引文格式:胡顺强,陈克杰,贺小星,等.顾及环境负载的青藏高原东南缘GNSS垂向坐标时序噪声模型研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):604-617.DOI:10.13203/j.whugis20240098

Citation:HU Shunqiang,CHEN Kejie,HE Xiaoxing,et al.Noise Model of GNSS Vertical Coordinate Time Series in Southeastern Tibet Plateau Based on Environmental Loading[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):604-617.DOI:10.13203/j.whugis20240098

顾及环境负载的青藏高原东南缘GNSS垂向坐标时序噪声模型研究

胡顺强[1,2] 陈克杰[3] 贺小星[4] 朱 海[3]

1 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,江西 南昌,330022

2 江西省自然灾害监测预警与评估重点实验室,江西 南昌,330022

3 南方科技大学地球与空间科学系,广东 深圳,518055

4 江西理工大学土木与测绘工程学院,江西 赣州,341000

摘 要:准确辨识出全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)垂向坐标时间序列的最优噪声模型,对于获取可靠的抬升或沉降变形速度场并评估速度不确定度至关重要。利用青藏高原东南缘在2011-01-01—2022-12-30间94个GNSS连续站观测数据和环境负载模型数据,选用9种噪声模型对环境负载改正前后的GNSS垂向坐标时间序列进行噪声特性分析,并定量评价了环境负载效应的影响。研究结果表明,水文、大气、非潮汐海洋负载均对GNSS垂向坐标时间序列存在影响。环境负载改正后,三者的均方根分别减少-1.3%~22%、-1.4%~17.4%和-0.1%~1.3%,其平均值分别为8.7%、6.7%和0.6%。在空间分布上,位于鲜水河-安宁河-则木河断裂带西侧的测站受水文负载影响更大,而东侧的测站受大气负载影响更大。经过环境负载改正后,94个GNSS连续站最优噪声模型主要表现为幂律噪声(power-law noise,PL),其次是白噪声分别与闪烁噪声、PL的组合。环境负载改正前后,基于最优噪声模型估计的速度差值范围为-0.11~0.26 mm/a,速度不确定度差值范围为-0.33~0.16 mm/a。进一步通过分析测站速度不确定度与高程、年均降雨量、经度、纬度之间的线性关系,发现青藏高原东南缘的年均降雨量、高程、经度、纬度对GNSS测站的稳定性影响较小。

关键词:GNSS;速度不确定度;最优噪声模型;环境负载

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-10

DOI:10.13203/j.whugis20240098 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0604-14

Noise Model of GNSS Vertical Coordinate Time Series in Southeastern Tibet Plateau Based on Environmental Loading

HU Shunqiang[1,2] *CHEN Kejie*[3] *HE Xiaoxing*[4] *ZHU Hai*[3]

1 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Key Laboratory of Natural Disaster Monitoring, Early Warning and Assessment of Jiangxi Province, Nanchang 330022, China

3 Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

4 School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Abstract: **Objectives**: Accurately identifying the optimal noise model of global navigation satellite system (GNSS) vertical coordinate time series is vital to obtain reliable uplift or subsidence deformation velocity fields and assess the associated uncertainties. **Methods**: In this paper, we collect data from 9 noise models including white noise (WN), flicker noise (FN), power-law noise (PL), random walk noise(RW), WN+FN, WN+PL, WN+generalized Gauss-Markov noise, WN+RW, WN+RW+FN. These data and noise models are used to analyze the noise characteristics of GNSS vertical coordinate time series before

基金项目:国家自然科学基金(42364002);地震数值预测联合实验室开放基金课题(2021LNEF01)。

第一作者:胡顺强,博士,助理研究员,现从事GNSS坐标时间序列分析研究。husq@jxnu.edu.cn

通信作者:陈克杰,博士,研究员。chenkj@sustech.edu.cn

and after environmental loading correction at 94 stations spanning from January 2011 to December 2022 in the southeastern Tibet Plateau. **Results**: The results show the root mean squares reduction is －1.3%-22%, －1.4%-17.4%, and －0.1%-1.3%, with a mean value of 8.7%, 6.7% and 0.6% for all stations after removing the hydrological, atmospheric, and nontidal ocean loading deformation from the GNSS vertical coordinate time series, respectively. The hydrological loading has a greater impact in the west side of Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, and the atmospheric load has a greater impact in east side of this fault zone. The optimal noise model at all stations was mainly represented by PL, a combination of WN, PL, and FN before and after environmental loading correction. The value of velocity and its uncertainty before and after environmental loading correction based on optimal noise model vary from －0.11-0.26 mm/a and from －0.33-0.16 mm/a. We analyze the stability of GNSS stations through the linear relationship between GNSS vertical velocity uncertainty and elevation, average annual rainfall, longitude, latitude. The results of correlations coefficient are 0.08, 0.07, 0.11, and 0.25, respectively, implying the average annual rainfall, elevation, longitude, and latitude have little impact on station stability in the southeastern Tibet Plateau. **Conclusions**: This research suggest that the optimal noise model at most stations in the southeastern Tibet Plateau is PL. The results provide a reference for subsequent reasonable acquisition of GNSS velocity and its uncertainy in the southeastern Tibet Plateau.

Key words: GNSS; velocity uncertainty; optimal noise model; environmental loading

随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)连续站观测数据的大量积累,获得的GNSS坐标时间序列不仅可以应用于三维地壳运动研究[1-2],而且还能应用于地球参考框架建立、强震破裂过程模拟、区域负荷质量变化监测等领域[3-5]。GNSS垂向坐标时间序列中不仅包含受同一区域构造应力场控制下的继承性构造运动,主要表现为地表抬升或者下降的线性运动,还存在由水文负载等地球物理效应引起的季节性信号及各类有色噪声[6]。因此,研究顾及环境负载影响的GNSS连续站最优噪声模型对获取高精度GNSS速度场及不确定度具有重要意义。

