

# 基于 GPS 观测的地壳垂向季节性运动研究进展\*

占伟<sup>1</sup>, 田刚<sup>2</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 93756 部队, 天津 300130)

**摘要:** 介绍了基于 GPS 观测获取的地壳垂向季节性运动组成及相应的分析方法, 阐述了地壳季节性运动在 GPS 流动垂向季节性修正、区域负荷质量变化监测、应力扰动与地震活动性的季节性变化分析、区域地壳结构反演等方面的应用研究进展, 认为利用 GPS 观测研究地壳季节性运动的应用正向多手段、多学科融合发展, 但需进一步完善数据处理模型(策略)、削弱解算结果中的误差, 且各区域的地壳季节性运动机理值得深入分析。

**关键词:** 地壳垂向季节性运动; 负荷质量变化; GPS 观测

**中图分类号:** P315.730.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)01-0049-08

## 0 引言

20 世纪 90 年代初以来, GPS 在地壳运动监测方面发挥了重要的作用 (Wang *et al.*, 2001; Gan *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2013, 2016, 2018; 庞亚瑾等, 2017; 常金龙等, 2018; 郭炳辉等, 2018; 刘辛中等, 2018; 赵静暘等, 2018; 朱爽, 周伟, 2015; 朱爽等, 2017; 朱爽, 时爽爽, 2018), 一些研究结果表明 (Dong *et al.*, 1998; Nikolaidis, 2002), 地壳运动不仅仅包含了长期的线性运动, 还存在季节性运动, 尤以垂向运动最为突出。长期以来, 地壳季节性运动一直被认为是构造演化和动力学研究中需要剔除的噪声, 但由于其根源与性质难以准确界定, 地壳季节性运动的精确获取与消除成为了应用 GPS 分析地壳运动的最大挑战之一。然而, 近年来随着研究和认识不断的深入, 地壳季节性运动不再被认为是“一无是处的噪声”, 相反, 它在提高地固参考架的稳定性 (张飞鹏等, 2002; 朱文耀等, 2003; Altamimi *et al.*, 2016)、区域地下水变化监测 (Borsa *et al.*, 2014; Argus *et al.*, 2014, 2017) 等领域显现出重要的作用。因此, 研究精确获取地壳季节性运动的方法及其成因与机理, 具有重要的意义和实用价值, 尤其是在青藏高原等垂向季节性运动剧烈的区域。

GPS 观测连续观测具有时间和空间分辨率高的特点, 目前是精确获取地壳季节性运动的重要手段之一。依据 GPS 获取的地壳季节性运动研究经历了“现象—验证—分析—应用”的过程, 本文首先介绍 GPS 获取的地壳垂向季节性运动组成及相应的分析方法, 然后介绍地壳季节性运动应用的最新进展, 并对今后的发展趋势提出自己的看法。

## 1 GPS 观测获取的地壳垂向季节性运动的组成与分析方法

如前所述, GPS 观测获取的地壳季节性运动以垂向运动最为显著 (图 1), 因此以地壳垂向季节性运动为例, 介绍地壳季节性运动的组成与分析方法。

### 1.1 地壳垂向季节性运动的组成

研究结果 (李昭, 2012; 姜卫平等, 2013; Zhan *et al.*, 2017) 表明, 依据 GPS 观测得到地壳垂向季节性运动可分为两部分: ①GPS 观测中的干扰和解算模型/策略的不完善产生的虚假的季节性位移, 称为系统误差; ②各种负荷质量及温度的季节性变化产生的真实的地壳季节性运动, 称为地球物理效应。

系统误差包括 GPS 观测过程中的多路径效应、

\* 收稿日期: 2019-01-07.

**基金项目:** 国家自然科学基金——云南地壳垂直季节性形变的精确获取与机理分析 (41804010)、中国地震局地震科技星火计划——大规模 GNSS 连续站数据自动处理及产品发布系统 (XH18066Y) 联合资助。

卫星轨道周期性变化和一些解算策略的不完善。Ray 等 (2008)、田云峰 (2011)、Rodriguez - Solano 等 (2014) 发现在 GPS 垂向时间序列中存在周期为约 351 天/ $n$  ( $n=1, 2, \dots, 6$ ) 的运动, 这种周期性运动与 GPS 卫星轨道的周期有关; Freymueller (2009)、Collilieux 等 (2010, 2012)、Zou 等 (2014) 认为目前 GPS 数据处理普遍采用的线性参考框架存在周期性运动, 这种未去除的运动通过参考框架的转换参数传递到非参考框架点, 使得测网其它测站产生虚假的周期性信号, 这种现象在垂向最为突出; Fritshce 等 (2005)、Deng 等 (2017) 认为忽略高阶电离层延迟会使 GPS 垂向时间序列出现虚假的年和半年周期信号。姜卫平等 (2014) 量化了高阶电离层延迟对全球 GPS 坐标时间序列的贡献, 提出高阶电离层延迟可能是造成中纬度地区 GPS 测站垂向年周期性、东西向半年周期性及低纬度地区 GPS 站垂向半年周期性运动的主要原因之一; King 等 (2008) 认为一些未去除干净的、周期为 1 天和小于 1 天的信号会传递到 GPS 垂向时间序列中的 1 年和半年周期信号里。

