YANG Qiang<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental  
Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resource, Guangzhou, Guangdong 510300, China)

**Abstract:** Ground deformation has a certain impact on the safety and stability of engineering construction, and is of great significance to engineering construction planning and geological disaster prevention. This paper uses the continuous observation of the Global Navigation Satellite System (GNSS) of Continual Operating Reference Station (CORS) network to realize the monitoring of regional ground height, ground gravity and ground tilt changes. Through the time and space analysis with part of the geological disaster information, it is determined the factors and weights used in the analysis of ground stability changes, and then quantitative analysis of ground stability changes. This method has been tested and verified in the southeast region of Zhejiang province, and good results have been obtained. Continuous observation using the CORS network can quantitatively monitor the changes of the entire surface of ground deformation, analyze changes in regional ground stability, and can provide technical support and reference for regional planning and geological disaster prevention.

**Keywords:** ground deformation monitoring; ground stability change; GNSS continuous observation; CORS network; load deformation

收稿日期: 2020-05-14; 修订日期: 2020-07-28

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金课题(MESTA-2020-A001); 国家自然科学基金项目(41974010; 41874022)

第一作者: 王 伟(1981-),男,山东临沂人,博士,副研究员,主要从事垂直基准和形变监测方面的研究。E-mail: wangwei@casm.ac.cn

## 0 引言

地面变形对工程建设安全稳定具有一定影响,对工程建设规划、地质灾害防治等具有重要意义。地面变形剧烈地面稳定性下降,若遇到极端天气、潮汐大潮等动力环境异常情况,容易诱发地质灾害。因此,对区域地面变形监测和地面稳定性变化的定量分析意义重大。

对于地面形变监测,有水准复测、GNSS 监测网和 InSAR 监测等技术和手段<sup>[1]</sup>。水准复测技术简单,但工作量大、复测周期长。GNSS 监测网以点监测为主,在面监测上还有不足。InSAR 监测具有大覆盖、高分辨率的特点,但技术要求高、花费成本较高。对于稳定性的定量研究方面,有因子分析法、模糊数学方法、证据权重法等多种方法,考虑的影响因素也有不同,使定量分析评价结果产生差别<sup>[2-5]</sup>。稳定性分析和评价正在不断完善,向着定量化、综合化,并与多种自然科学相融合、交叉的方向发展<sup>[6]</sup>。随着观测手段和观测技术的提高,地面稳定性变化的动态监测将成为可能,为灾害分析和预测等提供更好的支持<sup>[7-8]</sup>。气候和地球表层水文环境的改变,引起地面形变和重力变化,可导致区域地面稳定性变化。地面形变和重力变化等是各种动力环境因素的综合响应,监测分析地面形变和重力变化等情况,并建立与地面稳定性的量化关系,就可定量分析地面稳定性变化。

卫星导航定位基准站(Continuously Operating Reference Station, CORS)可以实现对站点的地面形变进行连续观测。利用 CORS 网连续 GNSS(Global Navigation Satellite System)观测成果,结合大气、地表水和海平面变化观测资料,可实现区域地面形变及重力变化等的高精度连续监测<sup>[9-11]</sup>。本文利用 CORS 网连续观测,实现区域地面形变场和重力场变化监测,通过与地质灾害信息进行时空分析,确定用于地面稳定性变化分析的要素和权重,进而定量分析地面稳定性变化。

## 1 方法和数据

### 1.1 基于 CORS 网的区域地面形变场和重力场变化监测

CORS 网连续观测解算得到的是各站点的大地高变化,如果直接进行数据拟合内插只能获得区域大地高变化结果,而且分辨率和精度比较低。受大陆水、大气压及海平面变化等地表负荷变化影响,CORS 站点的大地高随时间变化。根据固体地球负荷形变理论,负荷引起的大地高变化满足负荷格林函数积分<sup>[12]</sup>。

$$H_t = \rho_w \int_S h_w G'(\Psi) dS \quad (1)$$

式中:  $H_t$ ——计算点处的地面大地高变化;

$\rho_w$ ——水的密度;

$h_w$ ——等效水高度变化;

$G'(\Psi)$ ——地面径向负荷格林函数;

$\Psi$ ——球面角距;

