

基于河北 CORS 网的地壳垂直运动速度场模型研究^{*1}

陈 醒^{1,3)} 程鹏飞²⁾ 成英燕³⁾ 范文涛⁴⁾ 王晓明³⁾ 王福丽³⁾

(1) 辽宁电力勘测设计院,沈阳 110005
(2) 国家测绘产品质量检验测试中心,北京 100830
(3) 中国测绘科学研究院,北京 100830
(4) 东北煤田地质局一〇七勘探队,阜新 123100

摘 要 采用河北 CORS 网一期站点近 4 年的 GPS 观测数据,利用 GAMIT/GLOBK 软件进行地壳垂直运动速度场解算。结果表明:河北地壳垂直运动以下降为主,东南平原地区为严重沉降区,局部地区 3 年累计沉降量已超过 150 mm;11 月垂直下降速率比 4 月快,较大的速率差值已超过 10 mm/a。利用多面函数法建立河北地壳垂直运动速度场模型,计算了 6'×6'格网速度值,并绘制了垂直运动速度等值线图。

关键词 垂直运动;速度场;形变分析;多面函数;格网速度

中图分类号:P207;P315.72+5 文献标识码:A

MODEL OF CRUSTAL VERTICAL MOVEMENT VELOCITY FIELD BASED ON HEBEI CORS NETWORK

Chen Xing^{1,3)}, Cheng Pengfei²⁾, Cheng Yingyan³⁾, Fan Wentao⁴⁾, Wang Xiaoming³⁾ and Wang Fuli³⁾

(1) Liaoning Electric Power Survey and Design Institute, Shenyang 110005
(2) Quality and Testing Center of National Mapping Products, Beijing 100830
(3) Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830
(4) No. 107 Prospecting Team, Geological Bureau of Northeast Coalfield, Fuxin 123100

Abstract The vertical crustal movement velocity field in Hebei is calculated using the GAMIT/GLOBK software with GPS observational data of the first-stage stations of Hebei CORS network in the past four years. The results show that the mainly vertical crustal movement is a downward motion and that southeast plain region is a serious settlement area in Hebei. The cumulative subsidence in the past three years is more than 150 mm in part areas. And the vertical descent rate in November is faster than that in April. The larger difference of rate has more than 10 mm/a. The model of vertical crustal movement velocity field in Hebei is established based on the method of multiquadric functions and 6'×6'grid velocity is calculated and the isoline map of vertical movement velocity is drew.

Key words: vertical movement; velocity field; deformation analysis; multiquadric functions; grid velocity

1 引言

中国地壳运动 GPS 观测网络工程(简称“网络

工程”)主要是为监测地壳运动而建设的空间技术观测网。近年来我国很多学者利用该网络工程的监测数据对中国大陆的垂直运动进行了深入的研究,

* 收稿日期:2012-09-19

基金项目:地心坐标系维护与推广应用(A1201);卫星连续运行站数据处理(A1928);863 项目:全球动态地心坐标参考框架维持关键技术(2013AA122501)

作者简介:陈醒,男,硕士研究生,主要研究方向 GNSS 数据处理及地壳运动速度场模型. E-mail: chenxing238@163.com

取得了一大批成果^[1-6]。有研究发现,10 年来华北地区垂直下降运动剧烈,局部地区垂直下降速度达到 120 mm/a^[7]。华北地区人口稠密,经济发达,如此大的下降速度,无疑会对社会发展、人类经济活动造成灾难性影响。为清楚认识该区地表垂直下降真实速度,本文将以河北省 2009—2012 年 CORS 网的 GPS 观测资料作为数据源,对河北地区地壳垂直运动速度场进行解算,分析其垂直形变的特征。

2 速度场解算

河北省 CORS 网一期 27 个站点,主要分布在唐山、沧州、保定、衡水、石家庄、邢台等平原地区(图 1)。站点观测设备大部分为 NETR5 型双频接收机和 TRMTGN 型天线,观测采样间隔为 30 s(观测资料覆盖时间范围见表 1),共观测了 7 期,每期每站连续观测 7 天。

地壳垂直运动速度场解算采用 GAMIT/GLOBK 软件(10.40 版)。在计算站点坐标和卫星轨道的单日松弛解时,选择北京房山(BJFS)、上海(SHAO)、IRKT 等 12 个站点作为控制站,IGS 站坐标为 IERS 发布的 ITRF2005 框架下的坐标;利用得到的单日松弛解生成残差图,将解算精度差的数据降权处理;之后进行整网平差,得到 ITRF05 框架下的站点坐标及运动速度值。解算结果表明,N、E、U 三个方向的坐标平均精度分别为 0.59、0.64、2.29 mm,速度平均精度分别为 0.32、0.33、1.20 mm/a(图 1)。

