

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2406000

# 基于快速傅里叶变换与小波变换的 GNSS 坐标时序 时空演化特征分析

尚 军, 南凯麒, 王明洋  
(天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384)

**摘要:** 中国位于欧亚板块东南部, 处于印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块的挤压夹持之中, 分布有广泛且复杂的地质构造, 成为了地壳运动较强且较为复杂的地区。GNSS 连续观测是获得地壳运动信息的重要来源, 从 GNSS 坐标时序提取周期及趋势项可为分析区域地壳运动提供研究基础。本文综合利用快速傅里叶变换与小波变换方法开展中国大陆地区 GNSS 坐标时序时空演化特征分析。首先采用对 GNSS 坐标时序进行预处理和降噪处理, 然后利用快速傅里叶变换方法在频域上对分区 GNSS 站点坐标时序进行周期提取, 最后依据 GNSS 测站周期, 利用小波变换方法进行分解与重构, 获得高频周期项结果和低频趋势项结果, 并开展相关分析。研究发现: ①在 1 年以内的时间尺度上, 除东北区域以外, 各方向上的周期均以 1 年周期为主, 半年周期次之, 季节周期较弱; ②各站点在 N、E、U 3 个方向上各年的一年、半年周期的周期长度均存在一定的伸长或收缩, 不同区域的不同站点随时间呈现出的周期强度变化存在一定差异; ③在研究时段内, 中国大陆地区在水平方向上的地壳运动趋势为: 中国西部呈现向东北偏移的趋势, 其余区域呈现向东南偏移的趋势, 且向东偏移的趋势略强于向南、北方向偏移的趋势, 在垂直方向上, 不同区域不同站点的运动趋势较为复杂。

**关键词:** 地壳运动; 时频分析; GNSS 坐标时间序列; 快速傅里叶变换; 小波变换

中图分类号: P226.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2024)06-0000-09

## Temporal and Spatial Evolution of GNSS Coordinates based on FFT and Wavelet Transform

SHANG Jun, NAN Kaiqi, WANG Mingyang

(School of Geology and Geomatics, TCU, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** China lies in the southeast of the Eurasian plate, which is squeezed by the Indian plate, the Pacific plate and the Philippine Sea plate. Under the influence of the crustal movement, the widespread and complex geological structures were generated in the Chinese mainland, and it become a region with strong and complex crusts. The complex geological structure also makes the Chinese mainland become one of the regions with frequent earthquakes in the world. The frequent earthquake disasters caused great damage to people's production and daily life and had the effect on normal operation of society. As all over the world, the establishment and perfection of GNSS reference station network, GNSS technology is one of the main methods of crustal movement monitoring and analysis, the time series of GNSS coordinates provides important basic data for the research of the class. In this paper, the continuous observation stations of CMONOC in mainland China is selected to analyze the GNSS coordinate time series by Fourier transform and wavelet transform. Firstly, GNSS coordinate time series was preprocessed and denoised. Then the cycle of the GNSS coordinate time series was extracted and analyzed by using fast Fourier transform method in frequency domain. Finally, according to the period information, the coordinate time series is decomposed and reconstructed by wavelet transform, the results of high-frequency period term and low-frequency trend term are obtained, and the results are analyzed. The main conclusions of the study are as follows: On the whole, the periodicity in the vertical direction of Chinese mainland is stronger than that in the horizontal direction of the north direction and the east direction, and the periodicity intensity in the north direction and the east direction is similar. In the time scale of one year or less, except for the northeast region, the period of all parties is dominated by annual cycle,

收稿日期: 2023-03-18; 修订日期: 2023-03-30

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2021ZD001)

作者简介: 尚 军(1968—), 男, 河北新城人, 副教授, 硕士。

followed by semi-annual cycle, and the seasonal cycle is weak in the vertical direction. The annual and semi-annual cycles of each site were extracted by wavelet decomposition. It can be found that the period lengths of annual and semi-annual cycle of each site in the north, east and the vertical directions of each year extend or contract to a certain extent, as well as different sites in different regions show certain differences in the variation of cycle intensity over time. During the study period, the crust of Chinese mainland generally presents a trend of southeast migration, and the trend of east migration is slightly stronger than that of the south migration. What's more, the speed of migration and the direction of each region and each station are similar. In the vertical direction, the movement trend of different sites in different regions is more complicated.

**Key words:** crustal movement; time-frequency analysis; GNSS coordinate time series; fast Fourier transform; wavelet transform

中国位于欧亚板块东南部,处于印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块的夹持之中,是一个晚第四纪和现代构造活动强烈的地区<sup>[1]</sup>。复杂的地质构造情况使中国大陆成为全球大地震频发的地区之一。全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)是大地测量的重要手段,为地面沉降、地壳运动、地震形变等现象的监测工作提供了有力的帮助<sup>[2]</sup>。由于GNSS坐标时间序列中包含有测站在同一区域构造应力场控制下表现出的长期线性变化趋势和地球物理效应等因素引起的测站位置的周期性振荡等多种信息<sup>[3]</sup>,对GNSS坐标时间序列进行分析成为了地壳运动研究的有效方法之一。

