



中国大陆速度场在CGCS2000坐标转换中的应用研究

王建红, 李涌涛, 马洪磊

引用本文:

王建红, 李涌涛, 马洪磊. 中国大陆速度场在CGCS2000坐标转换中的应用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(4): 398–402.

Wang Jianhong, Li Yongtao, Ma Honglei. Research on the Application of Velocity Field in Chinese Mainland in CGCS2000 Coordinate Conversion[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(4): 398–402.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.04.013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大规模GNSS网数据处理一体化方案与中国大陆水平格网速度场模型构建研究

Research on an Integrational Scheme of Large-Scale GNSS Network Data Processing and Establishment of the Horizontal Grid Velocity Field Model in Chinese Mainland

大地测量与地球动力学. 2020, 40(9): 881–887, 897 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2020.09.001>

GNSS监测的川滇地区地壳形变动态变化特征

GNSS Monitoring Dynamic Variation Characteristics of Crustal Deformation in the Sichuan–Yunnan Region

大地测量与地球动力学. 2019, 39(2): 111–116, 177 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2019.02.001>

地震大地测量学及其对地震预测的促进——50年进展、问题与创新驱动

Earthquake Geodesy and Earthquake Prediction: Progress, Innovations and Problems Over Fifty Years

大地测量与地球动力学. 2017, 37(6): 551–562 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2017.06.001>

板块运动规律梳理及其源动力实验计算研究

Carding the Law of Plate Movement and Experimental Calculation Research on the Power Source of Plate Movement

大地测量与地球动力学. 2021, 41(6): 551–560 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2021.06.001>

大旋转角空间直角坐标转换改进模型研究

Study on an Improved Model for Ill-Conditioned Three-Dimensional Coordinate Transformation with Big Rotation Angles

大地测量与地球动力学. 2017, 37(5): 441–445 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2017.05.001>

中国大陆速度场在 CGCS2000 坐标转换中的应用研究

王建红¹ 李涌涛² 马洪磊³

1 中铁第一勘察设计院集团有限公司,西安市西影路 2 号,710043

2 西安测绘总站,西安市西影路 36 号,710054

3 信息工程大学地理空间信息学院,郑州市科学大道 62 号,450001

摘要: 基于中国大陆区域 2 074 个具有实测速度的已知测站,进行中国大陆速度场在 CGCS2000 坐标转换中的应用研究。采用不同内插组合方法,充分考虑未知点与已知速度测站的距离因素,使已知速度测站的数据得到充分利用。相比于单纯利用速度场格网模型,该方法得到的未知点速度精度具有较大幅度提高,其在点位 X、Y、Z 三个方向上的历元归算精度最高可提高 24.00 cm、10.89 cm 和 17.82 cm,对利用已知速度的测站提高历元归算精度具有一定指导意义。

关键词: 陆态网;CGCS2000;速度场;坐标转换

中图分类号: P228

文献标识码: A

CGCS2000 坐标的启用确立了已有测绘成果的统一标准^[1]。CGCS2000 坐标原点位于包括海洋和大气的整个地球的质量中心,轴向在 1984.0 时与国际时间局定向一致,整个地球水平构造运动的无净旋转可保证定向随时间演变^[2-3]。CGCS2000 由约 2 600 个 GPS 大地点在 2000.0 历元坐标和速度下实现,以 ITRF97 为参考框架,其实现精度在 2000.0 历元时优于 3 cm^[4]。CGCS2000 坐标系的成果转换需经过框架转换和历元归算,其中历元归算可根据已有的速度场模型或已知速度的点位进行计算^[5]。中国大陆速度场模型的建立方法有欧拉矢量法、多曲面函数拟合法、克里金插值法和最小二乘配置法等,研究表明这些方法均具有相同量级的精度^[5-8]。在速度场模型应用方面,已知速度测站的不均匀分布会导致格网精度不一致,因此在实际历元归算应用中,该类格网的速度精度具有较大的改善空间。本文利用中国大陆 2 074 个 GNSS 站数据解算的各站坐标及速度,基于欧拉矢量法建立 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 格网速度。通过与魏子卿等^[4]建立的相同空间分辨率的格网速度进行比较,并基于速度场模型和已知速度的测站,对采用不同内插方法计算的历元归算精度进行分析。