起初,研究学者认为GNSS连续站的噪声特性只有白噪声,随着GNSS坐标时间序列跨度变长和噪声模型种类变多,GNSS连续站的噪声特性还包含其他有色噪声[7-8]。文献[9]通过功率谱分析法对GNSS连续站坐标时间序列进行噪声特性分析,结果表明大部分GNSS连续站的坐标时间序列中除了白噪声(white noise, WN)之外,还包含随机漫步噪声(random walk noise, RW)。若忽略后者,则会造成GNSS连续站的运动速度估计出现偏差,且会低估速度不确定度。随后,多位学者对GNSS连续站的噪声特性进行研究,结果认为WN和闪烁噪声(flicker noise,FN)组合能代表大部分GNSS连续站的最优噪声模型[10-12]。文献[13]分析了加州和内华达州南部地区236个GNSS连续站的噪声特性,结果表明最优噪声模型主要以FN、RW或者幂律噪声(power-law noise, PL)为主。文献[14]使用PL、FN、WN+FN、WN+FN+RW、WN+PL、广义高斯-马尔可夫噪声(generalized Gauss-Markov noise, GGM)6种噪声模型分析日本区域内时间跨度在2010-01—2018-12的20个GNSS连续站噪声特性,在垂向U方向上的最优噪声模型为FN+WN和PL,两者GNSS测站占比均为50%。文献[15]使用多种组合噪声模型对全球671个国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)连续站近21年长时间跨度的坐标时间序列进行噪声特性分析,结果表明不同GNSS连续站在东(east,E)、北(north,N)、天(up,U)3个方向的最优噪声模型存在差异性,主要表现为WN与FN、PL、GGM的组合。在青藏高原东南缘的GNSS连续站噪声特性研究中,部分研究结果认为,该地区GNSS连续站的主要最优噪声模型表现为WN与FN、PL的组合[16-17]。通过上述结果可知,GNSS坐标时间序列的噪声特性十分复杂,不同研究的结果存在着一定的共性和差异性,主要原因可能是:(1)GNSS坐标时间序列噪声特性所选的模型种类不够全面;(2)GNSS坐标时间序列跨度不同;(3)最优噪声模型的判定准则;(4)选择的研究区。因此,针对不同的研究区,对GNSS连续站的噪声特性仍需要更深入的研究。

青藏高原东南缘位于全球活动性最强的印度板块与欧亚板块碰撞带边缘的东南侧,内部具有鲜水河-安宁河-则木河、小江、红河等多条大型

且复杂的断裂带,是吸收和调节印度板块与欧亚板块相互作用的重要地区之一,也是构造变形活动强烈、地震发生最为严重地区之一[18]。此外,该地区降水丰富,季节性陆地水文负载变化显著。因此,研究该地区环境负载对GNSS坐标时间序列的影响及噪声特性对获取精确的速度场及不确定度至关重要,进一步为研究青藏高原的岩石圈板块变形和动力学演化模式提供可靠的数据支撑。为此,本文搜集青藏高原东南缘更加密集的GNSS观测数据且时间跨度更长,并使用更多的噪声模型对环境负载改正前后的GNSS垂向坐标时间序列进行噪声特性分析,最后分析讨论GNSS连续站的稳定性。

1 数据与方法

1.1 GNSS数据

本文所使用的94个GNSS连续站观测数据由中国地震台网中心与云南省地震局共享,其空间分布如图1所示。其中,红色圆点为中国地震台网中心提供的GNSS连续站数据,时间跨度为2011-01-01—2022-12-30;蓝色圆点为云南省地震局提供的GNSS连续站数据,时间跨度为2016-05-05—2022-12-30;黑色线为断裂带。

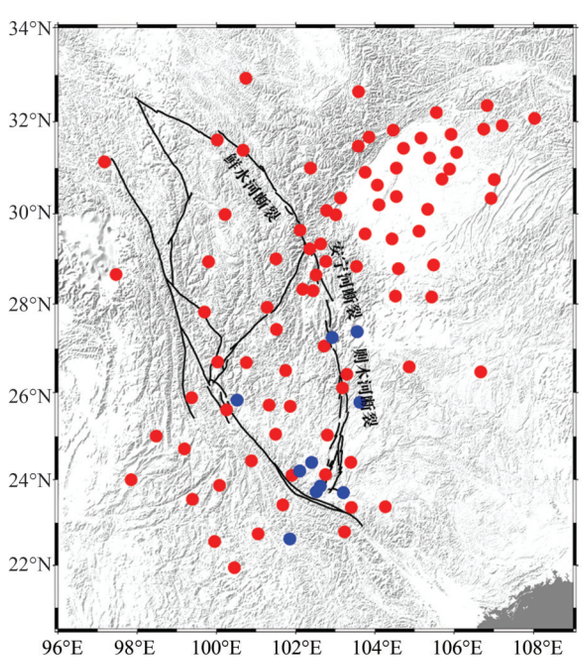


图1 青藏高原东南缘GNSS连续站空间分布图

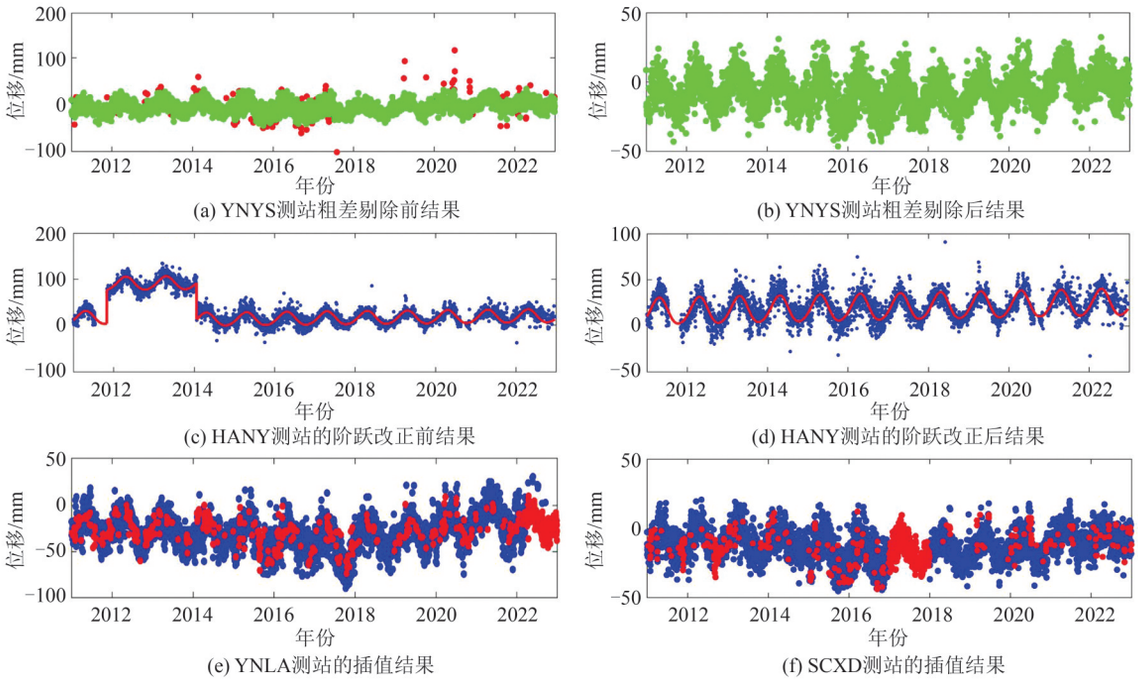
Fig. 1 Spatial Distribution of GNSS Stations in the Southeastern Tibet Plateau

