

# GPS 垂向年周期运动的精确获取与方法评估<sup>\*</sup>

李经纬<sup>1</sup>, 占伟<sup>1♣</sup>, 梁洪宝<sup>1</sup>, 王勇<sup>2</sup>, 郭南男<sup>1</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384)

**摘要:** 分别选用负荷模型方法、GRACE 模型方法、空间加权法和多核函数法分析 GPS 垂向年周期运动参数的精确获取问题, 以云南 26 个陆态网络 GPS 连续站 2010—2015 年观测数据得到的垂向年周期参数为标准, 评估了这 4 种方法的效果。这 4 种方法与 GPS 连续站实测的振幅差异平均值分别为 4.97, 3.31, 1.38, 1.43 mm, 4 种方法的 WRMS 减速比平均值分别为 0.70, 0.84, 0.95, 0.94。结果表明: 由于云南地区 GPS 连续站密度较高且区域垂向年周期运动空间一致性较好, 空间加权法和多核函数法效果最好, GRACE 模型方法次之, 负荷模型方法最差。建议在 GPS 连续站较多的区域, 采用空间加权法或者多核函数法; 在 GPS 连续站较少的区域, 建议采用 GRACE 模型方法。

**关键词:** 垂向年周期运动; 方法评估; GPS 连续观测; 空间插值

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)01-0095-06

## 0 引言

近年来, 我国许多区域 (如川滇地区) GPS 垂向存在显著的周期性运动 (其中年周期运动最为突出) (张飞鹏等, 2002; 刘任莉等, 2013; 梁洪宝等, 2015; 王岩等, 2018), 盛传贞等 (2014) 认为滇西地区 GPS 坐标变化时间序列的垂向分量中, 普遍包含有明显的年周期非构造形变波动, 高值可达 12 mm; Zhan 等 (2017) 基于 2010—2015 年云南 27 个 GPS 连续站垂向时间序列得出该时段云南地区 GPS 连续站垂向年周期振幅平均值为 9.7 mm, 认为云南地区季节性的降雨与 GPS 垂向年周期运动相关性较好。GPS 垂向周期性运动研究有重要的研究意义和实际应用价值, 目前我国 GPS 流动观测的观测数据量太少、无法消除周期性运动的影响, 导致得到的垂向线性运动速率结果精度不高, GPS 垂向

速度场应用较少 (方颖等, 2014; 朱爽等, 2017; 李长军等, 2018), 因此精确获取垂向周期性运动信息能够提高 GPS 流动观测的垂向线性运动速率精度, 极大地促进 GPS 垂向速度场的应用。

一些学者使用了不同的方法获取 GPS 流动站的垂向周期性运动参数 (Liang *et al*, 2013; 占伟等, 2016), 但是对这些方法的效果评估、分析较少, 尤其是中国大陆幅员广阔, 不同区域影响垂向周期性运动的主要因素不一, 不同方法的适用性也不同, 因此对 GPS 垂向周期性运动参数获取方法进行全面的评估十分必要。本文以云南为研究区域, 选用 4 种垂向年周期运动参数获取方法, 以研究区域内 2010—2015 年陆态网络 26 个 GPS 连续站观测数据得到的垂向年周期运动结果, 评估这 4 种方法的效果, 综合评估各方法的优缺点, 对不同的区域如何获取垂向年周期运动参数给出建议。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-03-14.

**基金项目:** 中国地震局监测、预测、科研三结合课题 (CEA-JC/3JH-173704)、国家自然科学基金青年科学基金项目 (41804010)、天津市自然科学基金 (17JCYBJC21600) 和地震科技星火计划项目 (XH19062Y) 联合资助。

**♣ 通讯作者:** 占伟 (1983-), 高级工程师, 主要从事 GPS 数据处理及分析研究工作. E-mail: zw000373@163.com.

## 1 方法介绍

常用的垂向年周期运动获取方法分为 2 类，一类是根据一些物理模型（如负荷模型或者 GRACE）直接求解某一空间位置的垂向年周期运动参数；另一类是对区域内 GPS 连续站实测的垂向年周期运动参数进行空间内插。本文选用 4 种 GPS 垂向年周期运动获取方法，分别为：