地球物理效应包括各种负荷如冰川 (Drouin *et al*, 2016)、大气潮汐、积雪、地下水、海潮和海

洋非潮汐的变化及测站温度变化, 这些都是造成 GPS 季节性运动的主要原因 (王敏等, 2005; 梁洪宝等, 2015)。van Dam 等 (1994) 在 GPS 测站的垂向时间序列中找到了由于大气压负荷造成的地壳形变, 由于大气压变化产生的地表位移最高能达到 GPS 垂向变化量的 24%; 积雪和地下水的质量变化也是引起 GPS 垂向周期性运动的一个因素 (Munekane *et al*, 2004; Chew, Small, 2014); van Dam 等 (2001) 分析了陆地水含量季节性变化对地壳垂向运动的大尺度影响, 结果表明 1994—1998 年陆地水变化造成的地壳垂向位移模型均方根值为 8 mm, 最大达 30 mm, 主要为年周期; 海潮和海洋非潮汐对沿海地区 GPS 垂向周期性运动的影响为毫米至厘米不等 (Yuan *et al*, 2009; Williams *et al*, 2011; van Dam *et al*, 2012); 地表温度变化可以引起 GPS 墩标和 GPS 台站基岩变化, 从而产生 GPS 垂向的周期性运动 (Prawirodirdjo *et al*, 2006; Yan *et al*, 2009; 孙付平等, 2012); 闫昊明等 (2010) 分析表明, 在 23 个网络工程 GPS 连续站中, 温度变化造成的 GPS 站垂向位移总影响的年周期性运动振幅最大值可达 2.8 mm, 其中 13 个 GPS 连续站的年周期性运动振幅变化超过 1 mm。

需要强调的是, 在地壳季节性运动研究中, 如果不尽量消减系统误差, 基于“不干净”的季节性形变结果进行地球物理效应解释, 会对分析结果产生一定的影响。Van Dam 等 (2007) 对比分析了欧洲地区 IGS 站 (Internatinal GNSS Service) 站 GPS 与 GRACE 得到的测站垂向周年期位移, 结果表明二者在很多测站不相吻合, 他认为不一致的主要原因是 GPS 数据解算策略的不完善; Tregoning 等 (2009) 改进了 GPS 数据处理模型和策略后, 全球范围内 GPS 与 GRACE 垂向周期信号的一致性则好于 Van Dam 等 (2007) 的结果。

## 1.2 地球物理效应的分析方法

地球物理效应的分析方法主要有两类, 一类是针对某一种或多种负荷, 根据负荷模型数据采用格林函数 (Farrell, 1972) 计算负荷质量变化产生的地表位移, 并与 GPS 测站的季节性运动对比 (Tsai, 2011; Li *et al*, 2017; 魏娜等, 2016); 另一类是与其他观测手段 (如 GRACE) 得到的时间序列进行对比分析。多位学者按照第一种方法分

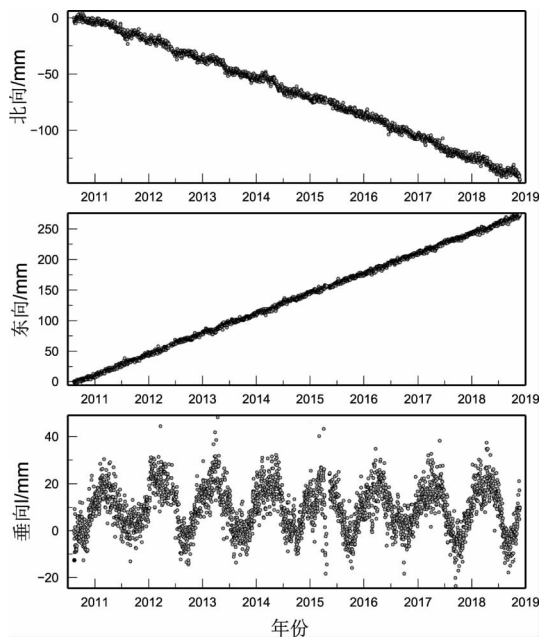


图1 GPS 连续站云南元谋 (YNYM) 坐标时间序列

Fig. 1 The coordinate time series of continuous GPS station of Yuanmou (YNYM)