本文使用PANDA(position and navigation data analyst)软件精密单点定位对青藏高原东南缘所有的GNSS数据进行解算[19]。PANDA软件解算的主要策略为:(1)使用欧洲定轨中心提供的精密轨道、钟差和差分码偏差产品用于GNSS数据处理;(2)使用全球映射函数和全球压力温度模型用来估计对流层延迟的先验值;(3)使用无电离层组合模型校正一阶电离层效应;(4)使用FES2004海潮模型用于校正海潮效应,IERS2010模型改正固体潮;(5)使用IGS天线相位校准模型校正天线的相位中心。通过PANDA解算得到单日解直角坐标之后,将其转化为站心坐标系。所有GNSS测站在垂向单日解的中误差大部分在0~2 mm,解算精度较高,可以应用于后续GNSS坐标垂向时序的噪声模型分析。

要获得精度更高的GNSS垂向坐标时间序列,还需要对初始的垂向坐标时间序列进行粗差剔除、阶跃改正、缺失数据插值等预处理[2],预处理结果如图2所示。由图2(a)和2(b)可以看出,GNSS垂向坐标时间序列粗差被有效剔除,剔除粗差后的GNSS垂向坐标时间序列表现出明显的季节性运动趋势。由图2(c)和2(d)可以看出,HANY测站在2012—2014年间的阶跃经过改正后,拟合后的GNSS垂向坐标时间序列整体运动趋势一致。由图2(e)和图2(f)可以看出,YNLA和SCXD测站插值后的结果与整体运动趋势一致,且插值结果的运动趋势也表现出季节性变化。

1.2 环境负载模型数据

本文所使用的环境负载模型数据由国际质量负荷服务(international mass loading service,IMLS)机构提供,IMLS提供由大气负载、水文负载和非潮汐海洋负载引起的规则全球格网数据,空间分辨率为2′×2′,它们都是基于球谐函数法计算得到。其中,水文负载使用的是时间分辨率为3 h的现代再分析资料第2版(modern-era retrospective analysis for research and applications version 2,MERRA2)模型数据计算得到[20],该水文模型主要包括土壤湿度、冠层含水量和积雪水含量等;大气负载形变通过时间分辨率为6 h的MERRA2模型数据计算得到[21];非潮汐海洋负载使用的是时间分辨率为3 h的MPIOM06(max planck institute ocean model 06)模型数据[22]计算得到。图3为ANYU连续站的水文负载形变、大气负载形变、非潮汐海洋负载形变以及组合环境负载形变。由图3可以看出,所有的负载形变均存在着明显的季节性变化,其中,水



(a) YNYS测站粗差剔除前结果　(b) YNYS测站粗差剔除后结果
(c) HANY测站的阶跃改正前结果　(d) HANY测站的阶跃改正后结果
(e) YNLA测站的插值结果　(f) SCXD测站的插值结果

图 2　GNSS 垂向时间序列预处理

Fig. 2　Preprocessing Results of GNSS Vertical Time Series

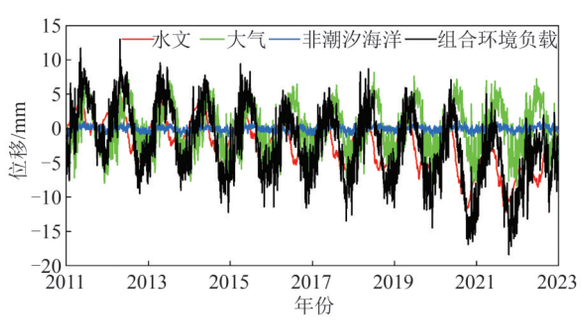


图 3　ANYU 连续站相对应的环境负载形变

Fig. 3　Environmental Loading Deformation at ANYU Station

文、大气、非潮汐海洋负载形变的主要波动范围分别在 −10～10 mm、−5～5 mm、−1～1 mm。

1.3　噪声模型理论

GNSS 坐标时间序列噪声分析可以使用频谱分析法和极大似然估计法(maximum likelyhood estimation, MLE)。相比于频谱分析法,MLE 法更加稳健可靠,它可以同时估计噪声类型、周年与半周年的振幅和相位、测站速度及其不确定度,是目前使用最广泛的噪声分析方法[23-24]。

GNSS 坐标时间序列模型的计算式为:

$$y(t_i)=a+bt_i+c\sin(2\pi t_i)+d\cos(2\pi t_i)+e\sin(4\pi t_i)+f\cos(4\pi t_i)+\sum_{j=1}^{n_g}g_jH(t_i-T_{gj})+v_i \tag{1}$$

式中,t_i 为以日为单位的历元;$y(t_i)$ 为 t_i 历元下的形变位移;a、b 分别为 GNSS 测站初始位置、速度;c、d 分别为周年正弦、余弦的振幅系数;e、f 分别为半周年正弦、余弦的振幅系数,此部分主要由水文、大气、非潮汐海洋负载等引起;g_j 为更换仪器或者地震等因素造成的阶跃位移;n_g 为阶跃总数;$H(t_i-T_{gj})$ 为阶跃函数;v_i 表示观测噪声。

式(1)中的多项参数是通过 MLE 方法估计得到。在求解最准确的参数时,不断调试观测值的不同噪声组合协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$,使式(2)估计值达到最大化,最大似然函数的计算式为:

$$l(\hat{\boldsymbol{v}},\boldsymbol{C})=\frac{1}{2\pi^{N/2}(\det\boldsymbol{C})^{1/2}}\exp\left(-0.5\hat{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}\right) \tag{2}$$

式中,l 为联合概率密度;N 为数据长度;det 为矩阵行列式;$\hat{\boldsymbol{v}}$ 为拟合残差,由协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 采用加权最小二乘法求得。

为了方便求出多项参数,将式(2)转化为自然对数形式:

$$\ln\left[l(\hat{\boldsymbol{v}},\boldsymbol{C})\right]=-\frac{1}{2}\left[\ln(\det\boldsymbol{C})+\hat{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}+N\ln 2\pi\right] \tag{3}$$

不同噪声组合的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 可以表达若干随机噪声过程,WN、FN、RW、PL、GGM 模型的协方差矩阵分别为:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{WN}}=m_{\mathrm{WN}}^2\boldsymbol{I} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{FN}}=m_{\mathrm{FN}}^2\boldsymbol{J}_{\mathrm{FN}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{RW}}=m_{\mathrm{RW}}^2\boldsymbol{J}_{\mathrm{RW}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{PL}}=m_{\mathrm{PL}}^{2}\boldsymbol{J}_{\mathrm{PL}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{GGM}}=m_{\mathrm{GGM}}^{2}\boldsymbol{J}_{\mathrm{GGM}} \tag{8}$$