(1) 方法 1：负荷模型方法。地球表面各种负荷变化是 GPS 垂向周期性运动的主要影响因素，而在云南地区，陆地水的质量变化是该区域 GPS 垂向周期性运动的主要影响因素（姜卫平等，2013；Jiang *et al.*, 2017），因此笔者从 EOST Loading Service<sup>①</sup> 下载了 2010—2015 年全球陆地水文负荷模型（GLDAS）解算的垂向位移格网数据（CM），数据空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，时间分辨率为 3 h。基于云南地区各格网点垂向位移时间序列，采用线性 + 年周期 + 半年周期方法拟合得到各格网点年周期运动正弦波振幅  $A$  和余弦波振幅  $B$ ，为了与 GPS 连续站结果比对，采用多核函数法空间插值获取云南地区 26 个 GPS 连续站所在空间位置的年周期运动正弦波振幅  $A_1$  和余弦波振幅  $B_1$ 。

(2) 方法 2：GRACE 模型方法。利用 GRACE 数据给出的地球重力场球谐系数（Bruinsma *et al.*, 2010）和负荷勒夫数（Farrell, 1972），可以根据弹性负荷形变理论获取负荷引起的形变信息（Wahr *et al.*, 1998；Kusche, 2005；Fu *et al.*, 2012）。笔者按照 Hao 等（2016）的方法处理了 CSR 提供的 GRACE-RL05 数据：使用 GCM05S 模型去掉平均重力场；用 SLR 观测的 C20 项系数项和一阶项系数替换模型中相应值；采用高斯滤波方法去除高阶模型噪声，最终得到了 26 个 GPS 连续站所在空间位置的垂向位移结果（采样率为每月），采用线性 + 年周期 + 半年周期方法拟合得到各 GPS 连续站的年周期运动正弦波振幅  $A_2$  和余弦波振幅  $B_2$ 。

(3) 方法 3：空间加权法。基于 Zhan 等（2017）给出的 2010—2015 年云南地区 26 个 GPS 连续站垂向位移时间序列（进行了预处理，包括去除了仪器更换等原因产生的突跳），采用线性 + 年周期 + 半年周期方法拟合得到各连续站年周期运动正弦波振幅  $A_0$  和余弦波振幅  $B_0$ 。对某一个 GPS 连续站（记为插值点），根据其余 25 个连续站的年周期运动正弦波振幅  $A_0$  和余弦波振幅  $B_0$ ，采用空间加权法插值得到插值点的年周期运动正弦波振幅  $A_3$  和余弦波振幅  $B_3$ ：

$$A_3 = \frac{\sum_{j=1}^{25} \frac{A_{0j}}{d_j^2}}{\sum_{j=1}^{25} \frac{1}{d_j^2}}; B_3 = \frac{\sum_{j=1}^{25} \frac{B_{0j}}{d_j^2}}{\sum_{j=1}^{25} \frac{1}{d_j^2}} \quad (1)$$

式中： $d_j$  为插值点与第  $j$  个 GPS 连续站的水平距离； $A_{0j}$  和  $B_{0j}$  为第  $j$  个 GPS 连续站的年周期运动正弦波和余弦波振幅。

(4) 方法 4：多核函数法。该方法计算过程与方法 3 类似，对于每一个 GPS 连续站，都是其它 25 个 GPS 连续站垂向年周期运动参数（ $A_0$  和  $B_0$ ）空间插值得到插值点的年周期运动参数（ $A_4$  和  $B_4$ ），唯一的区别就是空间插值采用多核函数法。多核函数法由美国 Hardy（1971）提出，其空间插值计算过程如下：

$$\begin{cases} f(\lambda, \varphi) = \sum c_j s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = S^T C \\ s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j) = d_j^{1.1} + 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $f(\lambda, \varphi)$  为多核函数； $s_j(\lambda, \varphi, \lambda_j, \varphi_j)$  为多核函数； $d_j^{1.1}$  为球面上 2 点间的大地线长度（单位为 km）； $c_j$  为待定系数（杨国华等，2012）。将所有可用的数据点作为核函数点，可以获得数学解析式，计算任一空间位置的结果。

## 2 效果评估

本文依据 4 种方法与 GPS 连续观测得到的垂向年周期运动振幅差异和一致性评估各方法的效果。

<sup>①</sup> [http://loading.ustrasbg.fr/ditr/\\_form.php](http://loading.ustrasbg.fr/ditr/_form.php).