析了全球及各区域负荷的质量变化与GPS垂向周期性运动的关系(张飞鹏等, 2002; 王敏等, 2005; 熊福文, 朱文耀, 2007; 袁林果等, 2008; 李昭, 2012), 得到的结论较为统一: 上述负荷的质量变化所产生的地壳垂向季节性位移与GPS垂向周期性运动相关性较好, 但负荷质量变化产生的位移只是GPS垂向周期性运动的一部分, 并不能完全解释GPS垂向周期性运动。结合其他观测手段分析GPS垂向周期性运动的研究也很多, 尤其是新一代重力卫星GRACE可监测地表流体质量变化, 并可得到研究区域表面质量(如陆地水)变化所产生的垂向位移, 因此对比分析GPS和GRACE得到的垂向周期性运动成为近期地壳垂向形变分析的热点之一(廖海华等, 2010)。在陆地水变化较大的区域, 如亚马逊流域(Davis *et al.*, 2004)、喜马拉雅地区(Fu, Freymueller, 2012; 王林松等, 2014)、阿拉斯加(Fu *et al.*, 2012)、非洲(Nahmani *et al.*, 2012; Birhanu, Bendick, 2015; Birhanu *et al.*, 2018)、华北地区(Liu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017)、青藏高原(Zou *et al.*, 2015; Hao *et al.*, 2016)、云南地区(盛传贞等, 2014), GPS与GRACE得到的垂向周期性信号相关性较好, 但在一些水质量变化剧烈的区域则一致性较差, 原因是GRACE数据处理时需要进行空间滤波(半径数百千米), 因此GRACE反映的是区域空间尺度数百千米的整体形变, 而GPS不仅反映了区域整体形变, 还可能叠加一些局部效应(Tesmer *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2016)。

## 2 地壳季节性运动的应用

经过对GPS获取的地壳季节性运动分析和验证后, 地壳存在季节性运动的结论逐渐被认可, 因此地壳季节性运动的应用研究也逐步开展, 其研究范围和深度经历了“由浅到深”的过程, 即从地表的GPS流动观测的时间序列季节性运动改正到地表深部的负荷质量变化和应力扰动反演等, 涉及的研究领域愈发广泛。

区域负荷质量的季节性变化(如雨季与旱季地下水含量的变化), 能引起地壳季节性运动和区域应力扰动的季节性变化, 后者则可能触发区域小震, 进而影响小震的活动性, 因此可以利用GPS

观测到的地壳季节性运动监测区域负荷质量的季节性变化和计算应力扰动的季节性变化。同时, 由于地壳季节性运动和区域小地震活动性的季节性变化有可能都是区域负荷质量的季节性变化引起的, 因此地壳季节性运动与区域小震活动性的季节性变化可能会存在一定的相关性(图2)。

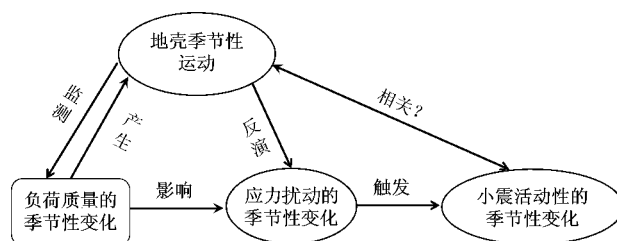


图2 地壳季节性运动与区域负荷质量和应力扰动等季节性变化之间关系

Fig. 2 Relationship between seasonal vertical crustal deformation and seasonal variations of mass loading, crustal stress perturbation

### 2.1 GPS流动时间序列的周期性改正

一些短期的GPS流动观测由于数据量太少、无法消除垂向季节性形变的影响, 得到的垂向线性运动速率结果精度不高, 亟需对垂向季节性形变进行修正。GPS流动垂向季节性形变修正的关键是准确获取流动站垂向季节性形变的振幅和初相。目前常用的方法可分为两类, 一类是根据一些物理模型(如全球负荷模型或GRACE)直接求解任意一点的垂向年周期运动参数(Fu *et al.*, 2012; 朱良玉等, 2014; 梁洪宝等, 2015; Zhao *et al.*, 2016; 郝明等, 2017)。Fu等(2012)利用GRACE得到的信息修正流动站垂向时间序列, 一些流动站的垂向速率结果精度有显著的提高。另一类是依据同一区域内GPS连续站实测的垂向年周期运动参数进行空间内插获取流动站的垂向年周期运动参数(占伟等, 2016)。Liang等(2013)采用这类方法修正了青藏高原及其周边地区GPS流动站的垂向时间序列, 修正后部分测站垂向速率准确性有一定的提高。上述两类方法各有千秋, 第一类方法可以直接求解任意一点的垂向年周期运动参数, 但GRACE和负荷模型的空间分辨率较低(数百千米); 第二类方法在GPS连续站密度较高且分布均匀的区域, 精度更高。