目前已经有很多国内外学者对GNSS坐标时序开展了研究:蔡晓军等<sup>[4-6]</sup>选取了欧洲地区的IGS站点和我国部分地区的CMONOC站点的坐标时间序列,对比了SSA、MSSA等方法对坐标时间序列的处理效果,论证了MSSA在提取时变季节信号时所具有的优势。明锋等<sup>[7-8]</sup>采用具有非参数特性的STL滤波,提取了中国区域10个IGS站点的高程时间序列中含有的季节性周期信号,并提出了结合GSA算法和Kalman滤波的NETKF分解算法,将坐标时间序列分解为多层独立结构分量,对趋势项进行了建模。Janusz Bogusz<sup>[9]</sup>采用最小二乘法对全球IGS站点的钱德勒周期信号进行了建模。Kong等<sup>[10]</sup>选取了欧亚大陆上的12个DORIS站点,采用SSA和FFT方法对坐标时间序列进行处理,将数据中的趋势项和周期信息进行分离,进而构建了欧亚板块的速度场。王龙超等<sup>[11-15]</sup>采用最小二乘线性拟合法,分别对我国西部和南极洲的观测站坐标时间序列的趋势项进行了提取研究。

GNSS连续观测是获得地壳运动信息的重要来源,从GNSS坐标时序提取趋势项和周期信息可为区域地壳运动研究提供基础。利用快速傅里叶变换方法处理GNSS坐标时序可获得准确的周期信息,小波变换可进行不同周期时序和趋势项信息提取。本文综合

利用快速傅里叶变换与小波变换方法开展中国大陆地区GNSS坐标时序时空演化特征分析。

## 1 研究方法

### 1.1 快速傅里叶变换

傅里叶变换是一种用于在频域中对信号进行分析的研究方法,通常用于信号在时间域与频率域之间的相互转化,且在这一转化过程可逆且能量保持不变<sup>[16]</sup>。傅里叶变换的实质是将数据分解为不同周期的正、余弦信号之和,再将这一分解结果表现为到频率域上。通过对转换到频率域上坐标时间数据进行分析,易于提取数据中包含的不同周期信号,且便于对不同周期信号表现出的总体强度进行比较。对于函数 $f(t)$ ,其连续傅里叶变换及逆变换分别如式(1)和(2)所示:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iwt} f(t) dt \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iwt} F(w) dw \quad (2)$$

在实际的研究过程中,一般对有限长度的数据进行研究。离散傅里叶变换(discrete fourier transformation, DFT)可以对有限长度的序列进行有限点离散采样。设 $x(n)$ 为一组包含 $N$ 个离散点的数据,则其离散傅里叶变换表示为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$W_N = e^{-\frac{2\pi i}{N}} \quad (4)$$

1965年,美国工程师Cooley和Tukey对DFT进行改进,提出了快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT),这种方法很大程度上减少了DFT的计算量,进而提升了计算效率。本文采用快速傅里叶变换方法对坐标时间序列的周期信号进行提取分析。

### 1.2 小波变换

小波分析利用对窗口函数的变化来调整时频分

分辨率,通过伸缩、平移运算逐步对目标函数进行多尺度细化,使得在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率<sup>[17]</sup>. Mallat 小波多分辨率分析方法可以将信号在时间域上分解为多层高、低频信号,不同层级的高、低频信号可以将不同时间尺度的信号特征信息清晰地表现出来.

## 2 数据来源及预处理

### 2.1 数据来源

本文选取 CMONOC 中位于中国大陆的 GNSS 观测站的坐标时间序列数据进行研究,各站点坐标时间序列数据均由 N、E、U 3 个方向的坐标分量及残差构成.由于各站点建立时间具有差异,坐标时间序列的时间跨度不同.为了对中国大陆的地壳整体运动情况进行研究,需要对研究时段进行选择,并统一提取不同 GNSS 站点在同一时间段内的坐标时间序列.本文选取各站点在 2012 年 4 月到 2022 年 11 月内数据缺失率低于 20% 的 GNSS 坐标时间序列进行研究,筛选得到 220 组符合该标准的站点数据,数据长度在 3 854 d 左右.

### 2.2 GNSS 坐标时间序列分组

GNSS 坐标时间序列反映的是观测站自身位置的偏移情况在连续时间下的排列,单一坐标时间序列只能对空间内一点的位置变化进行描述.若利用 GNSS 坐标时间序列对整个区域在某段时间内的整体位置偏移进行描述,则需要对若干个该区域内 GNSS 观测站在该时段内的坐标时间序列整体分析.

我国地域辽阔,遍布着不同的地形地貌,环境分布多样,且我国大陆在不同板块的挤压下,分布着许多具有不同特性的活动断裂,地质情况较为复杂,难以对中国大陆整体进行直接的地壳运动分析.因此需要对中国大陆进行区域划分,通过对各个区域的地壳运动情况进行分析,进而对中国大陆的整体地壳运动情况进行说明.