式中,m_{WN}为白噪声的振幅;矩阵$\boldsymbol{I}$为$N\times N$的单位矩阵;m_{FN}、m_{RW}、m_{PL}、m_{GGM}分别为相应有色噪声的振幅;$\boldsymbol{J}_{\mathrm{FN}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{RW}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{PL}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{GGM}}$为相应有色噪声的协方差矩阵。

本研究通过贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)来评价最优噪声模型[25],其基本原理如下:

$$\ln L=-\frac{1}{2}\left[N\ln 2\pi+\ln\det\bar{\boldsymbol{C}}+2N\ln\sigma+N\right] \tag{9}$$

$$E_{\mathrm{BIC}}=k\ln N+2\ln L \tag{10}$$

式中,L为似然函数值;$\bar{\boldsymbol{C}}$为所有假设噪声模型相加;σ为噪声的标准差;k为所选噪声模型中待估参数的总数。若采用WN与PL的组合模型估计式(1)中的线性趋势项,则k=5,这5个参数分别为GNSS坐标时间序列中的偏差值、线性运动趋势项、PL的谱指数、不同噪声分量之间的差值以及驱动白噪声的方差。

2 结果分析

2.1 环境负载效应的影响

为了更好地分析环境负载对GNSS垂向坐标时间序列的影响,使用最小二乘法对所有GNSS垂向坐标时间序列进行去线性化处理。本文使用GNSS和环境负载形变的相关性和从GNSS垂向坐标时间序列中减去环境负载形变后均方根误差(root mean square, RMS)减少的百分比(percentage RMS, PRMS)来定量评价环境负载效应的影响[26]。如果PRMS为正值,说明环境负载形变能够有效改正GNSS垂向坐标时间序列中的季节性信号。图4分别为水文、大气、非潮汐海洋、组合环境负载与GNSS垂向坐标时间序列的相关系数分布图,分别为0.1~0.7、0~0.6、0~0.4、0.2~0.7,平均值分别为0.4、0.4、0.2、0.6,说明水文、大气、非潮汐海洋、组合环境负载与GNSS垂向坐标时间序列都存在着一定相关性。

图5分别为水文、大气、非潮汐海洋、组合环境负载改正GNSS垂向坐标时间序列后的PRMS。由图5可以看出,大气、非潮汐海洋负载的PRMS值大部分都为正,说明这些环境负载形变对GNSS垂向坐标时间序列中的季节性信号有一定的贡献。水文、大气、非潮汐海洋、组合环境负载改正后的PRMS分别为-1.3%~22%、-1.4%~17.4%、-0.1%~1.3%、2.4%~30.1%,平均值分别为8.7%、6.7%、0.6%、15.8%。大气负载和水文负载的贡献要明显比非潮汐海洋负载大,组合环境负载主要表现出了水文、大气、非潮汐海洋负载的综合影响结果。

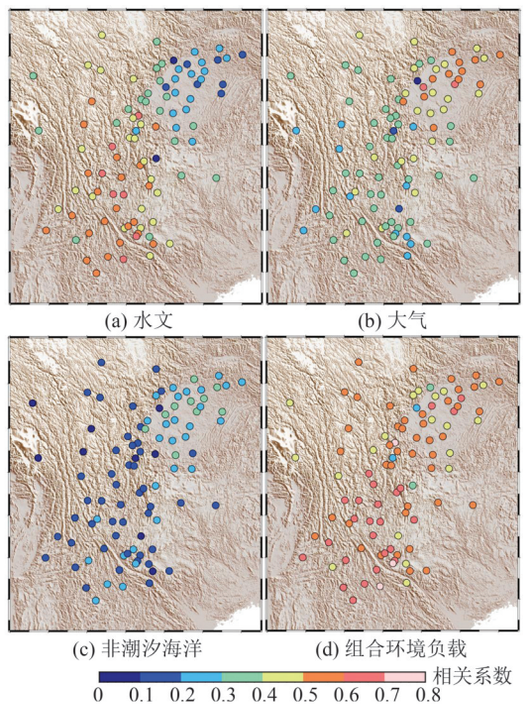


图4 GNSS垂向时间序列与环境负载形变的相关性

Fig. 4 Correlation Between GNSS Vertical Time Series and Environmental Loading Deformation

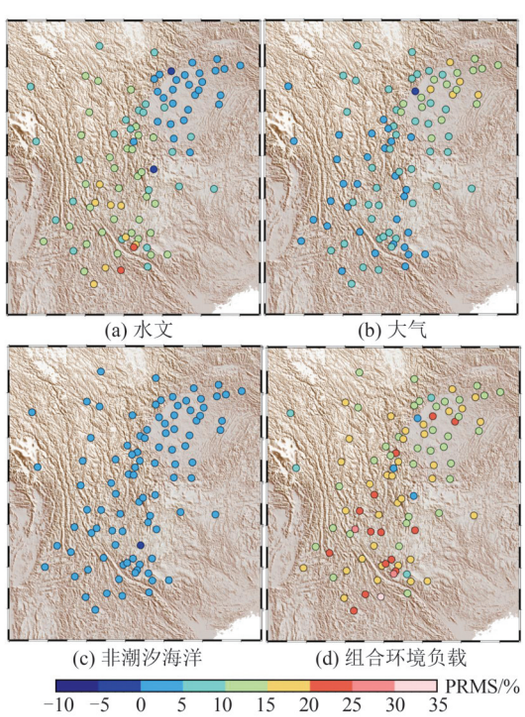


图5 GNSS垂向时间序列减去环境负载形变后的PRMS

Fig. 5 PRMS at All Stations After Removing Environmental Loading Deformation from GNSS Time Series

以鲜水河-安宁河-则木河断裂带(图1中黑色线)为边界,由图5(a)和5(b)可知,边界西侧测站经水文负载改正后的PRMS要明显大于东侧测站,边界东侧测站经大气负载改正后的PRMS要大于西侧测站,说明在边界西侧测站受水文负载影响更大,东侧测站受大气负载影响更大,造成这种差异性主要是由于该地区的降雨量受来自孟加拉湾和南海的季风影响,形成了从南到北逐渐减少、西部多于东部的特点,在降雨量较少的地区,水文负载影响较小[27]。