$S$ ——地表面积。

以 CORS 站网大地高变化为观测量,通过动力学同化和参数估计算法,可求解地面负荷等效水高变化。有了地面等效水高变化,就可按负荷形变理论,计算区域地面大地高、正常高、重力和地倾斜等各种大地测量参数的负荷影响变化。为了提高区域形变场监测的空间分辨率和可靠性,可进行大气和土壤水等已知负荷的移去恢复,利用残余大地高作为观测量进行计算<sup>[10]</sup>。

### 1.2 定量分析区域地面稳定性变化的方法

一段时间内,当某地的地面大地高、地面重力或地倾斜变化频繁,或变化幅度较大,则该地方的稳定性必然较低<sup>[7]</sup>。大地高变化主要反映了垂直方向上的地面形变,空间作用范围较大,随距离成反比衰减。重力变化主要受计算点距离较近地表负荷影响,时间上比较敏感。地倾斜变化是不同方向上变化情况的反映。因此,综合利用大地高、重力或地倾斜等的时空变化监测成果,可定量估计监测时间范围内区域地面稳定性变化。

将各种负荷影响的大地高变化、重力变化和地倾斜变化等与地质灾害事件进行空间上的对比分析。以地面稳定性降低与已有地质灾害事件的一致性为优化目标,确定选取典型的要素类型,并确定相应的权重关系。因此,区域地面稳定性变化的定量评价  $P$  可表示为:

$$P = q_1 X_1 + q_2 X_2 + \dots + q_n X_n \quad (2)$$

式(2)中  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为用于评价的大地测量观测要素,  $q_1, q_2, \dots, q_n$  为各要素所占的权重。

## 2 结果与分析

本文利用浙江东南部 38 座 CORS 站网 2015—2017 年的连续观测数据,结合大气压数据、土壤水模型数据和海平面月变化格网时序,在分离 CORS 站大地高线性变化基础上,利用格林函数积分方法,计算大气、土壤水和海平面变化的模型负荷影响<sup>[10]</sup>。采用已有负荷移去恢复法,利用公式(1)计算等效水高,进一步计算重力变化和地倾斜变化,获得地面大地高变化、重力变化和地倾斜变化向量格网时序,空间分辨率为  $2' \times 2'$ ,时间分辨率为 1 月。

地表总负荷变化对地面大地高变化、重力变化、地倾斜的影响如图 1 所示。图 1 中的一些细线和虚线分

别是河流和地理区划。图1(a)(b)是大地高变化,在2月份大地高变化普遍大于0,8月份普遍小于0,主要

受降水影响,沿海地区受海平面变化影响明显。图1(c)(d)是地面重力变化,半年的变化量约在15  $\mu$ Gal。图1(e)