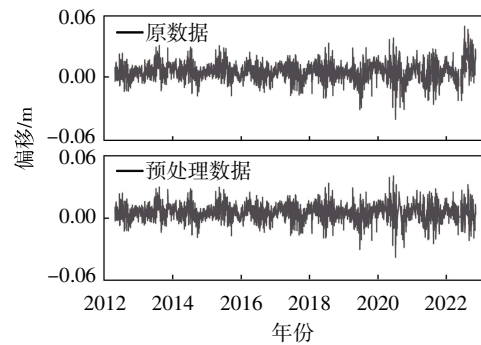
中国大陆的地质构造较为复杂,对中国大陆进行区域划分的方式也多种多样<sup>[18]</sup>.本文采用陈醒在参考国家基础研究项目(973)子项目——“大陆的强震机理与预测”后对中国大陆进行的 I 级块体划分方法<sup>[19-20]</sup>,将中国大陆划分为东北、华北、华南、西北 1、西北 2、青藏、川滇 7 个区域.这种区域划分方式不考虑活动块体的边界带,有利于对各块体的地壳运动情况进行提取分析.通过分析各个区域中 GNSS 坐标时间序列

的周期和趋势信息,进而对中国大陆的地壳运动进行说明.

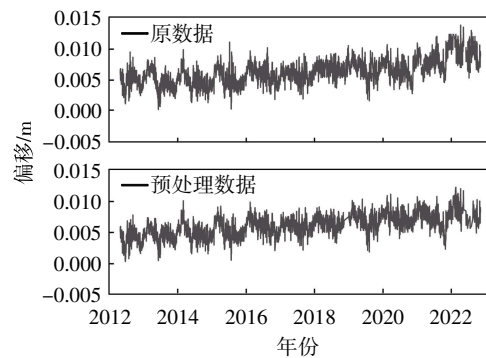
### 2.3 数据预处理

由于多种因素影响,GNSS 坐标时间序列中不可避免地包含着粗差项、阶跃项及缺失项,使坐标时间序列表现出的站点位置偏移与实际情况之间存在差异,对分析造成不利影响.因此需要对数据进行预处理,削弱上述因素影响<sup>[21]</sup>.

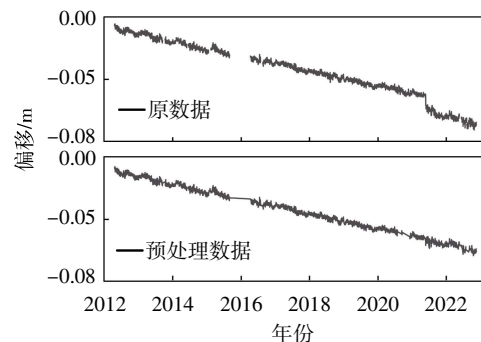
本文分别选取四分位距(interquartile range, IQR)方法、基于最小二乘法的启发式分割法和线性插值法对 GNSS 坐标时序中的粗差项、阶跃项和缺失项进行处理.图 1 为 AHAQ 站 U 方向、GSDH 站 N 方向及 QHBM 站 N 方向的坐标时间序列在预处理前后的对比.



(a)AHAQ 站 U 方向分量



(b)GSDH 站 N 方向分量



(c)QHBM 站 N 方向分量

图 1 坐标时间序列预处理前后对比

从图1中可以看出,在预处理过程中,较好地去除了坐标时间序列的粗差及阶跃项,且数据逐日连续,更好地反映出了站点在长期观测工作中记录的位置变化情况。

### 3 中国大陆 GNSS 坐标时间序列频率域研究

#### 3.1 数据降噪

噪声信号可能会在时频转化过程中造成干扰,使FFT处理结果产生混频,导致在提取周期信号时出现误差,因此需要对数据进行降噪处理。本文采用小波变换降噪的方法对坐标时间序列进行处理<sup>[2]</sup>。图2以AHAQ

站U方向、GSDH站N方向及QHBM站N方向为例展示了小波降噪前后的坐标时间序列对比。

通过图2可以看出,经过小波降噪处理后,GNSS坐标时间序列中的高频波动有了明显减弱,保留了数据的整体变化趋势,降噪效果显著。

#### 3.2 GNSS 坐标时间序列频率域分析

采用FFT方法对各地区GNSS站点的坐标时序数据进行处理,从频率域上对坐标时序的周期性进行分析。时序经过FFT处理后得到的结果如图3所示。

由图3可以看出,所有站点在N、E、U 3个方向上均表现出明显的1年和半年周期性。除东北区域在N方向上的周期性以半年周期为主以外,东北区域E、U方向及其他区域3个方向上的周期均以1年周期为主,且各站点的1年周期及半年周期对应的周期长度比较集中。

对单一区域而言,各区域在上N、E水平方向上表现出的周期性相似,尤其是1年和半年周期强度相近,且在水平方向表现出的周期强度明显弱于U垂直方向上的周期强度。东北、华北、华南区域在垂直方向上的1年和半年周期强度在整体上约为水平方向上的对应周期性强度的4倍;西北区域(对西北1、西北2同时讨论时称西北区域)在垂直方向上的1年周期强度接近水平方向对应周期强度的3倍,垂直方向半年周期强度约为水平方向上的4倍;川滇区域在垂直方向上的1年和半年周期强度远大于水平方向对应周期强度的4倍。青藏区域的站点可以粗略地分为两个部分:以DHLA、GSDX等站点的为主的部分在垂直方向上的1年、半年周期强度接近水平方向上对应周期强度的4倍,以LHAZ、XZRK为主的站点在垂直方向上的1年周期和半年周期强度远强于前述站点。