1 欧拉矢量法速度场建模

根据欧拉定理,将地球近似为球体,对于变化速度单位为 cm/a 的板块运动来说,地球半径变化可忽略不计。则欧拉矢量可表示为^[9]:

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (1)$$

式中, \mathbf{V} 为块体内某点的运动速度, $\boldsymbol{\Omega}$ 为该点的欧拉矢量, \mathbf{r} 为该点的矢径。欧拉定理在空间直角坐标系中的表示形式为^[8]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_x \\ \mathbf{V}_y \\ \mathbf{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}_x \\ \boldsymbol{\Omega}_y \\ \boldsymbol{\Omega}_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \mathbf{V}_x 、 \mathbf{V}_y 、 \mathbf{V}_z 为该点在地心坐标系下的速度, (x, y, z) 为该点的地心坐标, $\boldsymbol{\Omega}_x$ 、 $\boldsymbol{\Omega}_y$ 、 $\boldsymbol{\Omega}_z$ 为欧拉矢量的 3 个分量。

2 速度场内插方法

2.1 最近邻点插值法

最近邻点插值法的原理为任意网格点的属性值与其几何位置最近点的属性值相同,即将每一个网格节点的最近邻点 $L_{\min}(x_i, y_i, z_i)$ 值作为待求点 $L(x, y, z)$ 的节点值,其插值如下^[7,10]:

收稿日期:2021-07-18

项目来源:国家自然科学基金(41904042)。

第一作者简介:王建红,高级工程师,主要从事精密工程测量与变形监测研究,E-mail: 21131471@qq.com。

通讯作者:李涌涛,工程师,主要从事高精度 GNSS 数据处理研究,E-mail: 641594920@qq.com。

$$V_L = V_{d_{i(\min)}} \tag{3}$$

式中 $d_{i(\min)} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$ 为未知点与已知点的最短距离。

2.2 反距离加权法

反距离加权法是一种加权平均插值法。设在空间分布一系列离散点 $W(x,y,z)$, 已知待插值点坐标为 $W(x_i,y_i,z_i)$, 根据周围离散点数值 $Z_i (i=1,2,\cdots,n)$, 通过距离加权插值法求得 W 点数值为^[7]:

$$Z_w = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{[d_i(x,y,z)]^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{[d_i(x,y,z)]^k}} \tag{4}$$

式中, $0 \leq k \leq 2$ (本文取 $k = 1$), $d_i(x,y,z) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$ 为离散点到待插值点距离。

2.3 格网内插法

利用已建立的 $N^\circ \times N^\circ$ 速度场格网模型, 选取未知点邻近的 4 个格网点进行双线性内插, 从而得到未知点速度 (图 1)。格网双线性内插公式为:

$$V_E(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \beta_0 + q\Delta\beta) = (1-p)(1-q)V_{E_{0,0}} + p(1-q)V_{E_{1,0}} + q(1-p)V_{E_{0,1}} + pqV_{E_{1,1}} \tag{5}$$

式中, $0 \leq p < 1, 0 \leq q < 1$, $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\beta$ 分别为经线和纬线方向上的格网宽度。

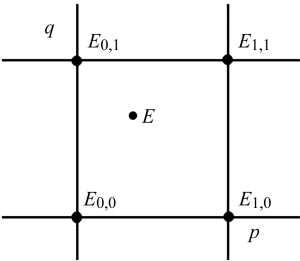


图 1 格网双线性内插
Fig. 1 Grid bilinear interpolation

3 CGCS2000 坐标转换中历元归算方法

CGCS2000 历元归算可根据相应的速度场模型将测站观测历元的坐标归算至 2000.0 历元上。任意历元 T_1 的站点坐标转换至 2000.0 历元可表示为^[11]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{2000.0} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{T_1} + (T_1 - 2000.0) \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \tag{6}$$