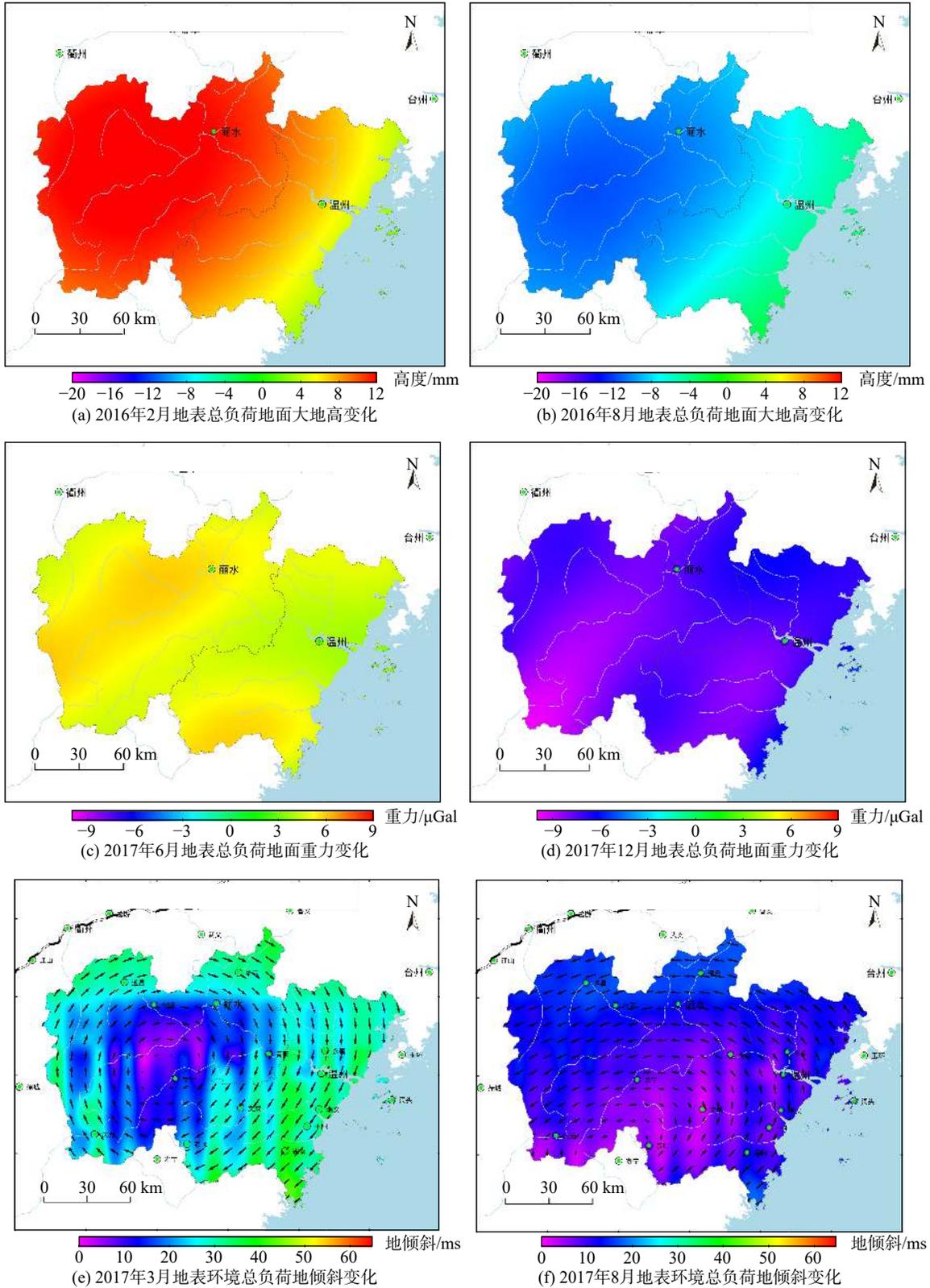


图1 负荷变化对大地高、地面重力和地倾斜变化的影响

Fig. 1 Effect of loading changes on ground height, ground gravity and ground tilt

(f)是地倾斜变化情况,箭头方向代表地倾斜的水平方向,颜色代表了地倾斜的大小。

综上所述,利用 CORS 网 GNSS 连续观测,可实现地面变形面的观测,有负荷形变理论,可进一步获得地面负荷重力变化和地倾斜变化等。利用地面形变监测各种量的变化情况,可对地面稳定性变化进行评估。

根据不同负荷形变计算公式和性质,大地高变化、地面重力变化或地倾斜变化,对检测地面稳定性变化的敏感性,无论在时间还是空间上,都存在较大差别。例如,重力变化量在时间上敏感,可以快速捕获地面稳定性变化信号,但由于其有效作用范围随距离平方成反比衰减,不利于确定稳定性变化的空间范围;而大地高变化的有效作用范围,根据负荷形变理论,仅随距离成反比衰减,在确定稳定性变化范围时远比重力变化量有效,但在时间上的敏感度又低于重力变化量。为了提

高 CORS 站网地面稳定性变化监测水平和可靠性,本文综合 CORS 站网监测的地面大地高变化、地面重力变化和地倾斜变化格网时间序列进行定量分析。

根据大地高、地面重力和地倾斜的以上时空特点,最终选取以下 6 个观测要素构建地面稳定性变化定量辨识准则:①地面大地高增大;②地面重力减小;③地倾斜由某点向外发散;④地面高程变化梯度较大;⑤地面重力变化梯度较大;⑥地倾斜变化方向在地形坡度方向的投影较大。