2.1 振幅差异

图 1 给出了 GPS 连续观测得到的垂向年周期运动与 4 种方法结果之间的差异，从中可以看出：①方法 1 和方法 2 与 GPS 连续观测的垂向年周期运动振幅差异较大，且方向上大体一致，说明这 2 种方法得到的垂向年周期运动与 GPS 连续观测结果存在系统的时间差；②方法 3 和方法 4 与 GPS 连续观测的垂向年周期运动振幅差异比前 2 种方法偏小，且差异的方向较为杂乱、没有表现出较为明显的规律，说明后 2 种方法更为接近 GPS 连续站得到的垂向年周期运动。表 1 给出了 4 种方法与 GPS 实测结果的振幅差异统计结果，4 种方法与 GPS 连续站实测的振幅差异平均值分别为 4.97, 3.31, 1.38, 1.43 mm，而 26 个 GPS 连续站实测的垂向年周期运动振幅平均值为 9.87 mm，可见方法 1 和方法 2 与 GPS 实测结果的差异较为显著（分别达到实测振幅的 50.35% 和 34.95%）。

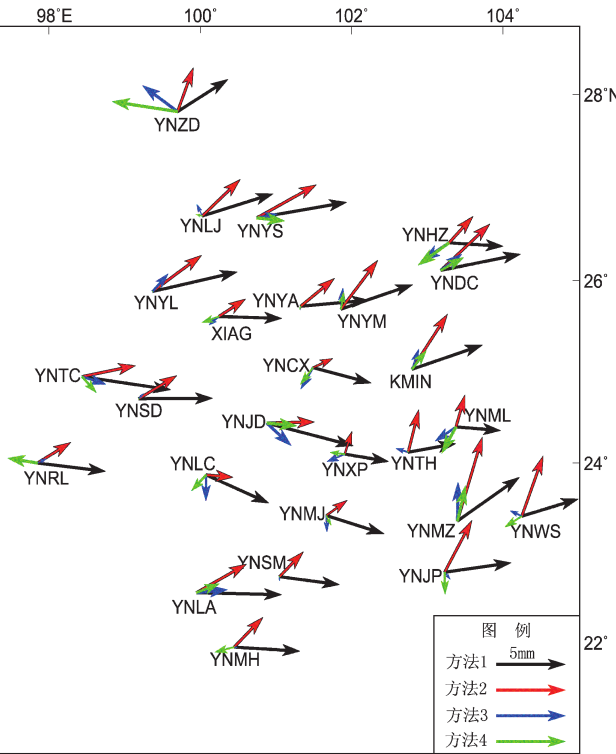


图 1 4 种方法与 GPS 连续观测的年周期运动差异  
Fig. 1 Difference of crustal annual motions between continuous GPS and four methods

表 1 4 种方法与 GPS 连续观测的年周期运动振幅差异  
Tab. 1 Difference of crustal annual motion amplitude between continuous GPS and four methods (单位: mm)

振幅	GPS	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
最大值	12.52	6.61	5.84	3.07	4.78
最小值	7.43	3.23	1.57	0.21	0.00
平均值	9.87	4.97	3.31	1.38	1.43

2.2 一致性评估

本文用 WRMS 减速比 (Fu, Freymueller, 2012) 来评估各方法得到的垂向年周期参数与 GPS 连续站时间序列的一致性，定义为：

$$Ratio_w = \frac{WRMS_G - WRMS_m}{WRMS_G - WRMS_f} \tag{3}$$

式中： $Ratio_w$  表示 WRMS 减速比； $WRMS_G$  是 2010—2015 年 26 个 GPS 连续站垂向时间序列去除线性后  $WRMS$  值； $WRMS_m$  是 GPS 垂向时间序列去除线性后再去除年周期运动后的残差  $WRMS$  值； $WRMS_f$  是 GPS 垂向时间序列去除线性和年周期运动后的残差  $WRMS$  值。