## 2.2 区域负荷质量变化监测

GPS 能够准确记录地球表层由于水含量等负荷季节性变化所引起的响应(季节性位移),反之,利用 GPS 观测得到的地表季节性运动可以反算地表水等效厚度的变化(Fu *et al.*, 2015)。

Argus 等(2014)应用地表垂向季节性运动的 GPS 观测数据反推等效水厚度的变化,结果表明:GPS 数据反演的加利福尼亚境内总体水含量变化空间分辨率为 50 km,而 GRACE 由于需要进行空间滤波(半径一般为 200~300 km),因此 GRACE 解的空间分辨率为 200 km。GPS 连续观测可以给出每天(甚至更高的时间分辨率)的地壳垂向位移(vertical crustal deformation, 简称 VCD),相对于 GRACE 的月分辨率有了较大的提高。Jiang 等(2017)的分析结果验证了 GPS 监测云南季风变化和干旱的能力,并显示出将 GPS 导出的雨季大气可降水汽量(precipitable water vapor, 简称 PWV)、由于水文荷载产生的 VCD 和降雨量、GRACE 导出的等效水高度 EWH(equivalent water height 来源于 GRACE)联合,可以更为全面了解区域性季风和干旱的特征。上述研究表明, GPS 已经成为一种新的、独立的地表水变化监测手段。

## 2.3 区域应力扰动变化与地震活动性分析

一些学者注意到在美国(AMOS *et al.*, 2014; Craig *et al.*, 2017)、日本(Heki, 2003)和喜马拉雅地区(Bollinger *et al.*, 2007)的小震活动性存在季节性变化,如喜马拉雅地区冬季小震平均频率约是夏季的 2 倍,而这些区域积雪、地下水的季节性变化也较为显著,因此一些学者分析了小震活动性与水文数据的季节性变化之间的相关性(Johnson *et al.*, 2017a, b)。Bettinelli 等(2008)认为喜马拉雅地区地下水位季节性变化是区域地壳位移、应力扰动和地震活动性季节性变化的主要原因。夏季,雨季的降雨使得水位上升和地表负载增加,引起了地壳的弹性变形, Ganges 盆地北部地表下沉,水平方向产生南向位移,这种地壳水平方向的拉张减少了震间应变积累引起的长期水平压缩的影响;冬季与夏季相反,水位下降意味着地壳负荷减小和水平压缩增加,有利于长期的震间地壳水平方向的压缩和小震发生。

## 2.4 区域地壳结构模型反演

地壳的季节性形变是地壳对于负荷质量变化

的响应,基于弹性负荷理论,利用 GRACE 观测到的地表负荷质量变化和地壳结构模型可以得到负荷质量变化产生的地表变形。一些学者认为, GRACE 与 GPS 观测得到的地表变形存在的差异,在一定程度是由于选用的全球尺度地壳结构模型在研究区域不够精准,因此依据 GRACE 观测的地表负荷质量变化和 GPS 得到的地壳变形结果可以反演区域的地壳结构模型和地球物理参数,如粘滞系数(Clarke, 2018; Chanard *et al.*, 2018)。

Chanard 等(2014)在使用 GRACE 给出的地表负荷质量变化数据正演模拟 GPS 观测到的尼泊尔和青藏高原季节性形变时,选用了地球弹性半空间模型,基于初始参考地球模型(Preliminary Reference Earth Model, 简称 PREM)和区域地震波速的分层球形模型,结果表明:使用区域实测数据建立的分层球形模型的模拟结果与 GPS 结果拟合度最佳,显示出以大地测量数据(GPS 和 GRACE)作为约束修正地球弹性结构的可能性。文中以 GPS 季节性变化为约束反演得到的地壳密度剖面与当地的密度模型相近,这些研究结果表明,在缺少地表负荷质量变化直接观测的情况下,大地测量数据的季节性变化建模提供了一种探测地球弹性结构的方法。

## 3 讨论与展望

由于不能完全消除 GPS 观测和解算过程中的系统误差,因此 GPS 获取的地壳季节性运动总是包含误差; GRACE 和全球负荷模型获取的地壳季节性运动也同样存在误差,因此目前 GPS 与 GRACE 与全球负荷模型对比大多是在较大的空间尺度(200~300 km)进行的,与在地下水等负荷季节性变化较为显著的典型区域时空特征较为一致,但细部还存在差异。

GPS 反演区域水文质量变化的研究方法在美国(尤其是加利福尼亚州)应用较多, GPS 连续观测体现出时间分辨率高的优势; GPS 反演区域应力扰动变化依赖于地壳结构模型的完善,与区域小震活动性的相关性还有待更多实例验证。