式中, T_1 为观测历元, V_x, V_y, V_z 为测站在 ITRF 框架下的速度。

4 速度场建模与应用分析

4.1 速度场格网模型建立

利用中国大陆 2013~2019 年 2 074 个 GNSS 站观测数据, 以中国周边 16 个 IGS 站为基准进行单日解算和网平差, 得到每个测站的单日解, 并通过对测站坐标单日解时间序列进行一元线性回归解算得到各测站速度。

根据实际解算的 2 074 个测站速度数据建立不同方法、不同分辨率下的中国大陆速度场模型。速度场格网模型建立步骤如下: 1) 将经纬度范围 ($72^\circ \sim 135^\circ \text{E}, 18^\circ \sim 54^\circ \text{N}$) 按 $3^\circ \times 3^\circ$ 空间分辨率分为 137 个格网; 2) 利用每个格网中已知速度的测站, 根据最小二乘原理及式 (2) 计算每个格网的欧拉矢量; 3) 采用式 (2) 计算格网中心点速度并作为该格网的速度 (中心点格网速度场); 4) 采用式 (2) 计算每个格网点的速度, 并取相邻 4 个格网点的平均值作为该格网点的速度 (4 点格网速度场), 用于格网内插。

本文建立的中心点格网速度场与文献 [4] 对应的格网速度差值及统计值如图 2 和表 1 (单位 mm/a) 所示。

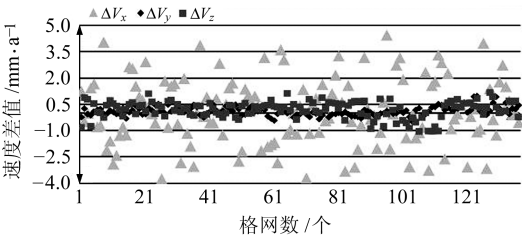


图 2 中心点格网速度场速度差值
Fig. 2 The difference of velocity field of central point grid

表 1 中心点格网速度场速度差值统计
Tab. 1 Statistics of the difference of velocity field of central point grid

速度差值	ΔV_x	ΔV_y	ΔV_z
最大值	4.43	0.96	1.16
最小值	-4.81	-0.51	-1.07
绝对值平均值	1.58	0.21	0.43
平均值	0.07	0.10	0.18

由图 2 可知, 两个格网速度场中 X 方向的速度差值比 Y 和 Z 方向大一个量级, 其原因为 X 方向速度比 Y 和 Z 方向大一个量级, 相同量级的速度作差后其差值也相差一个量级。由表 1 可知, 两个速度场对应的每个格网中 X, Y, Z 三个方向差值的最值、平均值和绝对值平均值, 相对其 3 个方向的平均速度 ($-31.72 \text{ mm/a}, -6.42 \text{ mm/a}, -9.6 \text{ mm/a}$)^[4] 差异较小。总体而言, 两个速度场模型精度相当, 进一步证明本文建立的速度场

具有可靠性。

4.2 速度场在历元归算中的应用分析

统计 2 074 个测站实测速度与其所在中心点格网速度场的速度差值,结果如图 3 和表 2(单位 mm/a)所示,从 2020.0 历元归算至 2000.0 历元的坐标差值如表 3(单位 cm)所示。

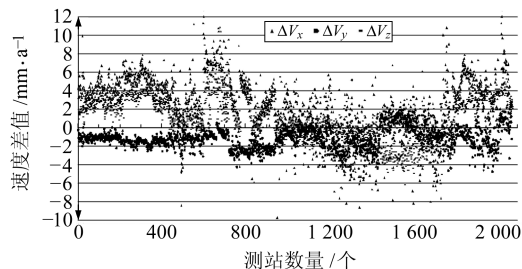


图 3 2 074 个测站实测速度与其所在中心点格网速度场速度差值
Fig. 3 The difference between the measured velocity of 2 074 stations and the velocity field of their central point grid