2.2　环境负载改正前后测站的最优噪声模型

准确辨识出GNSS连续站的最优噪声模型能够合理地获取测站的速度及其不确定度。为了分析不同噪声模型估计GNSS坐标时间序列的线性速度及其不确定度参数影响,本文使用文献[28]中Hector软件包含的WN和有色噪声共9种噪声模型组成,估计青藏高原东南缘94个GNSS连续站垂向坐标时间序列中的速度及其不确定度参数,结果见表1。有色噪声模型估计的速度不确定度普遍要比单一的白噪声模型大几倍甚至几十倍,因此,仅使用白噪声模型会导致速度不确定度估计过于乐观,且会产生一定的速率偏差,这在实际应用中是不可忽视的。

由表1可以看出,RW和WN+RW模型估计GNSS测站的速度不确定度与其他有色噪声模型估计的差异较大,尤其是RW模型给出的不确定度远高于其他模型;FN模型估计的速度不确定值普遍大于1 mm/a。除了RW模型估计GNSS测站的速度之外,其他有色噪声模型估计的速度结果差异不大。

表1　不同噪声模型下估计的GNSS连续站速度及其不确定度/(mm·a^{-1})

Table 1　GNSS Velocity and Its Uncertainty Estimation Based on Different Noise Models/(mm·a^{-1})

测站	WN	FN	PL	RW	WN+FN	WN+PL	WN+GGM	WN+RW	WN+RW+FN
ANYU	1.8±0.05	2.2±1.2	2.1±0.4	1.2±57.8	2.2±0.8	2.1±0.4	2.1±0.4	2.6±10.4	2.2±0.8
BEIC	−0.8±0.04	−0.7±1.1	−0.8±0.3	−2.1±53.0	−0.7±0.7	−0.8±0.3	−0.8±0.3	−0.6±8.4	−0.7±0.7
CAXI	1.2±0.04	1.0±1.2	1.1±0.2	−0.5±59.1	1.0±0.6	1.1±0.3	1.1±0.3	1.0±6.2	1.0±0.6
CHDU	0.1±0.04	0.1±1.0	0.1±0.2	−0.9±51.1	0.1±0.6	0.1±0.2	0.1±0.2	0.1±7.0	0.1±0.6
DAZU	2.6±0.04	2.7±1.1	2.6±0.2	2.2±56.4	2.7±0.6	2.6±0.2	2.6±0.2	2.6±6.6	2.7±0.6
GANL	0.4±0.04	0.6±1.1	0.5±0.2	−0.2±51.8	0.6±0.6	0.5±0.2	0.5±0.2	0.9±5.3	0.6±0.6
GZGY	0.4±0.04	0.6±1.0	0.5±0.3	−0.7±50.0	0.6±0.6	0.5±0.3	0.5±0.3	0.7±7.1	0.6±0.6
GZSC	0.8±0.04	1.0±1.1	0.9±0.2	−1.5±53.9	1.0±0.6	0.9±0.4	0.9±0.3	0.9±7.9	1.0±0.6
HANY	0.9±0.04	1.2±1.0	1.1±0.3	1.0±51.6	1.2±0.6	1.1±0.3	1.0±0.2	1.7±7.9	1.2±0.6
JIGE	0.6±0.03	0.7±0.9	0.6±0.3	−0.3±43.3	0.7±0.7	0.6±0.3	0.6±0.2	0.6±8.7	0.7±0.7
JYAN	0.7±0.05	1.0±1.3	0.8±0.2	0.6±66.2	1.0±0.6	0.9±0.3	0.9±0.3	1.6±5.7	1.0±0.6
KMIN	2.5±0.05	2.4±1.4	2.5±0.3	−0.2±67.9	2.4±0.7	2.4±0.6	2.5±0.4	2.1±6.8	2.4±0.7
LESH	0.9±0.04	1.2±1.1	1.1±0.2	0.7±53.9	1.2±0.6	1.1±0.3	1.1±0.2	1.6±5.6	1.2±0.6
LINS	1.3±0.05	1.5±1.4	1.4±0.2	1.2±73.1	1.6±0.5	1.4±0.3	1.4±0.2	2.0±4.4	1.6±0.5
LUZH	1.3±0.05	1.3±1.2	1.3±0.3	−0.7±59.3	1.4±0.8	1.3±0.3	1.3±0.3	1.2±8.4	1.4±0.8
MOXI	3.1±0.05	3.3±1.3	3.2±0.4	3.0±63.4	3.3±0.8	3.2±0.4	3.2±0.4	3.7±11.2	3.3±0.8
MYAN	0.2±0.04	0.4±1.2	0.3±0.2	−0.5±62.3	0.4±0.6	0.3±0.3	0.3±0.2	0.8±5.2	0.4±0.6
NANB	0.9±0.04	1.1±1.0	1.0±0.2	0.3±50.7	1.1±0.6	1.0±0.2	1.0±0.2	1.1±6.4	1.1±0.6
NANJ	1.3±0.04	1.4±1.1	1.3±0.2	0.4±54.8	1.4±0.6	1.3±0.2	1.3±0.1	1.4±6.1	1.4±0.6
NEIJ	0.5±0.04	0.8±1.1	0.7±0.2	0.5±56.5	0.8±0.7	0.7±0.2	0.7±0.2	1.3±7.7	0.8±0.7
PENX	1.9±0.04	2.0±1.0	2.0±0.2	1.6±49.8	2.1±0.6	2.0±0.2	2.0±0.1	2.1±6.1	2.1±0.6
PIXI	−1.3±0.07	−0.7±1.6	−0.9±0.5	−1.0±80.0	−0.7±1.0	−0.7±0.9	−1.0±0.6	0.3±12.2	−0.7±1.0
QHBM	0.6±0.03	0.7±0.9	0.7±0.2	−0.4±41.5	0.7±0.6	0.7±0.2	0.7±0.2	1.0±6.2	0.7±0.6
QLAI	−1.7±0.03	−1.5±0.9	−1.6±0.2	−1.6±42.9	−1.5±0.6	−1.6±0.2	−1.6±0.2	−1.0±6.7	−1.5±0.6
RENS	−0.4±0.03	−0.2±0.9	−0.3±0.2	−0.4±45.8	−0.2±0.5	−0.3±0.2	−0.3±0.2	0.1±6.7	−0.2±0.5
ROXI	0.4±0.04	0.6±1.1	0.5±0.3	−0.2±54.8	0.6±0.6	0.5±0.3	0.5±0.3	1.1±7.1	0.6±0.6
SCBZ	2.1±0.04	2.1±1.0	2.1±0.2	1.0±51.5	2.2±0.6	2.1±0.2	2.1±0.2	2.0±6.3	2.2±0.6
SCGZ	1.1±0.03	1.3±0.8	1.2±0.3	1.0±39.5	1.3±0.6	1.2±0.3	1.2±0.2	1.8±7.4	1.3±0.6

