

利用连续 GPS 观测数据分析长江三角洲地区地壳变形

吴继忠^{1,2} 朱丽强² 龚俊³

1 南京工业大学测绘学院,江苏南京,211816

2 苏州工业园区测绘地理信息有限公司,江苏苏州,215027

3 浙江省地震局,浙江杭州,310013

摘要:利用长江三角洲区域内 19 个 GPS 连续运行参考站 2007~2013 年间的观测数据,计算得到了该区域 ITRF2005 参考框架下的三维速度场、应变参数及区域参考框架下的速度场。结果表明,在 ITRF2005 框架下,水平方向平均速率为 33.97 mm/a,优势方向为 NE 111.5°;相对于欧亚板块的水平方向平均速率为 9.36 mm/a,优势方向为 NE 85.6°;高程方向以沉降为主,最大沉降速率为 15.22 mm/a,平均沉降速率为 4.7 mm/a;该区域块体以 N 29.4°E 的拉张为主,达到 $2.4 \times 10^{-9}/a$,同时兼有 N 119.4°E 的挤压,达到 $1.3 \times 10^{-9}/a$ 。

关键词:连续运行参考站;坐标时间序列;速度场;应变参数

中图法分类号:P228

文献标志码:A

长江三角洲地区位于华北块体南部,地形格局以平原为主,低山丘陵为辅,地质构造复杂,区域构造变动以断裂为主^[1]。该区域是我国经济最发达、人口最为密集的地区之一,城市的高度集中和经济的快速发展使得土地开发程度很高,因而导致环境地质问题日益突出。GPS 技术突破了时间和空间的约束,可快速提供高精度的地壳变形数据和地壳运动速度场,成为当前监测现今地壳运动的理想手段,并在全球范围内得到了应用和验证^[2-4]。熊福文等人利用长江三角洲地区 14 个 GPS 基准站 3 a 的观测数据,用 GIPSY 软件计算得到了基准站坐标时间序列,重点定量分析了大气压、积雪、土壤湿度质量负载、非潮汐海洋负载等地球物理机制因素引起的 GPS 基准站的垂向季节性变化^[5],但没有进行变形趋势和特点的分析。

本文利用 GAMIT/GLOBK 软件处理了长江三角洲地区内 19 个连续运行参考站 2007~2013 年间近 7 a 的 GPS 观测数据,获取了参考站在 ITRF2005 框架下的三维速度场,并求取了应变参数,同时分析了不同参考框架下地壳变形规律。

1 GPS 观测资料与数据处理

长江三角洲所跨的江苏、浙江、上海 3 个省市均在各自所辖范围内布设了 GPS 连续运行参考站,本文使用了其中 18 个连续运行参考站及 IGS 余山站(SHAO)的观测数据,各个参考站的建站时间不统一,江苏省内的 12 个站点观测资料的时间跨度为 6.8 a,上海市范围内 4 个站点的时间跨度为 3.8 a,浙江省范围内 3 个站点的时间跨度为 5.3 a,所有观测资料的采样均为 30 s,时间统一截至 2013 年 11 月 30 日。

数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件(版本 10.35)完成。首先进行区域网的基线解算,将参考站的单天观测数据及周边 10 个 IGS 站(BJFS、DAEJ、IRKT、KIT3、KUNM、LHAZ、POL2、TC-MS、URUM、WUHN)的数据进行联合解算,得到单日松弛解;然后将单日松弛解和 SOPAC 发布的全球子网单日松弛解文件 IGS1 一起进行无约束平差,并用 GLOBK 确定 IGS05 核心站单天解与 ITRF2005 参考框架间的转换参数,从而得到区域内 19 个站点在 ITRF2005 参考框架下的

收稿日期:2013-12-26

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41504024);江苏省测绘地理信息科研资助项目(JSCHKY201413);江苏省博士集聚计划资助项目(201342)。