表 2 2 074 个测站实测速度与其所在中心点格网速度场速度差值统计

速度差值	ΔV_x	ΔV_y	ΔV_z
最大值	12.00	5.20	8.91
最小值	-9.87	-5.45	-6.14
绝对值最大值	12.00	5.45	8.91
绝对值平均值	3.24	1.41	2.12
平均值	2.23	-1.14	1.13

表 3 采用实测速度与中心点格网速度场对 2 074 个测站历元归算(2020.0 归算至 2000.0)后的坐标差值统计

坐标差值	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔL
最大值	24.00	10.40	17.82	24.00
最小值	-19.74	-10.90	-12.28	-19.74
绝对值最大值	24.00	10.89	17.82	31.82
绝对值平均值	6.48	2.82	4.24	8.24
平均值	4.46	-2.28	2.26	5.50

由图 3 和表 2 可知,2 074 个测站实测速度与中心点格网速度场速度存在明显差异,X、Y、Z 三个方向的最大值分别为 12.00 mm/a、5.45 mm/a 和 8.91 mm/a,这是由于格网分辨率过大且欧拉矢量法建模存在一定精度限制所致。平均值和绝对值平均值较小,说明格网模型具有一定的合理性和有效性,能满足普遍情况下的历元估算精度。

由表 3 可知,在从 2020.0 历元归算至 2000.0 历元时,平均值和绝对值平均值较小,说明利用速度场模型进行历元归算的普适性较好。测站较少区域的速度场模型精度有限,因此历元归算精度也

偏低。速度间差异导致 X、Y、Z 三个方向的坐标差异最大达 24.00 cm、10.89 cm 和 17.82 cm,空间三维误差达 31.82 cm,表明不同测站的坐标均存在不同程度的差异,且随着时间增加差异逐渐增大。

利用本文建立的 3°×3°中心点格网速度场对 2 074 个测站实测速度进行历元归算。为减小历元归算误差、提高归算精度,基于本文建立的 3°×3°格网速度场和 2 074 个测站实测速度两类数据,充分考虑两者的实际有效性和适用范围后,根据每个待求速度测站周围的已知速度的测站个数及待求速度测站与已知速度测站之间的距离,采用不同方法进行速度内插,以提高历元归算精度。不同内插方法适用表见表 4。

表 4 不同内插方法适用表

Tab. 4 Applicable table of different interpolation methods					
距离/km	<20		20~100		>100
已知速度 点数/个	1	≥2	1	≥2	
内插 方法	最邻 近点	邻近点 平均值	5 个点反 距离加权	反距离 加权	4 点格网 内插

在 2 074 个测站中任意选取 5 个测站,在数据库中删除这 5 个测站的实际速度数据,其实际速度如表 5(单位 mm/a)所示。将 5 个测站作为未知速度测站,比较采用表 4 中内插方法计算的测站速度值与实际速度值的差异,结果如表 6(单位 mm/a)和图 4 所示。

表 5 5 个测站的实测速度

点号	V_x	V_y	V_z
1	-32.5	-4.5	-9.3
2	-38.9	2.3	-13.0
3	-26.3	-6.5	-9.2
4	-37.1	-4.1	-10.1
5	-34.5	-2.9	-11.4
最大值	-26.3	2.3	-9.2
最小值	-38.9	-6.5	-13.0
平均值	-33.9	-3.1	-10.6

表 6 5 个测站实测速度与不同内插方法组合速度差值统计

Tab. 6 Statistics of the difference between the measured velocity of 5 stations and the combination velocity of different interpolation methods			
测站	ΔV_x	ΔV_y	ΔV_z
1	2.0	1.5	-0.5
2	-2.4	-1.0	2.3
3	4.2	0.7	-2.5
4	-2.6	1.4	-0.1
5	0.6	0.6	1.1
最大值	4.2	1.5	2.3
最小值	-2.6	-1.0	-2.5
绝对值最大值	4.2	1.5	4.3
绝对值平均值	2.4	1.0	1.3
平均值	0.4	0.6	0.1