续表

测站	WN	FN	PL	RW	WN+FN	WN+PL	WN+GGM	WN+RW	WN+RW+FN
SCJL	−0.3±0.05	−0.1±1.4	−0.2±0.3	−.0±69.1	−0.1±0.9	−0.2±0.3	−0.2±0.3	0.3±10.4	−0.1±0.9
SCJU	1.1±0.04	1.3±1.0	1.2±0.3	0.3±50.0	1.3±0.7	1.2±0.3	1.2±0.2	1.5±8.5	1.3±0.7
SCLH	0.4±0.03	0.7±0.8	0.6±0.3	0.4±39.9	0.7±0.6	0.6±0.3	0.6±0.3	1.3±6.7	0.7±0.6
SCLT	0.2±0.03	0.4±1.0	0.3±0.2	0.4±47.5	0.4±0.5	0.3±0.2	0.3±0.2	0.8±5.3	0.4±0.5
SCMB	−1.1±0.05	−0.6±1.2	−0.7±0.4	−1.5±56.7	−0.5±0.9	−0.7±0.4	−0.7±0.4	−0.2±11.2	−0.5±0.9
SCML	−2.9±0.05	−2.6±1.2	−2.7±0.3	−2.8±58.0	−2.5±0.8	−2.7±0.3	−2.7±0.3	−2.3±7.2	−2.5±0.8
SCMN	−0.1±0.04	0.2±1.1	0.1±0.3	−0.3±51.9	0.2±0.7	0.1±0.3	0.1±0.3	0.8±6.7	0.2±0.7
SCMX	6.4±0.04	6.7±1.0	6.6±0.3	6.2±50.2	6.7±0.7	6.6±0.3	6.5±0.2	7.1±9.3	6.7±0.7
SCNC	1.9±0.04	2.2±1.0	2.1±0.3	1.4±50.8	2.2±0.6	2.1±0.3	2.1±0.3	2.2±7.9	2.2±0.6
SCNN	0.3±0.05	0.4±1.3	0.4±0.3	−0.5±63.4	0.4±0.8	0.4±0.3	0.4±0.3	0.4±8.7	0.4±0.8
SCPZ	0.2±0.04	0.5±1.1	0.4±0.3	0.3±53.3	0.5±0.7	0.4±0.3	0.4±0.3	0.7±7.4	0.5±0.7
SCSM	5.6±0.05	5.8±1.4	5.7±0.4	4.6±65.9	5.8±0.9	5.7±0.4	5.7±0.2	6.0±12.1	5.8±0.9
SCSP	1.4±0.03	1.6±0.9	1.5±0.3	1.5±42.4	1.6±0.6	1.5±0.3	1.5±0.2	2.1±7.7	1.6±0.6
SCTQ	0.7±0.04	1.0±1.1	0.9±0.2	−0.1±52.9	1.0±0.7	0.9±0.2	0.9±0.2	1.1±8.0	1.0±0.7
SCXC	0.8±0.04	1.1±1.1	1.0±0.3	−0.3±51.9	1.1±0.6	1.0±0.3	1.0±0.2	1.5±7.3	1.1±0.6
SCXD	0.0±0.04	0.3±1.0	0.2±0.3	−0.7±47.0	0.3±0.7	0.2±0.3	0.2±0.3	0.5±8.4	0.3±0.7
SCXJ	−0.7±0.03	−0.5±0.9	−0.5±0.3	−0.8±43.0	−0.5±0.7	−0.5±0.3	−0.6±0.2	−0.1±8.9	−0.5±0.7
SCYX	−7.8±0.06	−7.1±1.3	−7.4±0.4	−5.6±65.0	−7.1±0.7	−7.1±0.7	−7.1±0.7	−5.7±7.1	−6.6±1.5
SCYY	−0.2±0.04	0.2±0.9	0.0±0.2	−0.6±46.4	0.2±0.6	0.0±0.2	0.0±0.2	0.9±5.9	0.2±0.6
TONJ	1.3±0.04	1.7±1.3	1.5±0.2	2.1±63.8	1.7±0.5	1.6±0.3	1.6±0.3	2.4±4.4	1.7±0.5
WANY	2.8±0.04	2.9±1.1	2.9±0.2	2.4±54.5	2.9±0.5	2.9±0.2	2.9±0.2	3.0±5.2	2.9±0.5
WENC	−3.4±0.04	−3.3±1.0	−3.3±0.3	−3.7±49.2	−3.3±0.8	−3.3±0.3	−3.3±0.3	−2.9±9.3	−3.3±0.8
XIAG	2.1±0.05	2.0±1.5	2.0±0.3	2.9±73.2	2.0±0.7	2.0±0.4	2.0±0.4	2.1±6.9	2.0±0.7
XYON	4.5±0.05	4.3±1.2	4.4±0.4	2.6±56.6	4.3±0.8	4.3±0.5	4.4±0.5	3.8±10.4	4.3±0.8
XZCD	0.9±0.05	1.2±1.3	1.1±0.3	0.3±63.8	1.2±0.9	1.1±0.3	1.0±0.3	1.4±11.2	1.2±0.9
XZCY	2.2±0.05	2.5±1.4	2.4±0.4	1.6±68.2	2.5±1.1	2.4±0.4	2.3±0.4	3.1±15.8	2.5±1.1
YAAN	1.1±0.04	1.3±1.0	1.2±0.3	0.7±47.0	1.3±0.7	1.2±0.3	1.2±0.2	1.6±8.5	1.3±0.7
YANT	0.9±0.04	1.1±1.1	1.0±0.2	0.3±51.8	1.1±0.6	1.0±0.2	1.0±0.2	1.2±7.6	1.1±0.6
YBIN	0.4±0.04	0.6±1.0	0.5±0.3	0.2±48.4	0.6±0.6	0.5±0.3	0.5±0.2	0.8±8.3	0.6±0.6
YNCX	1.5±0.05	1.8±1.1	1.7±0.3	2.5±52.7	1.8±0.6	1.7±0.4	1.7±0.4	2.3±6.3	1.8±0.6
YNDC	0.7±0.05	0.9±1.4	0.8±0.3	0.0±68.9	0.9±0.8	0.8±0.3	0.8±0.3	1.5±7.2	0.9±0.8
YNGM	0.4±0.05	0.5±1.3	0.4±0.2	−0.1±66.0	0.5±0.7	0.4±0.2	0.4±0.2	1.1±6.7	0.5±0.7
YNHZ	1.1±0.05	0.7±1.4	0.9±0.3	−1.8±69.9	0.8±0.8	0.9±0.4	1.0±0.3	−0.6±9.4	0.8±0.8
YNJD	1.3±0.05	1.5±1.5	1.4±0.2	0.5±75.3	1.5±0.6	1.5±0.4	1.5±0.4	2.0±4.0	1.5±0.6
YNJP	0.6±0.05	0.8±1.3	0.7±0.3	0.9±66.4	0.8±0.7	0.8±0.5	0.8±0.5	0.6±7.3	0.8±0.7
YNLA	0.8±0.06	0.7±1.4	0.8±0.4	0.8±68.8	0.8±0.9	0.8±0.6	0.8±0.6	0.6±9.5	0.8±0.9
YNLC	0.3±0.05	0.4±1.2	0.4±0.3	−0.8±60.5	0.4±0.7	0.4±0.4	0.4±0.4	0.5±7.1	0.4±0.7
YNLJ	0.3±0.04	0.6±1.0	0.6±0.3	−1.3±49.7	0.7±0.6	0.6±0.4	0.6±0.4	0.4±7.2	0.7±0.6
YNMH	−1.2±0.04	−1.0±1.1	−1.1±0.2	−0.8±53.6	−1.0±0.6	−1.1±0.2	−1.2±0.2	−0.4±6.0	−1.0±0.6
YNMJ	2.0±0.05	2.1±1.2	2.1±0.4	1.1±57.8	2.1±0.8	2.1±0.4	2.1±0.4	2.3±9.4	2.1±0.8
YNML	−0.2±0.05	0.0±1.2	−0.1±0.2	−1.7±61.5	0.0±0.6	0.0±0.4	0.0±0.4	0.1±6.5	0.0±0.6
YNMZ	0.6±0.05	0.5±1.2	0.6±0.3	−0.7±60.7	0.5±0.8	0.6±0.3	0.6±0.3	0.0±8.8	0.5±0.8
YNRL	1.1±0.05	1.2±1.1	1.1±0.3	1.0±56.3	1.2±0.6	1.2±0.4	1.2±0.4	1.7±5.6	1.2±0.6
YNSD	1.1±0.04	1.4±1.1	1.3±0.3	0.5±51.5	1.4±0.7	1.3±0.3	1.3±0.3	1.7±6.8	1.4±0.7
YNSM	−0.7±0.04	−0.6±1.1	−0.6±0.3	−1.5±51.4	−0.6±0.7	−0.6±0.3	−0.6±0.2	−0.4±7.5	−0.6±0.7
YNTC	2.9±0.06	2.9±1.8	2.9±0.3	2.1±88.7	2.9±1.0	2.9±0.3	2.9±0.3	3.0±8.8	2.9±1.0
YNTH	1.4±0.05	1.6±1.2	1.5±0.3	0.2±58.2	1.6±0.7	1.5±0.3	1.5±0.3	1.7±6.7	1.6±0.7