第一作者:吴继忠,博士,副教授,主要从事 GNSS 精密定位研究。E-mail: jzwumail@163.com

单天解的原始坐标时间序列。图 1 给出了桃阳

(TAOY) 和平湖(ZHAP) 两个站的结果。

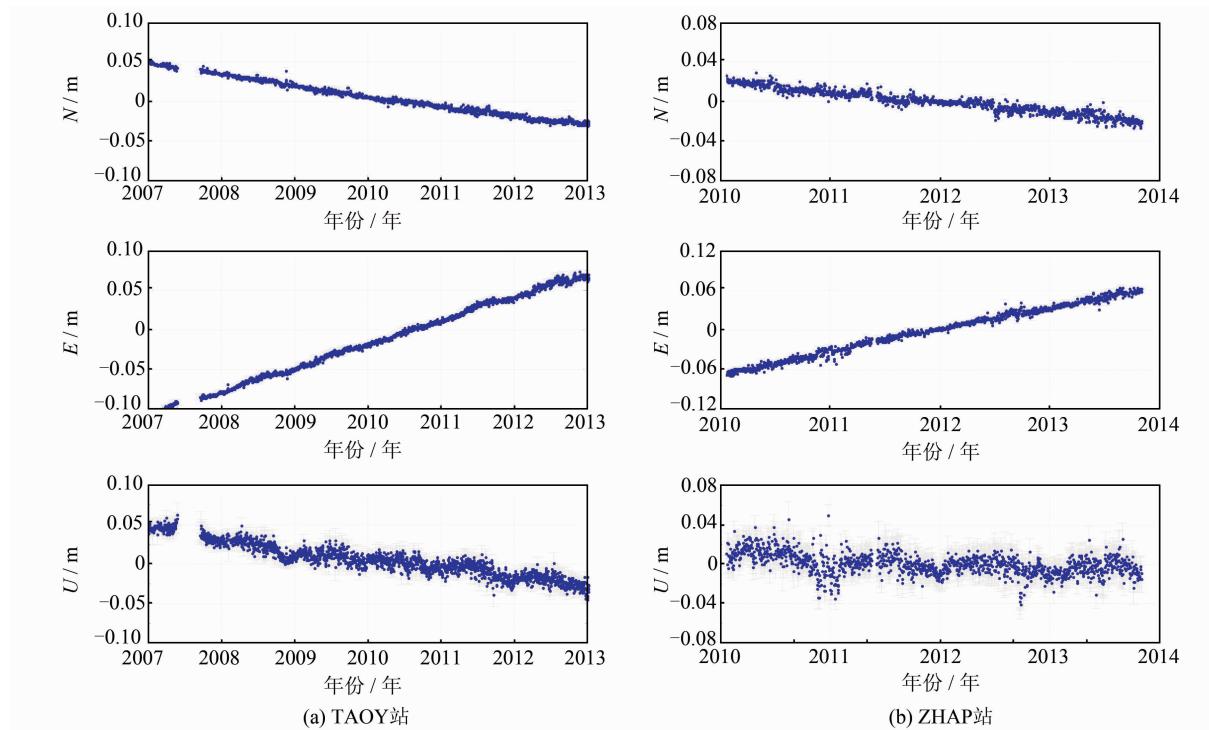


图 1 TAOY 和 ZHAP 两个参考站的坐标时间序列

Fig. 1 Raw Coordinate Time Series of TAOY and ZHAP Reference Stations

2 速度场的建立和分析

由参考站的坐标时间序列数据可估计出测站的运动速率,值得关注的是,噪声类型的确定对速率的估计精度有很大的影响。本文采用极大似然估计同时估计出测站速率、阶跃、年周期和半年周期振幅以及噪声类型。极大似然估计方法实质上是以时间序列为观测值,将上述变量作为待估参数(其中观测噪声可用不同模型的组合来表示),使观测值的残差与其协方差的联合概率密度值达到最大,这种方法不要求观测值均匀采样,相对频谱分析而言,可克服频谱泄露的问题,被认为是目

前最准确的噪声分析方法^[6,7]。在计算过程中比较不同噪声模型的极大似然对数值,发现不同噪声模型计算得到的三个方向的运动速率差异很小,但运动速率的估计精度有一定的区别。表 1 列出了各个参考站在 ITRF2005 框架站心坐标系下的运动速率及对应的精度。

由表 1 中各个方向的估计结果可以看出,平面方向的速率估计精度明显优于高程方向,参考站的运动速率估值具有很高的精度,这主要得益于观测数据具有较长的时间跨度。嘉兴(JIAX)、启东(QIDO)、嘉定(SHJD)三个站由于建站时间略短(其中启东站于 2011 年 2 月迁站,文中使用迁站后的观测数据估计速率),速率估计精度明显