由于 4~5 月有 4 期观测数据,利用每期的观测数据计算出一个坐标,得到 2009—2012 年每年 4 月的垂直形变量如图 2 所示。

为了检验河北地区垂直运动是否受季节因素影响,分别利用 4、11 月前后的观测资料,经整体平差后,计算出 4、11 月的垂直运动速度值(图 3)。

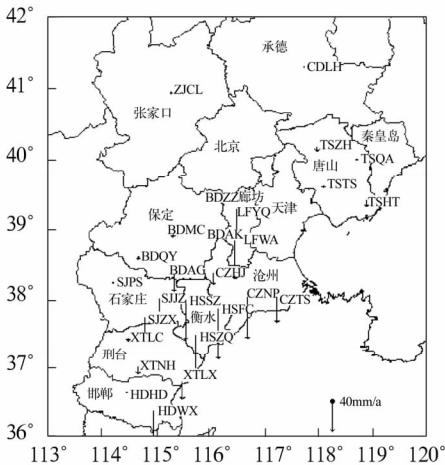


图 1 河北地壳垂直运动速度场

Fig. 1 Velocity field of crustal vertical movement in Hebei

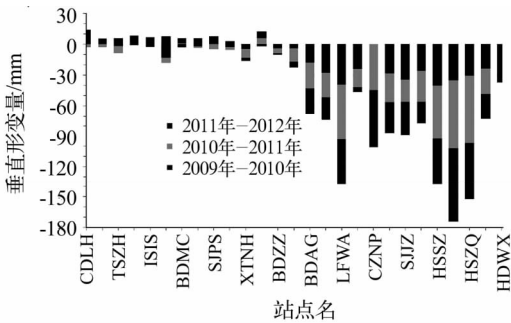


图 2 2009—2012 年每年 4 月的垂直形变量

Fig. 2 Vertical deformation in April of each year from 2009 to 2012

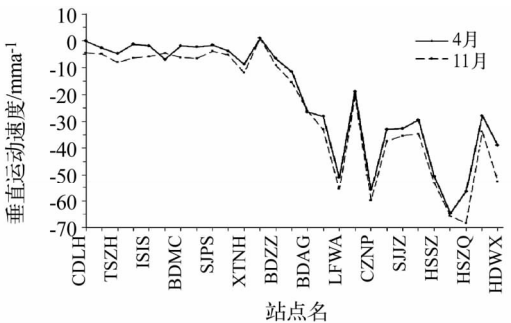


图 3 4 月和 11 月垂直运动速度对比

Fig. 3 Comparison between vertical movement velocities in May and November

3 垂直形变分析

从图 1 可以看出,河北地区 2009 年 4 月至 2012 年 4 月的垂直运动以下降为主,主要下降地区为东南平原地区,而在东北、西北、西南等高原、山地、盆地地区下降幅度很小,其中衡水、沧州南皮(CZNP)、廊坊文安(LFWA)等平原地区站点垂直下降速度超过 40 mm/a,为严重沉降区。

表 1 一期数据覆盖的时间范围

Tab. 1 Time coverage of the first-stage data

年	日期(年积日)	
2009	4月29—5月5日(119—125)	11月3—11月9日(307—313)
2010	4月29—5月5日(119—125)	10月25—10月31日(298—304)
2011	4月14—4月20日(104—110)	11月3—11月9日(307—313)
2012	4月8—4月16日(99—107)	

图 2 为 2009—2012 年每年 4 月前后的垂直形变量。从图 2 可以看出,位于盆地、山地等地区的站点,2009—2011 年为下降趋势,这与该地区长期的继承性构造运动相反,而 2011—2012 年为上升趋势,恢复正常。2009—2011 年的下降可能是受 2008 年汶川地震的影响所致。位于东南平原地区的站点 2009—2012 年均均为下降趋势,但每年的下降幅度却不同,衡水、沧州南皮(CZNP)、廊坊文安(LFWA)等站点,2010—2012 年的下降幅度明显变大,衡水阜城(HSFC)、衡水枣强(HSZQ)等站点三年累计沉降

量已超过 150 mm。

从图 3 可以看出,每年 11 月的垂直下降速度比 4 月的快,说明河北地区受季节因素影响,垂直方向运动有周期性。其中唐山乐亭(TSLT)站点与其他站点不同,可能是 11 月只有两期观测数据,解算结果不够准确所致。

图 4 为 11 月相对于 4 月的垂直运动速率差值,差值平均值为 -3.74 mm/a。其中衡水枣强(HSZQ)、邯郸魏县(HDWX)等站点已经超过 -10 mm/a,说明其周期性运动比较明显。