续表

测站	WN	FN	PL	RW	WN+FN	WN+PL	WN+GGM	WN+RW	WN+RW+FN
YNWS	1.1±0.04	1.4±1.1	1.3±0.2	0.6±56.1	1.4±0.6	1.3±0.3	1.3±0.3	1.4±7.3	1.4±0.6
YNXP	1.3±0.04	1.6±1.1	1.5±0.3	1.5±53.0	1.6±0.7	1.5±0.3	1.5±0.3	1.7±7.9	1.6±0.7
YNYA	1.2±0.04	1.5±1.0	1.4±0.2	0.2±51.7	1.5±0.6	1.4±0.3	1.4±0.3	1.8±6.1	1.5±0.6
YNYL	−0.6±0.06	−0.4±1.4	−0.5±0.5	−2.5±69.9	−0.4±1.0	−0.5±0.5	−0.5±0.4	0.0±11.0	−0.4±1.0
YNYM	0.7±0.04	0.9±1.1	0.8±0.3	0.0±52.2	0.9±0.7	0.8±0.3	0.8±0.3	1.0±7.1	0.9±0.7
YNYS	0.7±0.04	0.9±1.1	0.8±0.2	0.0±54.0	1.0±0.6	0.8±0.3	0.8±0.3	1.4±6.7	1.0±0.6
YNZD	−0.9±0.05	−0.7±1.4	−0.7±0.3	−2.2±70.1	−0.6±0.8	−0.7±0.4	−0.7±0.3	−0.8±8.4	−0.6±0.8
ZHJI	0.1±0.03	0.3±0.8	0.2±0.2	−0.4±40.7	0.3±0.6	0.2±0.2	0.2±0.2	0.4±7.2	0.3±0.6
ZTON	0.3±0.05	0.7±1.3	0.5±0.2	−0.2±65.0	0.7±0.6	0.6±0.4	0.6±0.4	1.0±6.2	0.7±0.6
LDHC	3.2±0.07	3.1±1.6	3.1±0.3	1.5±58.1	3.1±0.8	3.1±0.3	3.1±0.3	2.6±5.9	3.1±0.8
LDKY	6.0±0.12	6.2±2.4	6.2±0.7	6.0±89.6	6.3±1.5	6.2±0.9	6.2±0.8	6.1±13.6	6.3±1.5
LDTD	7.5±0.08	7.3±1.7	7.4±0.4	6.0±60.4	7.3±1.0	7.4±0.4	7.4±0.4	6.9±5.7	7.3±1.0
YNBC	4.4±0.08	4.2±1.7	4.3±0.3	2.8±62.2	4.2±0.9	4.3±0.3	4.3±0.2	3.4±6.1	4.2±0.9
YNDZ	3.5±0.09	2.9±2.0	3.3±0.4	−0.2±71.5	3.0±1.0	3.3±0.4	3.3±0.4	1.7±5.0	3.0±1.0
YNJC	6.5±0.08	6.1±1.7	6.4±0.3	3.6±62.7	6.2±0.9	6.3±0.4	6.4±0.3	4.7±6.1	6.2±0.9
YNLP	−0.4±0.10	−1.2±1.7	−0.9±0.6	−3.5±61.0	−1.2±1.0	−1.1±0.8	−1.0±0.8	−3.3±7.4	−1.2±1.0
YNSP	4.9±0.08	4.5±1.8	4.7±0.4	2.8±64.3	4.6±1.1	4.7±0.4	4.8±0.3	2.9±10.0	4.6±1.1
YNZT	4.3±0.15	3.7±3.2	4.1±0.6	3.0±121.4	3.7±1.5	3.9±1.0	4.0±0.7	0.3±11.9	3.7±1.5
YNZY	4.4±0.07	4.1±1.5	4.2±0.4	2.2±55.9	4.1±0.9	4.2±0.4	4.3±0.3	2.8±7.4	4.1±0.9