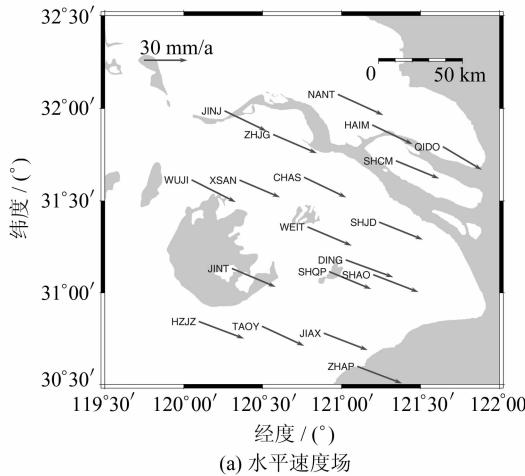
表 1 参考站在 ITRF2005 框架下的运动速率及其精度/(mm·a⁻¹)

Tab. 1 Estimated Velocities and Accuracy of Reference Stations in the ITRF2005 Framework/(mm·a⁻¹)

参考站	N	E	U	参考站	N	E	U
CHAS	-13.23 ± 0.06	30.68 ± 0.06	1.20 ± 0.19	SHCM	-11.94 ± 0.07	31.53 ± 0.08	-2.71 ± 0.20
DING	-12.84 ± 0.06	32.26 ± 0.06	-3.00 ± 0.18	SHJD	-11.86 ± 0.11	32.85 ± 0.13	-2.70 ± 0.36
HAIM	-12.60 ± 0.04	29.54 ± 0.04	-2.76 ± 0.13	SHQP	-11.74 ± 0.07	30.50 ± 0.07	0.65 ± 0.18
HZJZ	-11.24 ± 0.05	32.76 ± 0.05	-1.53 ± 0.13	TAOY	-13.21 ± 0.03	30.16 ± 0.02	-11.52 ± 0.07
JIAX	-10.18 ± 0.11	32.46 ± 0.12	-2.05 ± 0.28	WEIT	-12.55 ± 0.02	31.93 ± 0.03	-0.09 ± 0.07
JINJ	-13.38 ± 0.04	30.54 ± 0.04	-8.73 ± 0.12	WUJI	-14.47 ± 0.04	32.00 ± 0.04	-15.22 ± 0.13
JINT	-12.80 ± 0.03	31.99 ± 0.03	-2.52 ± 0.09	XSAN	-11.30 ± 0.07	29.87 ± 0.07	-8.15 ± 0.21
NANT	-13.60 ± 0.04	32.71 ± 0.05	-3.44 ± 0.12	ZHAP	-10.32 ± 0.08	33.74 ± 0.09	-4.49 ± 0.22
QIDO	-14.73 ± 0.20	30.36 ± 0.18	1.16 ± 0.46	ZHJG	-12.88 ± 0.05	31.38 ± 0.04	-2.64 ± 0.12
SHAO	-11.51 ± 0.05	32.73 ± 0.05	-3.65 ± 0.13				

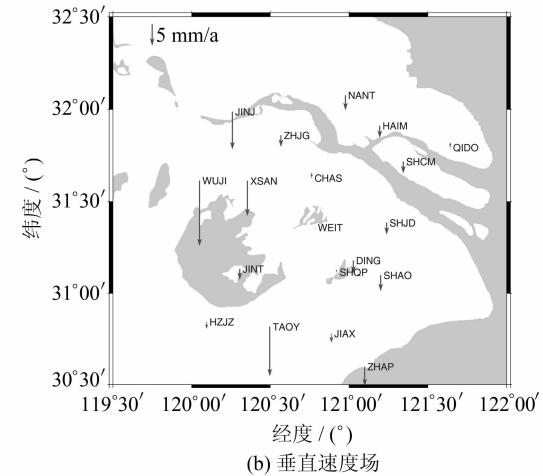
低于其他站点,其余16个站点N、E方向的速率估计精度均优于0.1 mm/a,U方向的速率估计精度优于0.25 mm/a。

从整个区域内各个参考站水平方向速率的大小和符号来看,其整体一致性较好,如各个站点N方向速率的符号一致,数值大小也非常接近,范围在-14.73~-10.18 mm/a之间,平均值为