$Ratio_w$  能够反映 GPS 连续站的垂向时间序列和各方法求得的年周期运动相位和振幅的一致性。图 2 给出了 4 种方法的  $Ratio_w$  结果，从中可以看出后 2 种方法的绝大多数测站  $Ratio_w$  大于 0.9，远远优于前 2 种方法，但方法 3 和 4 中 YNZD 站  $Ratio_w$  相对较小（图 2c, d）。表 2 给出了 4 种方法的  $Ratio_w$  统计结果，其平均值分别为 0.70, 0.84, 0.95, 0.94，表明方法 3 和 4 效果大体相当，优于方法 1 和 2，相对而言，方法 2 的效果优于方法 1。

表 2 4 种方法的  $Ratio_w$  统计结果  
Tab. 2 Static results of WRMS reduction ratio of the four methods

$Ratio_w$	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
最大值	0.82	0.95	0.99	0.99
最小值	0.58	0.60	0.79	0.56
平均值	0.70	0.84	0.95	0.94

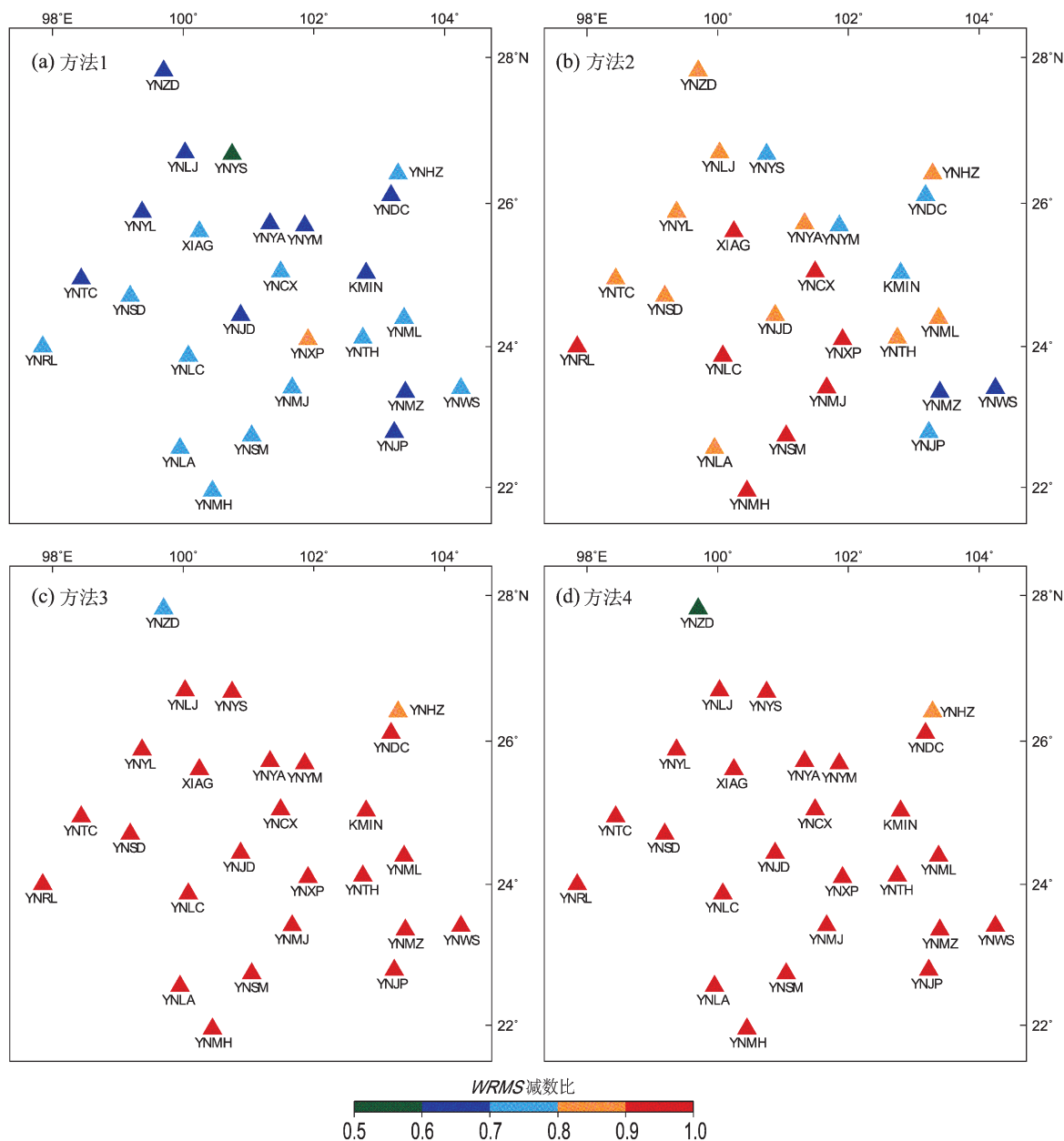


图 2 4 种方法的  $Ratio_w$   
Fig. 2 WRMS reduction ratio of four methods

3 讨论

从 4 种方法的整体评估结果可以看出，方法 1 和方法 2 得到的垂向年周期运动无论是振幅大小还是运动方向，均与 GPS 连续观测的结果存在较大的差异，而方法 3 和方法 4 利用 GPS 连续观测进行空间内插，得到的垂向年周期运动与 GPS 连续观测结果一致性较好。

由于全球负荷模型是基于全球观测数据建立的

模型，模型建立时使用的中国大陆范围内的实测数据较少，因此在中国大陆尤其是云南这样的局部区域与实测数据一致性较差，使得全球负荷模型得到的垂向年周期运动与 GPS 实测结果差异较大。

方法 2 的 GRACE 模型得到的垂向周期性信号反映的是区域空间尺度达 300 ~ 400 km 的整体形变，GPS 垂向周期性信号不仅反映了区域整体形变，还可能叠加一些局部效应（姜卫平等，2013；Yan *et al.*, 2016），因此 GRACE 得到垂向年周期运动振幅与 GPS 实测结果存在一定差异。