综上,利用 GPS 观测研究地壳季节性运动的应用正向多手段、多学科融合发展,在今后一段时间内还需进一步完善数据处理模型(策略)、削

弱解算结果中的误差,同时各区域主要的地壳季节性运动物理机制不尽相同,因此各区域的地壳季节性运动机理分析值得更加深入分析。由于收集的文献有限以及篇幅限制,本文介绍的仅仅是地壳季节性运动研究的一些侧面,随着研究的不断深入和扩展,其应用前景更加令人期待。

## 参考文献:

- 常金龙,甘卫军,梁诗明,等.2018. 大华北地区GPS时间序列共模误差的确定与分析[J]. 地震研究,41(3):430-437.
- 郭炳辉,郭博峰,李经纬,等.2018. 基于GPS资料研究喜马拉雅构造带中段地壳形变特征[J]. 地震研究,41(3):398-406.
- 郝明,王庆良,李煜航.2017. 利用GRACE、GPS和水准数据研究西秦岭地区现今地壳垂直运动特征[J]. 大地测量与地球动力学,37(10):991-995.
- 姜卫平,李昭,邓连生,等.2014. 高阶电离层延迟对GPS坐标时间序列的影响分析[J]. 科学通报,59(10):913-923.
- 姜卫平,李昭,刘鸿飞,等.2013. 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,56(7):2228-2237.
- 李昭.2012. GPS坐标时间序列的非线性变化研究[D]. 武汉:武汉大学.
- 梁洪宝,刘志广,黄立人,等.2015. 非构造形变对中国大陆GNSS基准站垂向周期运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学,35(4):589-593.
- 廖海华,钟敏,周旭华.2010. 利用GRACE卫星重力资料解算气候驱动的地表周年垂直形变[J]. 地球物理学报,53(5):1091-1098.
- 刘辛中,李拴虎,宋成科.2018. GPS连续站的环境变化对解算结果精度的影响定量研究[J]. 地震研究,41(3):472-479.
- 庞亚瑾,程惠红,张怀,等.2017. 巴颜喀拉块体东缘形变及九寨沟地震孕震环境数值分析[J]. 地球物理学报,60(10):4046-4055.
- 盛传贞,甘卫军,梁诗明,等.2014. 滇西地区GPS时间序列中陆地水载荷形变干扰的GRACE分辨与剔除[J]. 地球物理学报,57(1):42-52.
- 孙付平,田亮,门葆红,等.2012. GPS测站周年运动与温度变化的相关性研究[J]. 测绘学报,41(5):723-728.
- 田云锋.2011. GPS位置时间序列中的中长期误差研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 王林松,陈超,邹蓉,等.2014. 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,57(6):1792-1804.
- 王敏,沈正康,董大南.2005. 非构造形变对GPS连续站位置时间序列的影响和修正[J]. 地球物理学报,48(5):1045-1052.
- 魏娜,施闯,刘经南.2016. 地表负载及GPS测站分布对参考框架转换的影响分析[J]. 地球物理学报,59(2):484-493.
- 熊福文,朱文耀.2007. 长江三角洲地区地形变特征的GPS监测和分析[J]. 地球物理学报,50(6):1719-1730.
- 闫昊明,陈武,朱耀仲,等.2010. 温度变化对我国GPS台站垂直位移的影响[J]. 地球物理学报,53(4):825-832.
- 袁林果,丁晓利,陈武,等.2008. 香港GPS基准站坐标序列特征分析[J]. 地球物理学报,51(5):1372-1384.
- 占伟,李斐,朱爽,等.2016. 应用GPS连续观测修正流动观测垂向速率的分析与试验[J]. 武汉大学学报(信息科学版),41(7):963-968.
- 张飞鹏,董大南,程宗颐,等.2002. 利用GPS监测中国地壳的垂向季节性变化[J]. 科学通报,47(18):1370-1377.
- 赵静瑜,武艳强,梁洪宝,等.2018. 利用流动GPS测定2011年日本 $M_w 9.0$ 地震远场同震位移[J]. 地震研究,41(3):451-456.
- 朱良玉,王庆良,蒋锋云,等.2014. 非构造形变对区域网GPS垂直形变的影响[J]. 测绘科学,39(9):49-53.
- 朱爽,时爽爽.2018. 天山地震带近期地壳形变分析及地震危险性评估[J]. 地震研究,41(3):423-429.
- 朱爽,杨国华,刘辛中,等.2017. 川滇地区近期地壳形变动态特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),42(12):1765-1772.
- 朱爽,周伟.2015. 甘肃岷县漳县6.6级地震前后区域地壳形变分析[J]. 地震工程学报,37(3):731-738.
- 朱文耀,符养,李彦.2003. GPS高程导出的全球高程振荡运动及季节变化[J]. 中国科学:地球科学,33(3):470-481.
- Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modelling non-linear station motions[J]. J Geophys Res, 121(8):6109-6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Amos C B, Audet P, Hammond W C, et al. 2014. Uplift and seismicity driven by groundwater depletion in central California[J]. Nature, 509(7501):483.
- Argus D F, Fu Y, Landerer F W. 2014. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion[J]. Geophys Res Lett, 41(6), 1971-1980, doi:10.1002/2014GL059570.
- Argus D F, Landerer F W, Wiese D N, et al. 2017. Sustained water loss in California's mountain ranges during severe drought from 2012 to 2015 inferred from GPS[J]. J Geophys Res, 122(12):10559-10585, doi:10.1002/2017JB014424.
- Bettinelli P, Avouac J P, Flouzat M, et al. 2008. Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology[J]. Earth planet Sci Lett, 266(3-4):332-344.
- Birhanu Y, Bendick R. 2015. Monsoonal loading in Ethiopia and Eritrea from vertical GPS displacement time series[J]. J Geophys Res, 120(10):7231-7238, doi:10.1002/2015JB012072.
- Birhanu Y, Wilks M, Biggs J, et al. 2018. Seasonal patterns of seismicity and deformation at the Alutu geothermal reservoir, Ethiopia, induced by hydrological loading[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 356:175-182, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.03.008.
- Bollinger L, Perrier F, Avouac J P, et al. 2007. Seasonal modulation of seismicity in the Himalaya of Nepal[J]. Geophys Res Lett, 34(8):402-420, doi:10.1029/2006GL029192.
- Borsa A A, Agnew D C, Cayan D R. 2014. Ongoing drought-induced uplift in the western United States[J]. Science, 345(6204):1587-1590.