(a) 水平速度场

-12.44 mm/a;E方向与N方向也有类似的特点,范围在30.68~33.74 mm/a之间,平均值为31.58 mm/a。图2(a)给出了参考站的水平速度场,可见,在ITRF2005框架下,所有站点的走向一致,运动方向为东南,优势方向为NE 111.5°,这一特征与现有的研究成果相吻合^[8,9]。



(b) 垂直速度场

图2 参考站在ITRF2005框架下的三维速度场

Fig. 2 3D Velocities Field of Reference Stations in the ITRF2005 Framework

图2(b)给出了参考站的垂直速度场,可以看到,该区域内有16个站点在高程方向出现沉降,其中沉降速率最大的是武进站(WUJI),达到了15.22 mm/a,其次是桃阳站(TAOY),达到了11.52 mm/a,由此可基本确定区域内由上述两个参考站位置所在的沉降中心,两个沉降中心的变化趋势则相差较大,武进站的沉降速率有逐年减小的趋势,而桃阳站的沉降速率一直很稳定。高程方向最为稳定的是唯亭站,其平均年变化率仅有0.09 mm。表现出上升趋势的站点有3个,但上升速率较小,均未超过1.2 mm/a。可见该区域内地面沉降的现象十分突出,这一问题的起因主要是地下水的超量开采使得地下水位大幅下降导致地面沉降^[10],目前正在采取减少地下水开

采、人工回灌、调整地下水等防治措施,地面沉降的现象在逐渐缓解。

考虑高程方向有明显的周期性运动,在估计运动速率的同时还估计了高程方向的运动振幅,表2给出了周年和半周年运动振幅及对应的精度。目前对于高程方向的周期性变化已经形成了广泛的共识,主要由大气、非海洋潮汐、积雪和土壤水等因素造成^[11-13]。在表2的结果中,天线墩类型的不同造成了振幅大小的区别,振幅依次最大的四个站点湖州(HZJZ)、余山(SHAO)、平湖(ZHAP)、嘉兴(JIAX)均为基岩点,其余站点均为楼顶或土层上的观测墩,可见基岩点所能捕获的周期性运动振幅更为显著,因此基岩站点的高程时间序列能够更加真实客观地反映各种地球物理机制的作用和影响。

表2 高程方向周年和半周年运动振幅及其精度/mm

Tab. 2 Estimated Annual and Semiannual Amplitudes and Their Accuracies for Vertical Component/mm

参考站	周年振幅	半周年振幅	参考站	周年振幅	半周年振幅
CHAS	1.66 ± 0.49	0.80 ± 0.49	SHCM	3.26 ± 0.37	0.99 ± 0.36
DING	2.25 ± 0.37	2.65 ± 0.37	SHJD	5.58 ± 0.46	1.86 ± 0.45
HAIM	1.84 ± 0.35	1.59 ± 0.35	SHQP	2.50 ± 0.35	0.85 ± 0.34
HZJZ	6.70 ± 0.39	0.42 ± 0.39	TAOY	3.69 ± 0.27	1.61 ± 0.27
JIAX	5.85 ± 0.49	1.08 ± 0.49	WEIT	2.96 ± 0.26	1.24 ± 0.26
JINJ	2.50 ± 0.34	1.39 ± 0.34	WUJI	2.56 ± 0.36	0.89 ± 0.36
JINT	2.21 ± 0.33	1.47 ± 0.32	XSAN	3.13 ± 0.42	2.29 ± 0.42
NANT	3.19 ± 0.32	1.29 ± 0.32	ZHAP	6.38 ± 0.47	1.71 ± 0.47
QIDO	1.49 ± 0.55	0.61 ± 0.53	ZHJG	2.53 ± 0.33	1.20 ± 0.33
SHAO	6.50 ± 0.39	0.70 ± 0.39			

3 区域地壳变形及应变分析

在 ITRF2005 框架下的速度场反映了该区域在全球框架下的整体运动势态,这一结果是相对于全球基准的。对局部区域的地壳运动进行分析时,需要得到站点在区域参考框架下的速度,为此以欧亚板块为参考,将 ITRF2005 框架下的速度场扣除欧亚板块速度,得到所有测站相对于欧亚板块的运动速率。计算过程中,欧拉矢量参数的取值参考 NNR-NUVEL1A 模型^[9],结果见图 3。