在N方向上,东北和西北2两个区域的1年周期强度相近且较弱于其他区域,其余区域的1年周期强度相近;西北地区的半年周期性较弱,其余区域半年周期强度相近。在E方向上,西北地区的1年周期强度弱于其他区域,其余区域的1年周期强度相近;西北2区域的半年周期强度最弱,东北、华北、西北1 3个区域的半年周期强度相近,青藏、川滇两个区域的半年周期强度相近且强于其他区域。在U方向上,西北2区域的1年周期强度最弱,东北、西北1区域次之,其余区域的1年周期强度相近且强于前述区域;东北、西北地区的半年周期强度相近且弱于其他区域,华北区域的半年周期强度略弱于华南,华南、青藏、川滇的半年周期强度相近。

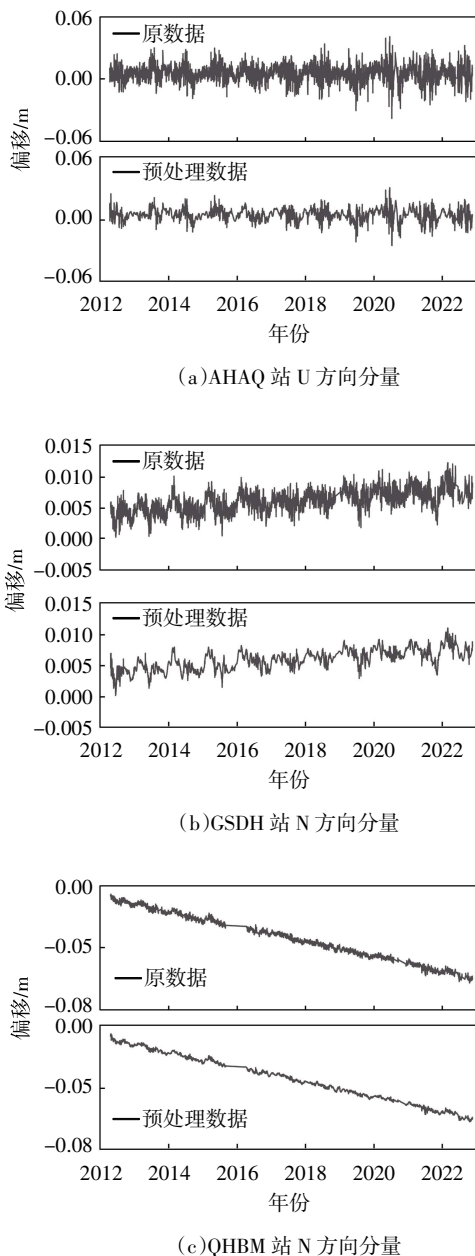


图2 坐标时间序列降噪前后对比

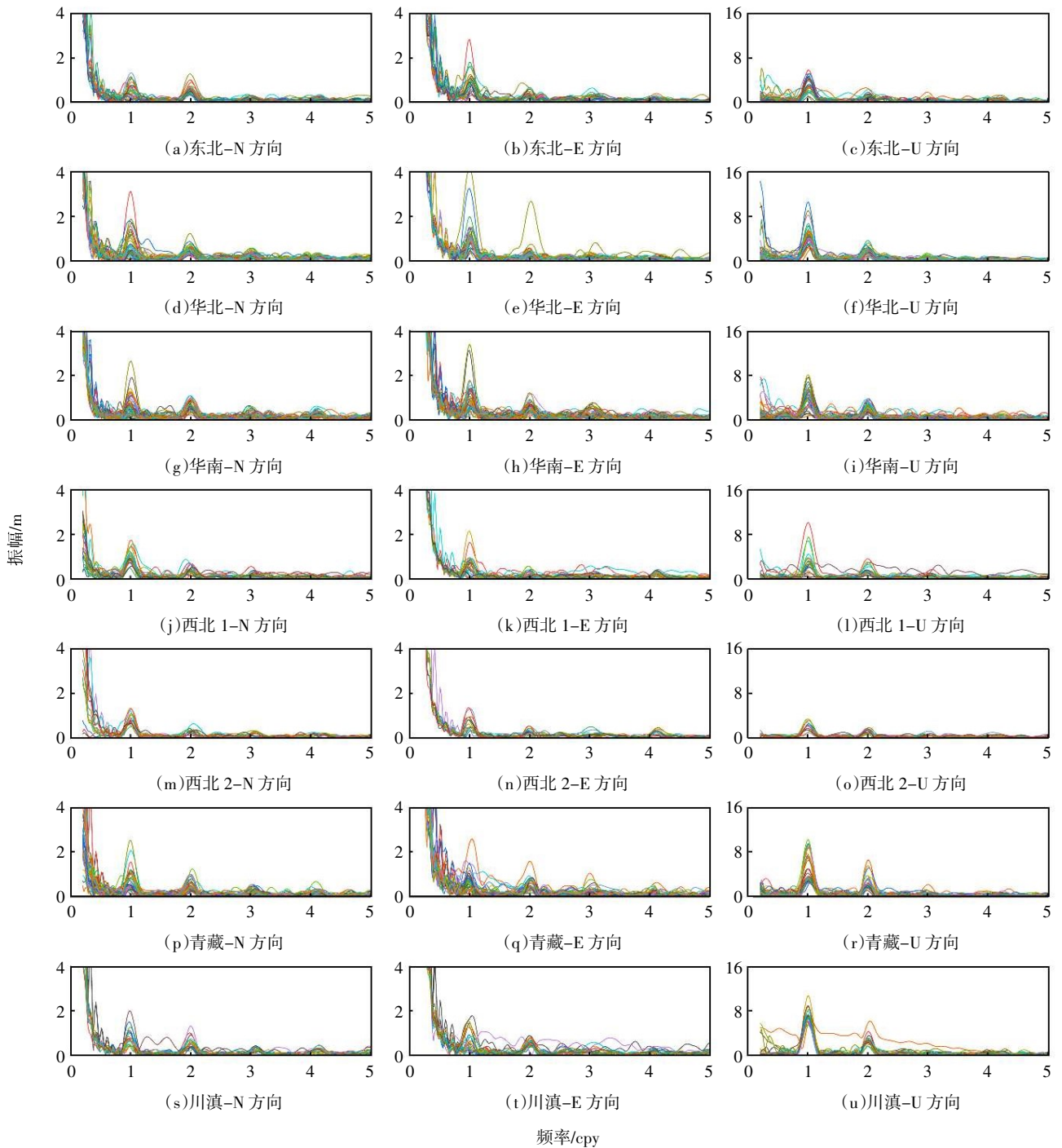


图 3 不同地区在频率域上的站点位移周期对比

### 4 中国大陆 GNSS 坐标时间序列时间域研究

#### 4.1 GNSS 坐标时间序列 1 年周期分析

对各地区的 GNSS 站点的坐标时序进行 WT 处理,提取 d8 层小波分解数据,在时间域上对 1 年周期进行对比分析,如图 4 所示。

对单个区域 3 个方向上的 1 年周期进行分析可

知,西北 1 区域在 N 方向上的 1 年周期强度略强于 E 方向,其余地区 N、E 方向上的 1 年周期强度相近;东北、华北、华南地区在垂直方向上的 1 年周期强度约为 N、E 水平方向的 4 倍,西北地区垂直方向上的 1 年周期强度约为水平方向的 3 倍;青藏、川滇地区垂直方向上的 1 年周期强度远强于水平方向上 1 年周期强度的 4 倍。