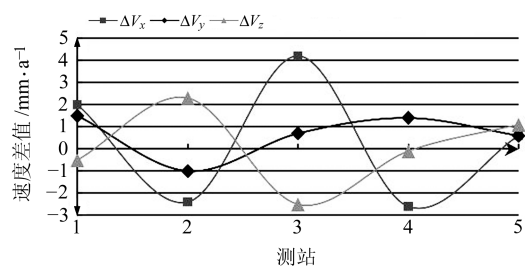


图 4 5 个测站实测速度与不同内插方法组合速度差值
Fig. 4 The difference between the measured velocity of 5 stations and the combination velocity of different interpolation methods

由表 6 和图 4 可知,根据 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 格网速度场和 2 074 个测站的已知速度,采用不同内插方法得到的速度与 5 个测站的实测速度在 X、Y、Z 三个方向上差值的绝对值平均值分别为 2.4 mm/a、1.0 mm/a 和 1.3 mm/a,两者差异较小,且差值平均值均小于 1 mm/a,表明不同内插方法组合计算的速度更接近实际速度。通过对比表 6 和表 2 可知,充分利用 2 074 个测站的实测速度并组合不同内插方法计算得到的测站速度,相比于格网速度场模型速度具有更高的精度,且更接近实际值,可达到进一步提高历元归算精度的目的。

5 结 语

速度场精度会直接影响 CGCS2000 坐标系历元归算的精度,即点位坐标在 CGCS2000 坐标系中的精度,而单纯采用速度场模型进行的历元归算,未顾及小范围内板块相对运动较小的特点以及在已知速度测站较少的区域内建立的速度场模型精度存在局限性。基于上述原因,本文在充分利用已知速度的测站并结合 4 点格网速度场模型的前提下,根据不同区域范围,组合利用最邻近点插值、反距离加权和格网内插 3 种方法对区域内未知点速度进行历元归算。结果表明,组合不同内插方法可合理利用不同范围和不同情况下区域内已知的测站速度,相比于单纯利用速度场格网更加科学合理,可使整体归算精度得到较大幅度提升,在 X、Y、Z 三个方向上的历元归算精度最高可提高 24.00 cm、10.89 cm 和 17.82 cm,对不同情况下利用已知速度的测站提高历元归算精度具有一定指导意义。

参考文献

[1] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1-5 (Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison

with WGS84[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(5): 1-5)

[2] 程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和 WGS84 的比较[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 189-194 (Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan, et al. Parameters of the CGCS2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS84[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(3): 189-194)

[3] 高涵. 基于高精度时序 GPS 处理的区域速度场及地壳形变特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2014 (Gao Han. Research on the Velocity Field of Areas and Crustal Deformation Characteristics on the Basis of High Precision GPS Time Series Processing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014)

[4] 魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 403-410 (Wei Ziqing, Liu Guangming, Wu Fumei. China Geodetic Coordinate System 2000: Velocity Field in Mainland China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(4): 403-410)

[5] 吴富梅, 刘光明, 魏子卿. 利用局域欧拉矢量法建立 CGCS2000 速度场模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(4): 432-435 (Wu Fumei, Liu Guangming, Wei Ziqing. Velocity Field Model of CGCS2000 Based on Euler Vector of Local Area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(4): 432-435)

[6] 宁津生, 王华, 程鹏飞, 等. 2000 国家大地坐标系框架体系建设及其进展[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(5): 569-573 (Ning Jinsheng, Wang Hua, Cheng Pengfei, et al. System Construction and Its Progress of China Geodetic Coordinate System 2000[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 569-573)

[7] 张勇. 不同数值内插方法建立我国速度场模型[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2011 (Zhang Yong. Different Numerical Interpolation Method to Establish Velocity Model[D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2011)