由图 3 可看出,参考站以欧亚板块为参考的速度场在数值上明显减小,方向与 ITRF2005 框架下的速度场方向有明显区别,总体运动趋势为东西方向,向东方向运动的趋势尤其明显,其速率远高于南北方向。计算结果显示,东方向平均速率为 9.25 mm/a,北方向速率在 $-1.39 \sim 3.04$ mm/a,水平方向平均速率为 9.36 mm/a,优势运动方向为 NE 85.6°。

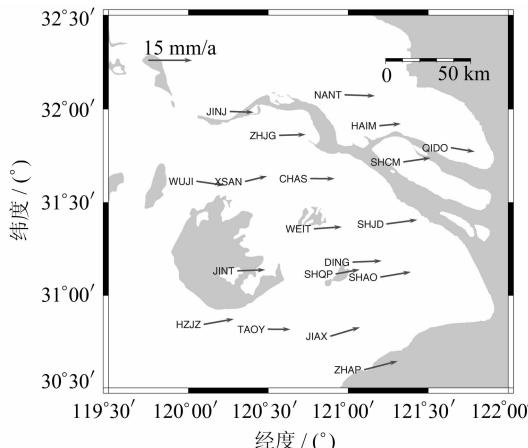


图 3 参考站相对于欧亚板块的水平速度场

Fig. 3 Horizontal Velocities Field Relative to Eurasia Plate

将研究区域作为一个块体,以 19 个参考站的水平速度场为已知量计算各项应变参数,得到第一剪应变为 $-0.58 \times 10^{-9}/a$,第二剪应变为 $0.48 \times 10^{-9}/a$,主张应变为 $2.4 \times 10^{-9}/a$,主压应变为 $1.3 \times 10^{-9}/a$,主张应变方位角为 29.4°,最大剪应变为 $1.1 \times 10^{-9}/a$,面应变为 $3.6 \times 10^{-9}/a$ 。从计算结果可以看出,该区域以 N 29.4°E 的拉张为主,达到 $2.4 \times 10^{-9}/a$,同时兼有 N 119.4°E 的挤压,达到 $1.3 \times 10^{-9}/a$,可以概括为该块体受到东西向压缩、南北向拉张的形变,同时具有北东-南西向拉张、北西-南东向压缩的形变,由于主张应变大于主压应变,主张应变占优势。

根据不同参考框架下的速度场信息及应变分析结果,再结合李延兴等人的研究成果^[8],可以推断:长江三角洲地区地壳形变的主要受力来源于太平洋板块向欧亚板块南西向较强的俯冲碰撞,从而使该区域产生东西向压缩、南北向拉张的形变;欧亚板块受到大西洋中脊扩张向东的推力是该区域明显向东运动的关键因素。

4 结语

对地质构造复杂的长江三角洲地区,以近 7 a 的连续 GPS 观测数据分析了该区域的地壳变形特点。通过观测数据的严密处理得到参考站的坐标时间序列,进而估计出高精度的速度场结果。分析结果表明,长江三角洲地区的地壳运动以东西向压缩、南北向拉张为主;垂直方向以沉降为主,区域内两个沉降中心位于武进和桃阳,武进站的沉降速率呈逐年减小的趋势,桃阳站的沉降速率则比较稳定,高程方向的周年和半周年运动振幅表明基岩站点能更加突出地捕捉各种地球物理机制的作用和影响。未来将进一步充分利用该区域内密集的 GPS 参考站,更加精细地描述该区域地壳的变形特征。

参 考 文 献

- [1] Wang Xiaoping, Zhu Yuanqing, Li Huimin, et al. Seismic Tomography Inversion of 3D Crust Structure in Shanghai and Adjacent Areas[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(4): 341-347(王小平, 朱元清, 李惠民, 等. 上海及其邻近地区三维地壳结构层析成像[J]. 西北地震学报, 2006, 28(4): 341-347)
- [2] Zeng Bo, Zhang Yanfen, Jiang Weiping, et al. Velocity Analysis of Shanxi CORS Fiducial Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1 401-1 404(曾波, 张彦芬, 姜卫平, 等. 山西 CORS 网基准站速度场分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(12): 1 401-1 404)
- [3] Liao Chaoming, Ye Shirong, Zhou Xiaohui, et al. Present-day Tectonic Characteristics of Crustal Movement in Guangxi Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 557-561(廖超明, 叶世榕, 周晓慧, 等. 广西区域现今地壳运动构造特性研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 557-561)
- [4] Kaniuth K, Vetter S. Vertical Velocities of European Coastal Sites Derived from Continuous GPS Observations[J]. *GPS Solution*, 2005, 9(1): 32-40