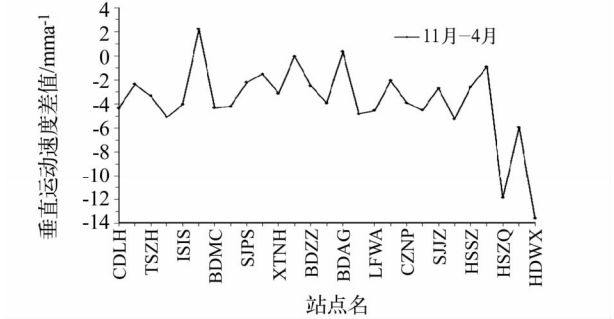


图 4 11 月相对于 4 月垂直运动速率差值
Fig. 4 Differences of vertical movement velocity in November relative to April

自第四纪以来,河北平原地区由地质构造运动造成的年沉降量为 1~3 mm/a,且近年来无强震发生。河北省为半干旱地区,常年过量超采深层承压水,造成地层压缩,地表沉降。可以认为,人为因素已经成为河北平原地区沉降的主导因素。

4 垂直运动速度场模型的建立

利用多面函数法建立河北地壳垂直运动速度场模型。多面函数法的基本思想是任何一个规则或不规则的连续曲面均可以由若干简单面叠加逼近。

设一数学表面上点(x,y)处的速率v(x,y)为:
$$v(x,y) = \sum_{i=1}^u \alpha_i Q(x,y);(x_i,y_i)) \quad (1)$$
式中,Q((x,y);(x_i,y_i))为核函数,上限u为在建模点中选取的中心结点个(核函数个数),α_i(i=1,2,⋯,u)为待估参数,(x_i,y_i)为选取的中心结点。多面函数拟合时的点位坐标用大地坐标(b,l)表示,其拟合模型为:

$$v(b,l) = \sum_{i=1}^u \alpha_i Q((b,l);(b_i,l_i)) \quad (2)$$

式中,v(b,l)为站点垂直运动速度值。

使用多面函数法时,首先需要选择核函数,为了计算方便我们选择对称型的核函数:

$$Q((b,l),(b_i,l_i)) = [(b-b_i)^2 + (l-l_i)^2 + \delta]^\beta \quad (3)$$

式中δ为核函数平滑因子,一般在 0.001~1.00 之间取值。β取 1/2 时,为正双曲面函数,取 -1/2 时,

为负双曲面函数。根据文献[8]的研究结论,所以,本文只研究正、负两种双曲面函数。

设构造误差方程为:

$$\begin{aligned} V &= AX - L \quad (4) \\ A &= \begin{bmatrix} Q((b_1,l_1);(b_1,l_1)) & Q((b_1,l_1);(b_2,l_2)) & \cdots & Q((b_1,l_1);(b_u,l_u)) \\ Q((b_2,l_2);(b_1,l_1)) & Q((b_2,l_2);(b_2,l_2)) & \cdots & Q((b_2,l_2);(b_u,l_u)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q((b_n,l_n);(b_1,l_1)) & Q((b_n,l_n);(b_2,l_2)) & \cdots & Q((b_n,l_n);(b_u,l_u)) \end{bmatrix} \\ X &= \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_u \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} v(b_1,l_1) \\ v(b_2,l_2) \\ \vdots \\ v(b_n,l_n) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

根据最小二乘原理,得

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (5)$$

由于不同的结点数、平滑因子、核函数,对多面函数模型的精度影响很大,所以需要根据实际情况反复试算。本文均匀选择 27 个建模点中的 1/3、1/2、2/3、8/9 为结点数进行研究,实验结果见表 2。

表 2 不同参数的模型中误差统计 (单位:mm/a)

δ	β=1/2 β=-1/2 β=1/2 β=-1/2 β=1/2 β=-1/2 β=1/2 β=-1/2							
	u=9	u=9	u=14	u=14	u=18	u=18	u=24	u=24
0.001	7.66	19.3	3.91	14.56	2.94	13.34	1.46	4.33
0.005	7.62	15.96	3.72	11.51	2.71	10.9	1.38	3.62
0.01	7.61	14.24	3.59	10.15	2.56	9.76	1.34	3.42
0.05	7.72	10.51	3.26	7.07	2.05	6.68	1.28	2.79
0.1	7.9	9.14	3.25	5.56	1.84	5.05	1.34	2.31
0.5	8.84	7.79	4.32	2.35	2.15	2.03	1.68	1.61
1	9.35	8.4	5.02	3.1	2.86	2.14	1.83	1.73

从表 2 可以看出,随着结点数的增加,模型中误差逐渐减小。当结点数相同时,正双曲面函数受平滑因子的影响较小,中误差之差基本在 2 mm/a 以内;负双曲函数受平滑因子的影响较大,中误差之差可达到 10 mm/a。正双曲面函数,当光滑系数为 0.05 左右时,中误差较小;而反双曲面函数在 0.5 左右时,中误差较小。当结点数为 24 时,正双曲面函数模型中误差最小为 1.28 mm/a,负双曲面函数模型中误差最小为 1.61 mm/a。