通过对比不同区域在 3 个方向上的 1 年周期可

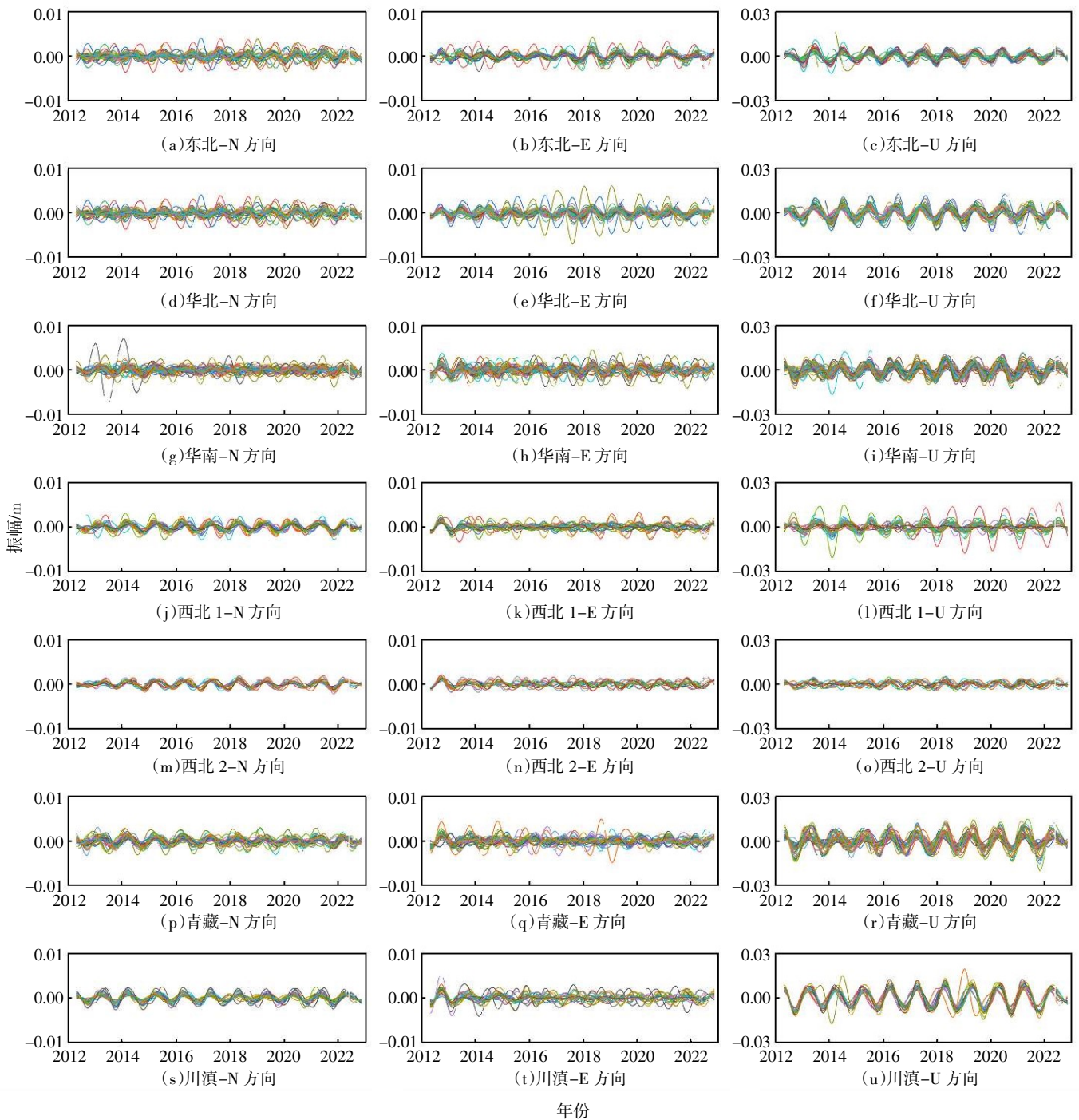


图4 不同地区站点位移的1年周期对比

知,在N方向上,东北、西北2的1年周期强度相近,其余区域N方向的1年周期强度相近且强于东北、西北2两区域,且各区域在2012—2014年间的1年周期较弱,之后时间段内1年周期在略微增强后基本保持不变。在E方向上,西北区域的1年周期强度弱于其他区域,其余区域的1年周期强度相近;在东北、华北、华南地区,2017—2019年间的1年周期呈现出了先增强后减弱的趋势;在华南、西北、青藏、川滇区域,2012—2014年内的1年周期呈现出逐渐减弱的趋

势,其余时间段上的1年周期变化较小。在U方向上,西北2、西北1、东北区域的1年周期强度较弱,其余区域1年周期强度接近,且略强于前述3个区域;华南、青藏、川滇区域的1年周期强度在2016—2021年间有略微增强的趋势,之后趋于减弱,其余时间段内所有区域的1年周期强度变化较小。