- Chanard K, Avouac J P, Ramillien G, *et al.* 2014. Modeling deformation induced by seasonal variations of continental water in the Himalaya region: Sensitivity to Earth elastic structure[ J ]. *J Geophys Res*, 119 ( 6 ): 5097 – 5113, doi: 10. 1002/2013JB010451.
- Chanard K, Fleitout L, Calais E, *et al.* 2018. Constraints on transient viscoelastic rheology of the asthenosphere from seasonal deformation [ J ]. *Geophys Res Lett*, 45 ( 5 ): 2328 – 2338.
- Chew C C, Small E E. 2014. Terrestrial water storage response to the 2012 drought estimated from GPS vertical position anomalies[ J ]. *Geophys Res Lett*, 41 ( 17 ): 6145 – 6151.
- Clarke P J. 2018. Seasonal surface loading helps constrain short – term viscosity of the asthenosphere[ J ]. *Geophys Res Lett*, 45 ( 5 ): 2349 – 2351, doi: 10. 1002/2018GL077494.
- Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, *et al.* 2010. Impact of loading effects on determination of the International Terrestrial Reference Frame [ J ]. *Adv Space Res*, 45 ( 1 ): 144 – 154, doi: 10. 1016/j. asr. 2009. 08. 024.
- Collilieux X, van Dam T, Ray J. 2012. Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters[ J ]. *J Geod*, 86 ( 1 ): 1 – 14.
- Craig T J, Chanard K, Calais E. 2017. Hydrologically-driven crustal stresses and seismicity in the New Madrid Seismic Zone[ J ]. *Nature Communications*, 8 ( 1 ): 2143, doi: 10. 1038/s41467 – 017 – 01696 – w.
- Davis J L, Elósegui P, Mitrovica J X, *et al.* 2004. Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS[ J ]. *Geophys Res Lett*, 31 ( 24 ): L24605, doi: 10. 1029/2004GL021435.
- Deng L S, Jiang W P, Li Z, *et al.* 2017. Assessment of second-and third-order ionospheric effects on regional networks: case study in China with longer CMONOC GPS coordinate time series [ J ]. *J Geod*, 91 ( 2 ): 207 – 227, doi: 10. 1007/s00190 – 016 – 0957 – y.
- Dong D, Herring T A, King R W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data [ J ]. *J Geod*, 72 ( 4 ): 200 – 214.
- Drouin V, Heki K, Sigmundsson F, *et al.* 2016. Constraints on seasonal load variations and regional rigidity from continuous GPS measurements in Iceland, 1997 – 2014 [ J ]. *Geophys J Int*, 205 ( 3 ): 1843 – 1858, doi: 10. 1093/gji/ggw122.
- Farrell W E. 1972. Deformation of the Earth by surface loads[ J ]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10 ( 3 ): 761 – 797.
- Freymueller J T. 2009. Seasonal position variations and regional reference frame realization[ J ]. *International Association of Geodesy Symposia*, 134: 191 – 196.
- Fritsche M, Dietrich R, Knöfel C, *et al.* 2005. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates[ J ]. *Geophys Res Lett*, 32 ( 23 ): L23311, doi: 10. 1029/2005GL024342.
- Fu Y, Argus D F, Landerer F W. 2015. GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon[ J ]. *J Geophys Res: Solid Earth*, 120 ( 1 ): 552 – 566.