本文最终选择正双曲面函数,24 个节点、光滑系数为 0.05,建立河北地壳垂直运动速度场模型,模型精度为 1.28 mm/a,计算河北 6'×6'的格网垂直运动速度值。由于数据量较大,格网点速度结果文中并未给出,依据格网点速度值,绘制河北垂直运动速度等值线图如图 5 所示。图 5 反映出河北垂直下降运动剧烈地区主要在东南平原地区。

5 结论

1)河北地区 2009-04—2012-04 月期间的地壳垂直运动以下降为主,垂直下降速率大的地区主要

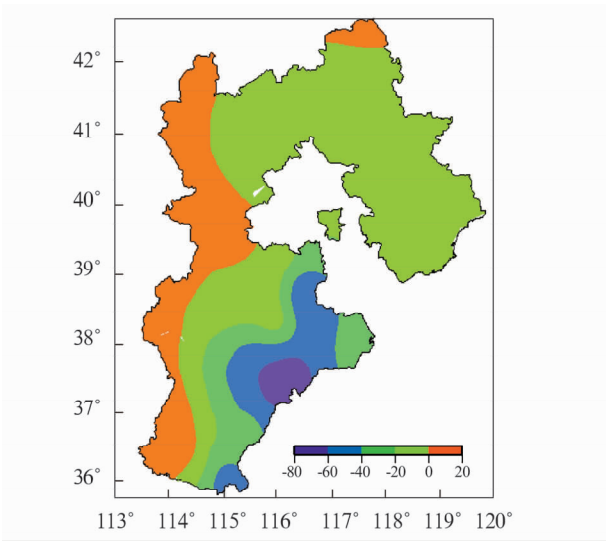


图5 河北垂直运动速度等值线沉降量(单位:mm/a)

Fig.5 Isoline of vertical movement velocity in Hebei

在其东南方向的平原区,沉降量一般在 -30 mm/a 左右,以衡水地区下降幅度最大,达 -60 mm/a ,衡水阜城、枣强等地区三年累积沉降量已超过 150 mm ,为严重沉降区;山地下降幅度较小,一般在 -5 mm/a 左右。

2)地壳的垂直运动具有周期性,11月垂直下降速度比4月下降速度快,枣强(HSZQ)、魏县(HD-WX)等地区的下降运动速率差值达到 10 mm/a 。

3)利用多面函数法建立河北地区的地壳垂直运动速度场模型,正双曲面函数较为适合,均匀选择24个中心结点,当光滑系数为0.05时,模型精度较高,可达 1.28 mm/a 。

参 考 文 献

1 刘经南,等. 中国大陆现今垂直形变特征的初步探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2002,(3):1-5. (Liu Jingnan, et al. Preliminary research on characteristic of present-day vertical deformation of China mainland[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics ,2002,(3):1-5)

2 顾国华. GPS 观测得到的中国大陆地壳垂直运动[J]. 地震,2005,25(3):1-8. (Gu Guohua. Vertical crustal movement obtained from GPS observation in China mainland [J]. Earthquake, 2005, 25(3):1-8)

3 董克刚,等. 利用 GPS 监测天津市地面沉降的可行性研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(4):68-71. (Dong Kegang, et al. Study on monitoring land subsidence in Tianjing with GPS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, (4):68-71)

4 黄立人,马青,王若柏. 中国大陆部分地区的地壳垂直运动[J]. 大地测量与地球动力学,2004,(4):7-12. (Huang Liren, Ma Qing and Wang Ruobai. Vertical crustal movement in a part of China mainland [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, (4):7-12)

5 荣敏,等. 利用 GPS 基准站数据浅析我国地壳垂直运动[J]. 测绘工程,2009,18(4):7-9. (Rong Min, et al. Analysis on vertical crustal motion of China based on datum of GPS fiducial station[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2009,18(4):7-9)

6 陈光保,等. 基于改进最小二乘配置的地壳垂直形变分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,(4):128-132. (Chen Guangbao, et al. Analysis of vertical crust deformation by using improved least square collocation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,(4):128-132)

7 张风霜,薄万举. GPS 结果应用于地面沉降研究的初步探讨[J]. 测绘科学,2012. (Zhang Fengshuang and Bo Wan-ju. Primary discussion about the application of GPS results to research of ground subsidence[J]. Science of Surveying and Mapping,2012)

8 黄立人,等. 多面函数拟合在地壳垂直运动研究中的应用[J]. 测绘学报,1993,22(1):25-32. (Huang Liren, et al. The application of fitting method of multiquadric functions in research on crustal vertical movement[J]. Acta geodaetica et Cartographica in Sinica, 1993, 22(1):25-32)