需要说明的是:不同的全球负荷模型(方法)在中国大陆的符合程度存在差异,同时 GRACE 数据处理方法(方法2)也存在一定的差异,这2种方法在中国大陆的应用优化值得更为深入的研究。

云南地区 GPS 连续站较多,且区域垂向周期性运动空间一致性较好,各点的垂向年周期运动无论是振幅大小还是初相均较为一致(Zhan *et al.*, 2017),因此2种空间插值的方法效果要优于前2种方法,而且方法3和方法4评估结果大体相当,说明只要区域内垂向周期性运动空间一致性较好,即使选用不同的空间内插方法,对结果影响不大。值得注意的是,在26个GPS连续站中,YNZD站空间位置最为突出(最北端),周边的GPS连续站与之距离较远,因此在方法3和方法4中,该站利用其余25个测站空间内插得到的垂向年周期运动参数与实测结果差异最大,这说明2种空间插值方法要求GPS连续站的分布尽量均匀。

上述4种方法各有优劣,虽然在本文的实验中,方法1和方法2的效果不如方法3和4,但前2种方法可以直接利用已有的全球负荷模型和GRACE给出的任意一点垂向位求得任意一点的垂向年周期运动。方法3和方法4虽然效果较好,但是对区域内GPS连续站的数量和分布有一定的要求,在实际应用中可能受到限制。事实上,目前中国大陆仍有一些区域GPS连续站较少,以陆态网络为例,目前中国大陆范围内只有260个GPS连续站,平均站间距为130 km,仅少数区域如首都圈、南北地震带GPS连续站密度相对较高(云南地区GPS连续站平均站间距79 km),在西藏、东北、华南等区域GPS连续站较少,因此方法1和2在这些GPS连续站较少的区域仍然有一定的实际使用价值。

## 4 结论

本文选用4种获取GPS垂向年周期运动参数的方法,以GPS连续观测得到的垂向年周期运动结果评估了这4种方法的效果,结果表明:由于云南地区GPS连续站较多且垂向年周期运动空间一致性较好,利用GPS连续观测的垂向年周期运动参数进行空间插值(方法3和方法4)都能够取得较好的效果,GRACE模型方法(方法2)效果稍

差,负荷模型方法(方法1)效果最差,因此对于获取区域内(如GPS流动站)的垂向年周期运动参数,在GPS连续观测站较多的区域,建议采用空间加权法(方法3)或者多核函数法(方法4);在GPS连续站较少的区域,建议采用GRACE模型方法。