[8] 任雅奇. 基于 GPS 数据的中国地壳运动速度场模型的建立[D]. 郑州: 信息工程大学, 2012 (Ren Yaqi. Establishment of Chinese Crustal Movement Velocity Model Based on the GPS Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012)

[9] 陈醒. 中国大陆地壳运动速度场模型的构建方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013 (Chen Xing. Study of the Algorithm on Establishing Model of Crustal Movement Velocity in China Mainland[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013)

[10] 程鹏飞, 成英燕. 基于 GNSS 的 CGCS2000 数据处理技术综述[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43(12): 2 071-2 078 (Cheng Pengfei, Cheng Yingyan. An Overview of the CGCS2000 Coordinate Processing Technique Based on GNSS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2 071-2 078)

[11] 吴伟伟. 华北地区 GPS 连续站坐标序列特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2014 (Wu Weiwei. Insight into the Characteristics of GPS Time Series in North China[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA, 2014)

Research on the Application of Velocity Field in Chinese Mainland in CGCS2000 Coordinate Conversion

WANG Jianhong¹ LI Yongtao² MA Honglei³

1 China Railway First Survey and Design Institute Group Co Ltd, 2 Xiyiing Road, Xi'an 710043, China
2 Xi'an Technical Division of Surveying and Mapping, 36 Xiyiing Road, Xi'an 710054, China
3 School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Based on 2 074 known stations with actual measured velocities in Chinese mainland, we carry out the application research of velocity field in Chinese mainland in CGCS2000 coordinate conversion. We use different interpolation combination methods to fully consider the distance factor between unknown points and known velocity stations, so that the data of known velocity stations can be fully utilized. Compared with the calculations using velocity field grid model, the velocity accuracy of unknown points obtained by this method is improved substantially, and the accuracy of epoch conversion improves by up to 24.00 cm, 10.89 cm and 17.82 cm in X, Y and Z directions of the points, which is a guideline to improve the accuracy of epoch conversion using known velocity stations.

Key words: crustal movement observation network of China; CGCS2000; velocity field; coordinate conversion

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 41904042.
About the first author: WANG Jianhong, senior engineer, majors in precision engineering measurement and deformation monitoring, E-mail: 21131471@qq.com.
Corresponding author: LI Yongtao, engineer, majors in high-precision GNSS data processing, E-mail: 641594920@qq.com.

.....
(上接第 342 页)

window” in Anhui area in recent 30 years, and process the data using the “deformation rate accumulative analysis” method. We study the relationship between anomaly period and surrounding earthquakes, and analyze the overall characteristics of deformation rate accumulation of all sites in the same period. The results show that: 1) The deformation rate accumulative analysis can effectively extract the data of more than 2 times the standard deviation of each survey line, and the trend changes with smaller rates can be suppressed. 2) The deformation rate accumulative analysis not only extracts the deformation rate, but also retains the transition change of original data to a certain extent, and the frequency of deformation rate accumulation in the curve transition period increases obviously. 3) The effect of reflecting earthquakes in the period of continuous deformation rate accumulation is better, but lacks one-to-one correspondence, so it needs to be analyzed in combination with the survey line. 4) The frequency of deformation rate accumulation of each survey line in the study area differs in each period, indicating that the fault activity has certain time-sharing characteristics, and the time-sharing activity has group characteristics on a whole. 5) When the deformation rate accumulation of cross-fault leveling data in this area changes intensively, the possibility of M_s5.0 earthquake in east China will increase.

Key words: middle-south segment of Tan-Lu fault zone; deformation rate accumulative analysis; Huoshan seismic window; precursor anomaly

Foundation support: The Joint Open Found of Anhui Mengcheng National Geophysical Observatory, No. MENG0-202014; Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA, No. SJH-161207; Youth Fund of Anhui Earthquake Agency, No. 20200609.
About the first author: GE Jihua, engineer, majors in crustal deformation monitoring and observation data analysis, E-mail: 272807878@qq.com.
Corresponding author: SUN Jun, engineer, majors in crustal deformation monitoring and observation data analysis, E-mail: 403553256@qq.com.