- [5] Xiong Fuwen, Zhu Wenyao. Land Deformation Monitoring by GPS in the Yangtze Delta and the Measurements Analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(6): 1 719-1 730(熊福文,朱文耀. 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,2007, 50(6): 1 719-1 730)
- [6] Williams S D P. The Effect of Coloured Noise on the Uncertainties of Rates Estimated from Geodetic Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 76(9): 483-494
- [7] Li Zhao, Jiang Weiping, Liu Hongfei, et al. Noise Model Establishment and Analysis of IGS Reference Station Coordinate Time Series Inside China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 496-503(李昭,姜卫平,刘鸿飞,等. 中国区域IGS基准站坐标时间序列噪声模型建立与分析[J]. 测绘学报,2012, 41(4): 496-503)
- [8] Li Yanxing, Zhang Jinghua, Li Zhi, et al. Horizontal Crustal Movement in China's Mainland and Its Surrounding Areas Obtained from the Combined GPS Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(4): 301-307(李延兴,张静华,李智,等. 由GPS网融合得到的中国大陆及周边地区的地壳水平运动[J]. 测绘学报,2003, 32(4): 301-307)
- [9] Yao Yibin. Analysis of Crustal Movement Characteristics in the China Mainland by High Precision Repeated Measurements of GPS Network[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4): 1 030-1 037(姚宜斌. 利用高精度复测GPS网进行中国大陆区域地壳运动特征分析[J]. 地球物理学进展,2008, 23(4): 1 030-1 037)
- [10] Xie Xingnan. On Properties and Genesis of Geological Disasters and Their Prevention Proposals in Jiangsu[J]. *Journal of Geology*, 2009, 33(2): 154-159(谢兴楠. 江苏地质灾害特征、成因及防治建议[J]. 地质学刊,2009, 33(2): 154-159)
- [11] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS Derived Site Position Time Series[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(B4): 2 075. doi:10.1029/2001JB000573
- [12] Wang Min, Shen Zhengkang, Dong Danan. Effects of Non-tectonic Crustal Deformation on Continuous GPS Position Time Series and Correction to Them[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1 045-1 052(王敏,沈正康,董大南. 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, 2005, 48(5): 1 045-1 052)
- [13] Jiang W P, Li Z, Van Dam T, et al. Comparative Analysis of Different Environmental Loading Methods and Their Impacts on the GPS Height Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(7): 687-703

An Analysis of the Crustal Deformation in the Yangtze River Delta Area Using Continuous GPS Observations

WU Jizhong^{1,2} ZHU Liqiang² GONG Jun³

1 College of Geomatics Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

2 Suzhou Industry Park Surveying, Mapping and Geoinformation Co., Ltd., Suzhou 215027, China

3 Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

Abstract: The GPS observations from 19 continuously operating reference stations distributed in the Yangtze River delta area from 2007 to 2013 were processed using the GAMIT/GLOBK software package, and the estimated coordinate time series were used to determine the velocities of reference stations in the ITRF2005 frame. Strain parameters and velocities relative to the Eurasian Plate were also estimated. These results show that Yangtze River delta area moves at $33.97 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ in the NE 111.5° direction in the ITRF2005 frame, while the average horizontal velocity relative to the Eurasian Plate is $9.36 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ in the direction of NE 85.6° . In the vertical direction, the maximum subsidence rate is $15.22 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, and the average rate of subsidence is $4.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. The maximum extension rate is $2.4 \times 10^{-9}/\text{a}$ and with the compressing rate of $1.3 \times 10^{-9}/\text{a}$ in the direction of N 119.4° E.

Key words: continuously operating reference stations; coordinates time series; velocity field; strain parameters

First author: WU Jizhong, PhD, associate professor, specializes in GNSS precise position. E-mail:jzwumail@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41504024; the Scientific Research Program for Jiangsu Provincial Surveying, Mapping and Geoinformation, No. JSCHKY201413; Doctor-aggregating Project of Jiangsu Province, China, No. 201342.