#### 4.2 GNSS坐标时间序列半年周期分析

提取d7层小波分解数据,在时间域上对各地区GNSS坐标时序的半年周期进行对比分析,如图5所示。

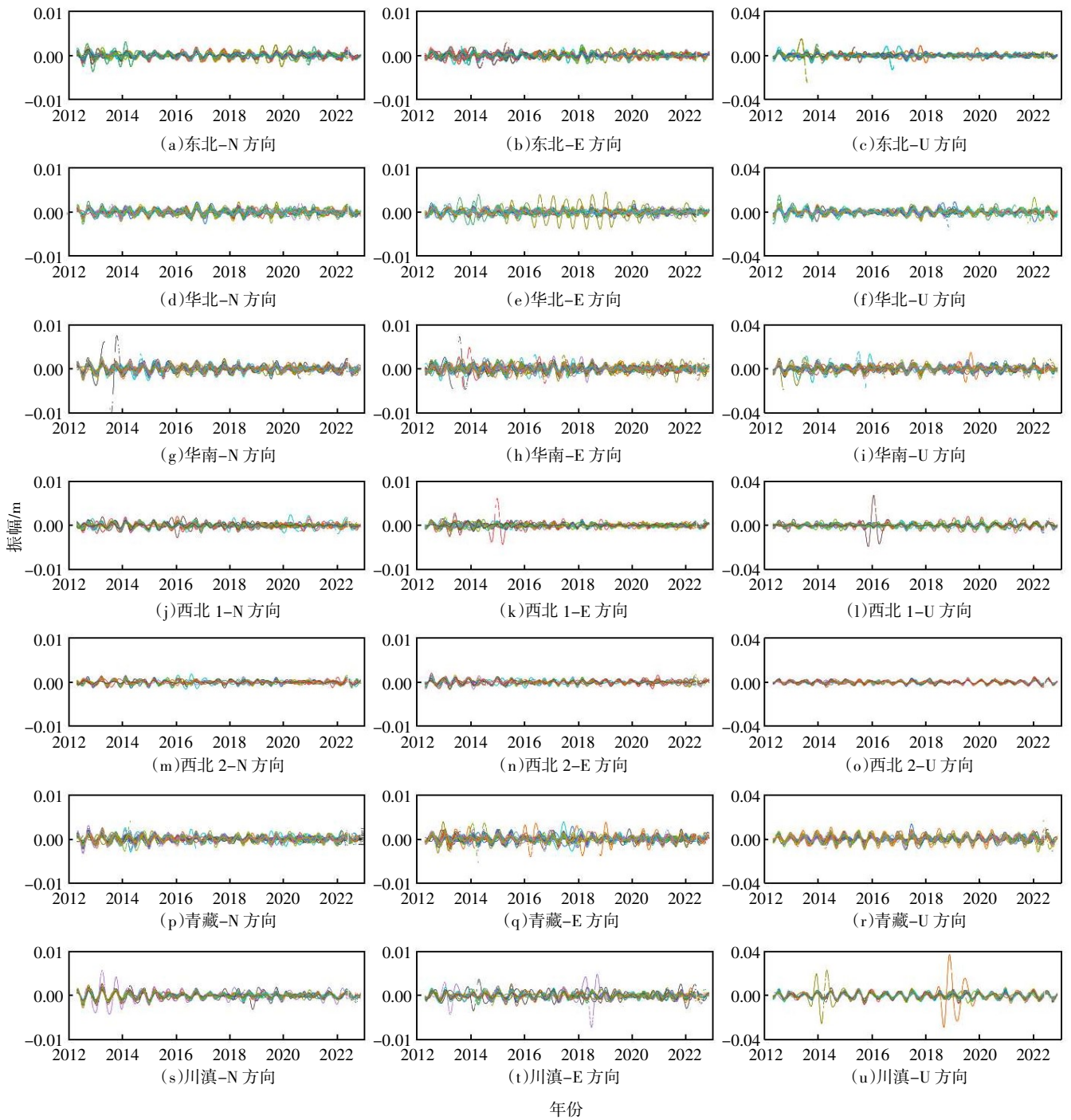


图5 不同地区站点位移的半年周期对比

对单个区域3个方向上的半年周期进行分析可知,各区域N、E 2个方向上表现出的半年周期强度相近,且U方向上的半年周期强度为N、E水平方向半年周期强度的4倍左右。

对比不同区域3个方向上的半年周期可知,东北、西北区域在3个方向上的半年周期强度相近,华北、华南、青藏、川滇区域在3个方向上的半年周期强度相近,且东北、西北区域3个方向上表现出的半年周期强度弱于其余区域的半年周期强度.N方向上,东

北、华北地区2012—2015年、2017—2020年内半年周期较强,西北、青藏、川滇地区2012—2015年间半年周期较强,随后周期性减弱,华南地区在研究时段中的半年周期强度产生的变化较小;E方向上,各区域2012—2016年间的半年周期较强,除华南地区在该时间段内的半年周期强度略微减弱后,又在2016—2018年间恢复了之前的周期强度外,其余地区的半年周期在2016—2022年间均保持强度低于之前时间段的稳定状态,而华南地区的半年周期也在2018年之后经

过一次减弱维持在稳定状态.在 U 方向上,东北、华北、华南地区的半年周期均在 2015 年经过一次减弱后,在 2017—2018 年间先增强后减弱,之后维持稳定状态;其余地区的半年周期强度变化不明显,基本保持稳定状态.

### 4.3 GNSS 坐标时间序列长期趋势分析

a13 层小波分解数据中包含着 GNSS 坐标时序的长期趋势信息,选取 a13 层小波分解数据对各站点位移的长期趋势对比分析,如图 6 所示.

各区域在 E 方向上的运动趋势最强,N 方向上的运动趋势次之,U 方向上的运动趋势较为平缓. 青藏、西北区域等中国西部地区大部分站点在水平方向上向东北偏移,其余区域向东南偏移,且向东偏移的趋势略强于向南北偏移的趋势;在垂直方向上,不同区域不同站点的运动趋势较为复杂:在不同区域均有抬升和沉降的站点存在,东北、华北、华南、西北 2、青藏区域以抬升为主,川渝和西北 1 区域以沉降为主.