- Fu Y, Freymueller J T, Jensen T. 2012. Seasonal hydrological loading in southern Alaska observed by GPS and GRACE [ J ]. *Geophys Res Lett*, 39 ( 15 ): L15310, doi: 10. 1029/2012GL052453.
- Fu Y, Freymueller J. 2012. Seasonal and long-term vertical deformation in the Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements [ J ]. *J Geophys Res*, 117 ( B3 ): B03407, doi: 10. 1029/2011JB008925.
- Gan W, Zhang P, Shen Z, *et al.* 2007. Present – day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[ J ]. *J Geophys Res*, 112 ( B8 ): 416 – 429.
- Hao M, Freymueller J, Wang Q, *et al.* 2016. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data[ J ]. *Earth planet Sci Lett*, 437: 1 – 8.
- Heki K. 2003. Snow load and seasonal variations of earthquake occurrence in Japan[ J ]. *Earth Planet Sci Lett*, 207 ( 1 – 4 ): 159 – 164.
- Jiang W, Peng Y, Hua C, *et al.* 2017. Annual variations of monsoon and drought detected by GPS: A case study in Yunnan, China[ J ]. *Scientific Reports*, 7 ( 1 ): 5874, doi: 10. 1038/s41598 – 017 – 06095 – 1.
- Johnson C W, Fu Y, Bürgmann R. 2017a. Seasonal water storage, stress modulation, and California seismicity[ J ]. *Science*, 356 ( 6343 ): 1161 – 1164.
- Johnson C W, Fu Y, Bürgmann R. 2017b. Stress models of the annual hydrospheric, atmospheric, thermal, and tidal loading cycles on California faults: perturbation of background stress and changes in seismicity[ J ]. *J Geophys Res: Solid Earth*, 122 ( 12 ): 10605 – 10625, doi. org/10. 1002/2017JB014778.
- King M A, Watson C S, Penna N T, *et al.* 2008. Subdaily signals in GPS observations and their effect at semiannual and annual periods[ J ]. *Geophys Res Lett*, 35 ( 3 ): L03302, doi: 10. 1029/2007GL032252.
- Li Z, Yue J P, Li W, *et al.* 2017. Investigating mass loading contributes of annual GPS observations for the Eurasian plate[ J ]. *J Geodyn*, 111: 43 – 49.
- Liang S, Gan W, Shen C, *et al.* 2013. Three – dimensional velocity field of present – day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements[ J ]. *J Geophys Res*, 118 ( 10 ): 5722 – 5732, doi: 10. 1002/2013JB010503.
- Liu R L, Li J C, Fok H S, *et al.* 2014. Earth surface deformation in the North China Plain detected by joint analysis of GRACE and GPS data[ J ]. *Sensors*, 14 ( 10 ): 19861 – 19876, doi: 10. 3390/s141019861.
- Munekane H, Tobita M, Takashima K. 2004. Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan [ J ]. *Geophys Res Lett*, 31 ( 12 ): L12608, doi: 10. 1029/2004GL020158.
- Nahmani S, Bock O, Bouin M N, *et al.* 2012. Hydrological deformation induced by the West African Monsoon: Comparison of GPS, GRACE and loading models [ J ]. *J Geophys Res*, 117 ( B5 ): B05409, doi: 10. 1029/2011JB009102.
- Nikolaidis R. 2002. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System[ D ]. San Diego: University of California.
- Prawirodirdjo L, Ben – Zion Y, Bock Y. 2006. Observation and modeling of thermoelastic strain in Southern California Integrated GPS Network