由于本文的主要目的是验证垂向年周期运动信息的构建模型有效性,因此只考虑了季节性运动中最主要的年周期运动,但本方法也适用于其它周期性运动(如半年周期运动)。

感谢 NASA 提供 GRACE 数据、EOST 提供全球陆地水文负荷模型垂向位移数据。

## 参考文献:

- 方颖,江在森,邵志刚,等. 2014. 利用GPS连续资料分析川滇地区的地壳变形特征[J]. 地震研究,37(2):204-209.
- 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.
- 李长军,甘卫军,秦姗兰,等. 2018. 滇中主要活断层现今活动性研究[J]. 地震研究,41(3):381-389.
- 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.
- 刘任莉,李建成,姜卫平,等. 2013. 联合GRACE与GPS比较山西省垂向地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版),38(40):426-430.
- 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.
- 王岩,洪敏,邵德胜,等. 2018. 基于GPS资料研究云南地区地壳形变动态特征[J]. 地震研究,41(3):368-374.
- 杨国华,杨博,占伟,等. 2012. 玉树和汶川地震前后区域水平形变的空间分布[J]. 地震,32(2):40-51.
- 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.
- 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.
- Bruinsma S, Lemoine J M, Biancale R, *et al.* 2010. CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation[J]. *Advances in Space Research*, 45(4):587-601.
- Farrell W E. 1972. Deformation of the Earth by surface loads[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10(3):761-797.

- Fu Y, Freymueller J T, Jensen T. 2012. Seasonal hydrological loading in southern Alaska observed by GPS and GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(15):15310, doi:10.1029/2012GL052453.
- Fu Y, Freymueller J T. 2012. Seasonal and long-term vertical deformation in Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(B3):3407, doi:10.1029/2011JB008925.
- Hao M, Freymueller J T, Wang Q L, *et al.* 2016. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 437:140–141, doi:10.1016/j.epsl.2015.12.038.
- Hardy R L. 1971. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 76(8):1905–1915.
- 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.
- Kusche J. 2005. Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004jb003556.
- 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]. *Journal of Geophysical Research*, 118(10):5722–5732.
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research*, 103(B12):30205–30230.
- Yan H, Chen W, Yuan L. 2016. Crustal vertical deformation response to different spatial scales of GRACE and GCMs surface loading[J]. *Geophysical Journal International*, 204(1):505–516.
- Zhan W, Li F, Hao W F, *et al.* 2017. Regional characteristics and influencing factors of seasonal vertical crustal motions in Yunnan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 210(3):1295–1304.

## Accurate Acquisition and Method Evaluation of GPS Annual Vertical Motion

LI Jingwei<sup>1</sup>, ZHAN Wei<sup>1</sup>, LIANG Hongbao<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, GUO Nannan<sup>1</sup>

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

(2. *School of Geology and Geomatics, Tianjing Chengjian University, Tianjin 300384, China*)

### Abstract

For the accurate acquisition of annual vertical motion parameters based on GPS, four methods are used, namely the load model method (based on vertical displacements from Global hydrology loading model), the GRACE model method (based on vertical displacements from GRACE solution), the spatially weighted method and the multi-surface function method (those are used for spatial interpolation of the annual vertical motion parameters inferred from continuous GPS (cGPS) station). Then, the annual vertical motion parameters obtained from 26 cGPS stations for the period 2010–2015 in Yunnan were used as criteria to evaluate the effects of these four models. The average amplitude difference between the four methods and the GPS continuous station is 4.97, 3.31, 1.38, and 1.43 mm. The average WRMS reduction ratio of the four methods is 0.70, 0.84, 0.95, and 0.94. The results show that: due to the high density of cGPS stations and the spatial consistency of annual vertical motion in Yunnan, the spatial weighted model and the multi-surface function model are the best. The GRACE model is the third and the load model is the worst. Therefore, it is suggested that the spatially weighted models or the multi-surface function models should be used in areas with dense cGPS network, and the GRACE models are recommended in areas where cGPS stations are not abundant.

**Keywords:** annual vertical motion; method evaluation; continuous GPS observation; spatial interpolation