以该地区部分地质灾害事件发生的时间和发生位置为参考,通过区域大地高变化和重力变化等的时空特点,与地质灾害在时间和空间上的对比分析,以地面稳定性降低与已有地质灾害事件的一致性为优化目标,调整各种观测要素之间的权比关系,最终确定了区域的地面稳定性变化情况,如图 2 所示。

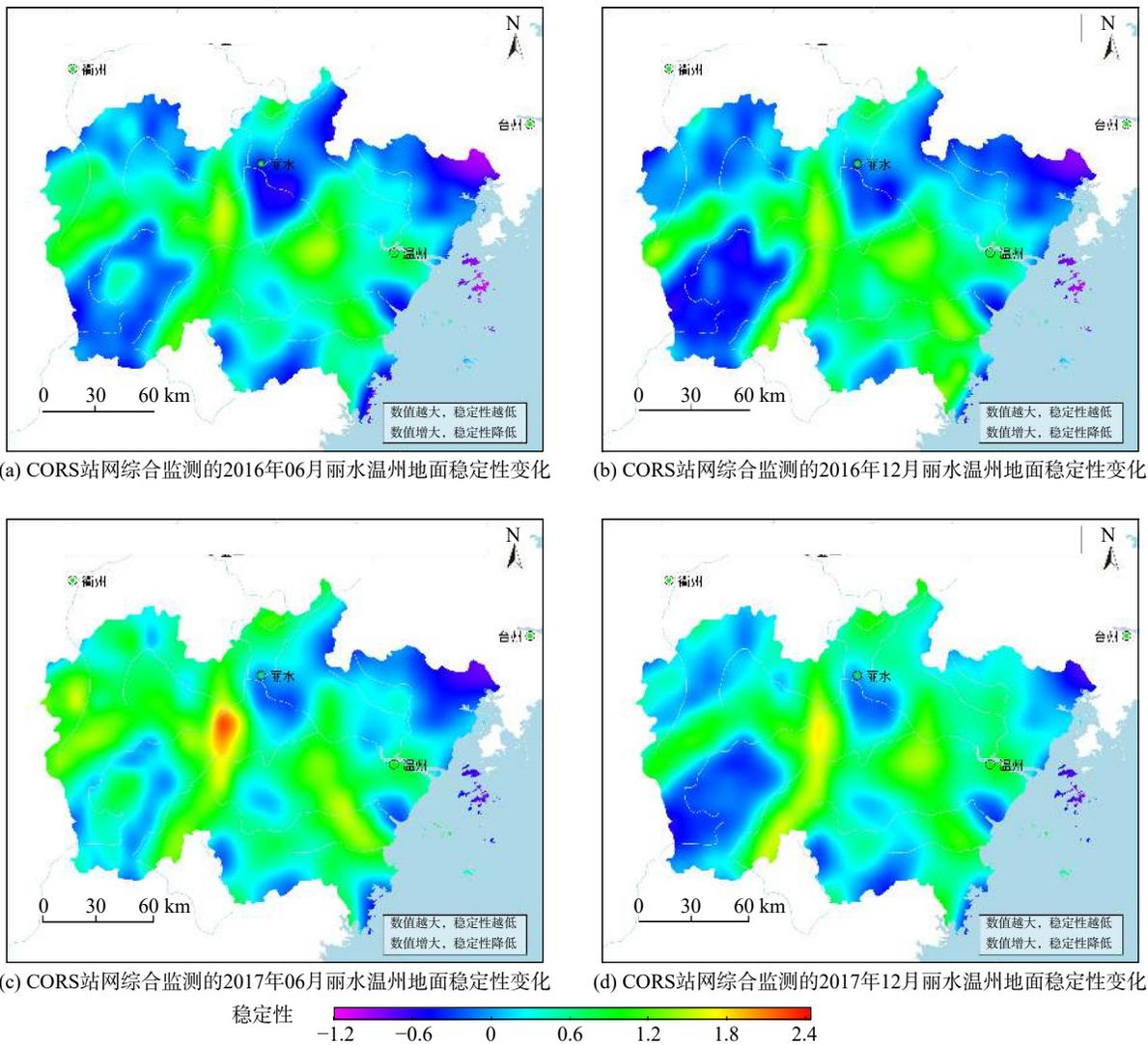


图 2 浙江东南部地面稳定性变化

Fig. 2 Changes of ground stability in southeastern of Zhejiang Province

地面稳定性变化格网时序,反映了地面稳定性变化的当前态势,以及不同位置上当前态势之间的空间差异。图2中彩色对应不同的数值。图2中数值越大,稳定性越低;数值增大,稳定性降低。不同月份的地面稳定性变化,用于反映当前时刻地面稳定性变化随时间的累积效应,以及不同位置上累积效应之间的空间差异。如图2(c)所示,丽水市中心左下方存在数值较大明显区域,是地面稳定性变化较大区域。