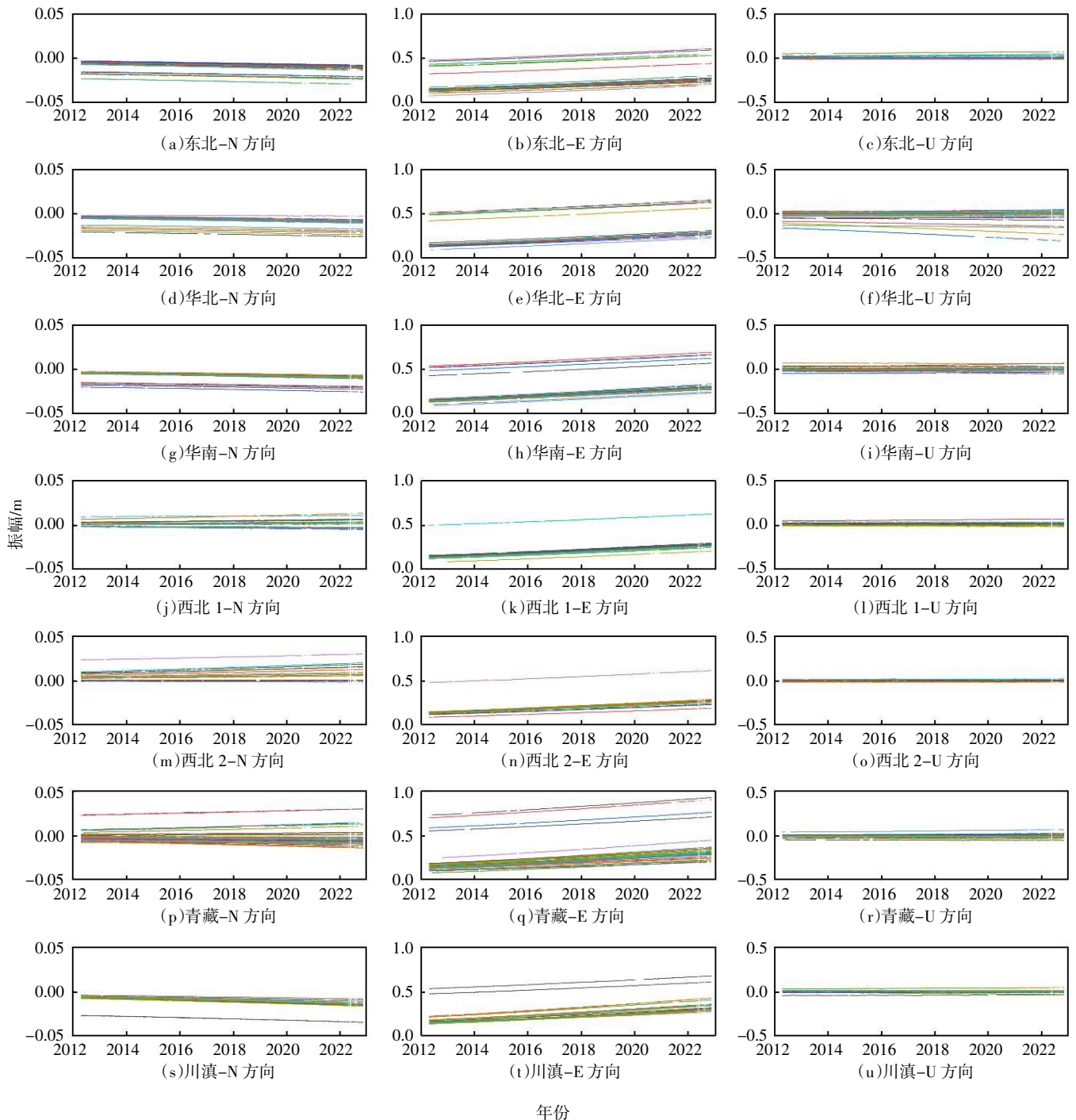


图 6 不同地区站点位移长期趋势对比

## 5 结 论

本文选取 220 个中国大陆 CMONOC 基准站自 2012 年 4 月至 2022 年 11 月的 GNSS 坐标时间序列,采用快速傅里叶变换和小波变换方法对各站点的时序数据进行时频分析,通过对中国大陆各区域内站点的周期及趋势信息进行分析,得出中国大陆在研究时段内的地壳运动情况.本文得到的主要结论如下:

(1)在整体上,中国大陆在垂直方向(U)上的周期性强于 N、E 水平方向,N、E 方向上的周期性强度相近.且在 1 年及以内的时间尺度上,除东北区域在 N 方向上以半年周期为主外,各个区域在 N、E、U 3 个方向上的周期均以 1 年周期为主,半年周期次之,季节周期较弱.

(2)通过小波分解对各站点 1 年及半年周期进行提取,可以发现各站点在 N、E、U 3 个方向上逐年的周期长度有一定的增长或收缩,不同区域的不同站点呈现出的周期强度变化存在一定区别.

(3)在研究时段内,中国大陆地壳总体呈现向东南方向偏移的趋势,且向东偏移的趋势略高于向南偏移的趋势,各区域各站点表现出的偏移速度和方向相近.在垂直方向上,不同区域不同站点的运动趋势较为复杂,在不同区域均有抬升和沉降的站点存在,川渝和西北 1 区域以沉降趋势为主,东北、华北、华南、西北 2、青藏区域以抬升趋势为主,其中华北个别站点表现出较强的沉降趋势.

### 参考文献:

- [1] 张培震. 中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害 [J]. 第四纪研究, 1999, 19(5): 404-413.
- [2] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
- [3] 姜卫平, 王锴华, 李 昭, 等. GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.
- [4] 蔡晓军. 区域 GPS 坐标时间序列特性分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [5] 李勇熹. GNSS 基准站坐标时间序列非线性特征分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [6] 钱 炜, 岳建平. MSSA 在 GPS 坐标序列分析中的应用[J]. 测绘通报, 2021(9): 49-52.
- [7] 明 锋, 杨元喜, 曾安敏, 等. 中国区域 IGS 站高程时间序列季节性信号及长期趋势分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(6): 834-844.
- [8] 明 锋. GPS 坐标时间序列分析研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- [9] BOGUSZ J, KLOS A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series [J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 655-664.