- daily position time series[J]. *J Geophys Res*, 111 ( B2 ): B02408, doi:10. 1029/2005JB003716.
- Ray J, Altamimi Z, Collilieux X, *et al.* 2008. Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates[J]. *GPS Solut*, 12 ( 1 ): 55 – 64.
- Rodriguez – Solano C J, Hugent U, Steigenberge P, *et al.* 2014. Reducing the draconitic errors in GNSS geodetic product[J]. *J Geod*, 88 ( 6 ): 559 – 574.
- Tesmer V, Steigenberger P, van Dam T, *et al.* 2011. Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series[J]. *J Geod*, 85 ( 5 ): 291 – 310, doi:10. 1007/s00190 – 010 – 0437 – 8.
- Tregoning P, Watson C, Ramillien G, *et al.* 2009. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS[J]. *Geophys Res Lett*, 36 ( 36 ): 139 – 156, doi:10. 1029/2009GL038718.
- Tsai V C. 2011. A model for seasonal changes in GPS positions and seismic wave speeds due to thermoelastic and hydrologic variations[J]. *J Geophys Res*, 116 ( B4 ): B04404, doi:10. 1029/2010JB008156.
- van Dam T, Blewitt G, Heflin M B. 1994. Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations[J]. *J Geophys Res*, 99 ( B12 ): 23939 – 23950.
- van Dam T, Collilieux X, Wuite J, *et al.* 2012. Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series[J]. *J Geod*, 86 ( 11 ): 1043 – 1057, doi:10. 1007/s00190 – 012 – 0564 – 5.
- van Dam T, Wahr J, Lavallo'e D. 2007. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe[J]. *J Geophys Res*, 112 ( B3 ): B03404, doi:10. 1029/2006JB004335.
- van Dam T, Wahr J, Milly P C D, *et al.* 2001. Crustal displacements due to continental water loading[J]. *Geophys Res Lett*, 28 ( 4 ): 651 – 654.
- Wang L S, Chen C, Du J S. 2017. Detecting seasonal and long – term vertical displacement in the North China Plain using GRACE and GPS [J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 21 ( 6 ): 2905 – 2922.
- Wang Q, Zhang P, Freymueller J T, *et al.* 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294 ( 5542 ): 574 – 577.
- Williams S D P, Penna N T. 2011. Non – tidal ocean loading effects on geodetic GPS heights[J]. *Geophys Res Lett*, 38 ( 9 ): 159 – 164, doi:10. 1029/2011GL046940.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Liang H B, *et al.* 2016. Coseismic deformations of the 2015  $M_w$ 7. 8 Gorkha earthquake and interseismic strain accumulation in the Himalayan tectonic belt and Tibetan plateau[J]. *Tectonophysics*, 670: 144 – 154.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Liang H B, *et al.* 2018. Deformation response of seismogenic faults to the Wenchuan  $M_s$ 8. 0 earthquake: A case study for the southern segment of the Longmenshan fault zone [J]. *Remote Sens*, 10 ( 6 ), 894, doi:10. 3390/rs10060894.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, *et al.* 2013. Preliminary results of the coseismic displacement and pre-seismic strain accumulation of the Lushan  $M_s$ 7. 0 earthquake reflected by the GPS surveying[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 ( 28 – 29 ): 3460 – 3466.
- Yan H, Chen W, Yuan L. 2016. Crustal vertical deformation response to different spatial scales of GRACE and GCMs surface loading[J]. *Geophys J Int*, 204 ( 1 ), 505 – 516.
- Yan H, Chen W, Zhu Y, *et al.* 2009. Contribution of thermal expansion of monuments and nearby bedrock to observed GPS height changes[J]. *Geophys Res Lett*, 36: L13301, doi:10. 1029/2009GL038152.
- Yuan L G, Ding X L, Zhong P, *et al.* 2009. Estimates of ocean tide loading displacements and its impact on position time series in Hong Kong using a dense continuous GPS network [J]. *J Geod*, 83 ( 13 ): 999 – 1015, doi:10. 1007/s00190 – 009 – 0319 – 0.
- Zhan W, Li F, Hao W F, *et al.* 2017. Regional characteristics and influencing factors of seasonal vertical crustal motions in Yunnan, China [J]. *Geophys J Int*, 210 ( 3 ): 1295 – 1304.
- Zhao Q, Wu W, Wu Y. 2016. Using combined GRACE and GPS data to investigate the vertical crustal deformation at the northeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 122 – 129.
- Zou R, Freymueller J T, Ding K, *et al.* 2014. Evaluating seasonal loading models and their impact on global and regional reference frame alignment [J]. *J Geophys Res*, 119 ( 2 ): 1337 – 1358, doi:10. 1002/2013JB010186.
- Zou R, Wang Q, Freymueller J T, *et al.* 2015. Seasonal hydrological loading in southern Tibet detected by joint analysis of GPS and GRACE [J]. *Sensors*, 15 ( 12 ): 30525 – 30538.

## Research Progress of Seasonal Vertical Crustal Motions Inferred from GPS Observations

ZHAN Wei<sup>1</sup>, TIAN Gang<sup>2</sup>

(1. *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

(2. *93756 PLA troops, Tianjin 300130, China*)

### Abstract

In this paper, the composition and the corresponding analysis methods of seasonal vertical crustal motions obtained by continuous GPS observations are introduced. Then, we discuss on the application of seasonal crustal motions on the verification of vertical motions in campaign GPS observations, monitoring the variation of mass loading, analysis of stress perturbation and seasonal variation of seismic activity, and inversion of crustal structure, etc. At last, we proposed that the application of GPS in the study of seasonal crustal movement is developing towards the integration of multi-means and multi-disciplines. In the future, it is necessary to further improve the data processing model (strategy) and weaken the errors in the results. At the same time, the mechanism of seasonal crustal movement in different regions deserves more in-depth analysis.

**Keywords:** seasonal vertical crustal motions; variations of surface mass loadings; GPS observations