不同于因子分析法中采用的地震、沉降和断层等多种类型要素,本文采用的是大地测量观测要素,以地面变形监测资料为主,在地面形变场监测基础上开展。大地测量监测的是稳定性变化对各种动力环境因素的综合响应。在缺乏其他信息和调查资料的情况下,大地测量监测成果也能较为准确地分析评价稳定性变化。

### 3 结论

利用CORS网连续观测,实现了区域地面大地高、地面重力和地倾斜变化监测,通过与部分地质灾害信息进行时空分析,确定用于地面稳定性变化分析的要素和权重,进而分析地面稳定性变化。研究发现利用CORS网GNSS连续观测,综合大气、地表水和海平面变化等资料,可实现地面变形面的监测,获得大地高变化、重力变化和地倾斜变化等量。

地面大地高增大、地面重力减小、地倾斜由某点向外发散、地面高程变化梯度较大、地面重力变化梯度较大、地倾斜变化方向在地形坡度方向的投影较大,这6种观测要素可以有效建立地面稳定性变化的准则。根据构建的稳定性变化准则,实现地面稳定性变化的定量监测。

本监测方法在浙江东南部地区进行了测试验证,获得了较好的效果。利用CORS网和连续观测技术能够监测地面变形面的变化,定量分析区域地面稳定性变化情况,可为区域规划和地质灾害防治提供技术支持。

### 参考文献 (References):

- [1] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733. [ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨先全,周苏华,邢静康,等. 肯尼亚滑坡灾害分布特征及敏感性区划 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 65-74. [YANG Xianquan, ZHOU Suhua, XING Jingkang, et al. Distribution patterns and susceptibility mapping of landslides in Kenya [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 65-74. (in Chinese with English abstract)]
- [3] POURGHASEMI H R, MORADI H R, FATEMI AGHDA S M. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy Process, and statistical index models and assessment of their performances [J]. Natural Hazards, 2013, 69: 749-779.
- [4] 杨华阳,许向宁,杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 20-29. [YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 20-29. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 党亚民,杨强,王伟. 区域地质环境稳定性大地测量监测方法及应用 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1336-1345. [DANG Yamin, YANG Qiang, WANG Wei. Geodetic method and application for monitoring the stability of regional geological environment [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1336-1345. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吴树仁,王瑞江. 地质灾害与区域地壳稳定性研究的某些发展趋势 [J]. 地质力学学报, 1996, 2(3): 72-74. [WU Shuren, WANG Ruijiang. Some development trends of geological hazards and regional crustal stability studies [J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(3): 72-74. (in Chinese with English abstract)]
- [7] WANG W, ZHANG C Y, HU M Z, et al. Monitoring and analysis of geological hazards in Three Gorges area based on load impact change [J]. Natural Hazards, 2019, 97(2): 611-622.
- [8] 查甫生,刘从民,苏晶文,等. 铜陵市朝山地区岩溶塌陷形成条件与地面稳定性评价分析 [J]. 地质评论, 2020, 66(1): 246-254. [ZHA Fusheng, LIU Congmin, SU Jingwen, et al. Formation conditions of Karst collapse and evaluation of ground stability in Chaoshan area of Tongling City [J]. Geological Review, 2020, 66(1): 246-254. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 章传银,李爱勤,党亚民,等. CORS网区域重力场变化与地面稳定性跟踪监测方法 [J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 29-36. [ZHANG Chuanyin, LI Aiqin, DANG Yamin, et al. A method of tracking and monitoring of regional time-varying gravity field and ground stability based on CORS network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 29-36. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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): 2075.
- [12] FARRELL W. Deformation of the Earth by surface loads [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1972, 10(3): 761-797.