- [10] KONG Q L, ZHANG L G, HAN J W, et al. Analysis of coordinate time series of DORIS stations on Eurasian plate and the plate motion based on SSA and FFT [J]. Geodesy and Geodynamics, 2023, 14(1): 90-97.
- [11] 王龙超. GNSS 坐标时间序列在地表形变监测中的应用[J]. 铁道勘察, 2020, 46(6): 116-122.
- [12] 王默然. 南极 GPS 坐标时间序列时频分析研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- [13] 张洪文, 宋传峰, 赵忠海. GPS 站坐标时间序列的南极地壳运动监测[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 25-28.
- [14] 马下平, 赵立都. 陆态网络 GNSS 基准站地壳运动速度场分析[J]. 测绘科学, 2018, 43(8): 1-6.
- [15] 于 亮, 朱 璇, 陈永祥, 等. 基于 CMONOC 建立和评估中国大陆地壳运动速度场模型 [J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(7): 704-708.
- [16] 田 亮. GPS 测站坐标非线性变化规律分析与机制研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011.
- [17] 陶 蕊. 基于经验小波分析的 GNSS 坐标时间序列建模与降噪方法研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
- [18] 马杏垣. 中国岩石圈动力学概要 [J]. 地质学报, 1987, 61(2): 113-125.
- [19] 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.
- [20] 符 养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析 [D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海天文台), 2002.
- [21] 刘丹丹. 基于 EMD 的 GNSS 时间序列异常值探测算法[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 1865-1873.
- [22] 董海政, 范玉磊, 张军臣, 等. GNSS 坐标时间序列的小波去噪[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(4): 164-167.