通过对比不同噪声模型下估计测站的速度及其不确定度,选择不合适的噪声模型会对GNSS连续站的速度及其不确定度产生错误的估计。水文、大气、非潮汐海洋负载对青藏高原东南缘的GNSS垂向坐标时间序列均存在一定的影响。因此,本文研究组合环境负载改正GNSS垂向坐标时间序列前后的最优噪声模型辨识。表2为环境负载改正前后的最优噪声模型结果,最优噪声模型表现为PL、WN+FN、WN+PL。图6为经过环境负载模型改正前后94个GNSS连续站最优噪声模型的分布,由图6可以看出,环境负载改正前,最优噪声模型分别为PL(81%)、WN+PL(12%)、WN+FN(7%);环境负载改正后,最优噪声模型分别为PL(71%)、WN+PL(16%)、WN+FN(13%),PL比例减少10%,WN+PL和WN+FN比例均增加。

文献[16]使用WN、WN+FN、WN+RW、WN+PL等4种噪声模型对川滇地区时间跨度在2010—2013年的52个GNSS连续站进行噪声特性分析,结果表明青藏高原东南缘GNSS连续站最优噪声模型主要为WN+FN、WN+PL。文献[17]使用WN、WN+FN、WN+PL、WN+RW、WN+FN+RW等5种噪声模型对青藏高原东南缘时间跨度在2011-01—2019-08的39个测站GNSS垂向坐标时间序列进行噪声特性分析,青藏高原东南缘连续站的最优噪声模型与文献[16]的结论一致。本研究主要结论的最优噪声模型中虽然也包含WN+PL、WN+FN,但是还存在着PL,约占81%。文献[16-17]的研究中仅使用了WN和部分有色噪声(WN+FN、WN+RW、WN+PL)对青藏高原东南缘的GNSS垂向坐标时间序列进行噪声特性分析。本研究中除了使用WN、WN+FN、WN+RW、WN+PL 4种噪声模型之外,还增加了PL、RW、FN单一的噪声模型。此外,本文所使用的GNSS坐标时间序列跨度更长,且测站数量更密。综上所述,本文对青藏高原东南缘GNSS垂向坐标时间序列的噪声特性研究结果更具有代表性。经过环境负载改正前后,本文结果认为青藏高原东南缘GNSS测站大部分最优噪声模型表现为PL噪声,这一发现为后续合理地获取青藏高原东南缘测站的速度及其不确定度提供参考。

3　讨　论

3.1　组合环境负载改正前后测站的速度及其不确定度估计分析

为了研究环境负载对GNSS坐标时间序列的速度及其不确定度的影响,本文对组合环境负载改正前后最优噪声模型估计的测站速度及其

表2 环境负载改正前后最优噪声模型

Table 2 Optimal Noise Models Before and After Environmental Loading Correction

测站	改正前	改正后	测站	改正前	改正后	测站	改正前	改正后
ANYU	PL	PL	SCMB	PL	PL	YNLC	PL	PL
BEIC	PL	PL	SCML	PL	PL	YNLJ	WN+PL	WN+PL
CAXI	WN+PL	WN+PL	SCMN	PL	PL	YNMH	PL	PL
CHDU	PL	PL	SCMX	PL	PL	YNMJ	PL	PL
DAZU	PL	PL	SCNC	PL	WN+PL	YNML	WN+PL	WN+FN
GANL	PL	PL	SCNN	PL	PL	YNMZ	PL	PL
GZGY	PL	PL	SCPZ	PL	PL	YNRL	WN+PL	WN+PL
GZSC	WN+PL	WN+PL	SCSM	PL	PL	YNSD	PL	PL
HANY	PL	PL	SCSP	PL	PL	YNSM	PL	PL
JIGE	PL	PL	SCTQ	PL	PL	YNTC	PL	PL
JYAN	PL	WN+PL	SCXC	PL	PL	YNTH	PL	PL
KMIN	WN+FN	WN+FN	SCXD	PL	PL	YNWS	PL	WN+PL
LESH	PL	WN+PL	SCXJ	PL	PL	YNXP	PL	PL
LINS	WN+PL	WN+FN	SCYX	WN+FN	WN+FN	YNYA	PL	WN+PL
LUZH	PL	PL	SCYY	PL	PL	YNYL	PL	PL
MOXI	PL	PL	TONJ	PLWN	WN+FN	YNYM	PL	PL
MYAN	PL	WN+PL	WANY	PL	PL	YNYS	PL	PL
NANB	PL	PL	WENC	PL	PL	YNZD	PL	PL
NANJ	PL	PL	XIAG	WN+PL	WN+PL	ZHJI	PL	PL
NEIJ	PL	PL	XYON	PL	WN+FN	ZTON	WN+FN	WN+FN
PENX	PL	PL	XZCD	PL	PL	LDHC	PL	PL
PIXI	WN+FN	WN+FN	XZCY	PL	PL	LDKY	PL	PL
QHBM	PL	PL	YAAN	PL	PL	LDTD	PL	PL
QLAI	PL	PL	YANT	PL	PL	YNBC	PL	PL
RENS	PL	PL	YBIN	PL	PL	YNDZ	PL	PL
ROXI	PL	WN+PL	YNCX	WN+PL	WN+PL	YNJC	PL	PL
SCBZ	PL	WN+PL	YNDC	PL	PL	YNLP	WN+FN	WN+FN
SCGZ	PL	PL	YNGM	PL	PL	YNSP	PL	PL
SCJL	PL	PL	YNHZ	PL	PL	YNZT	WN+FN	WN+FN
SCJU	PL	PL	YNJD	WN+FN	WN+FN	YNZY	PL	PL
SCLH	PL	PL	YNJP	WN+PL	WN+FN			
SCLT	PL	PL	YNLA	WN+PL	WN+PL			

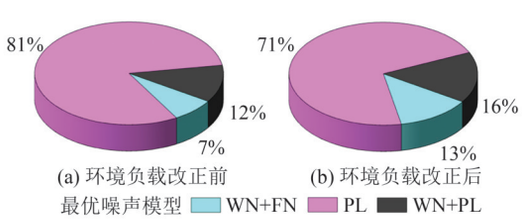


图6 组合环境负载改正前后的最优噪声模型分布

Fig. 6 Optimal Noise Model Distribution Before and After Combined Environmental Loading Correction

不确定度差值进行对比分析。表3为组合环境负载改正前后最优噪声模型估计的速度及其不确定度差值,速度差值范围为−0.11~0.26 mm/a,速度不确定度差值范围为−0.33~0.16 mm/a。图7为速度及不确定插值分布直方图,速度及其不确定度差值结果主要集中在0.05 mm/a。因此,为了准确估计GNSS连续站垂向坐标时间序列的速度及其不确定度参数,部分连续站需要考虑环境负载改正前后的最优噪声模型。

3.2 组合环境负载改正前后测站的周年振幅和相位分析

GNSS垂向坐标时间序列中主要存在着以周年和半周年变化的季节性信号,周年信号更为明显,因此,本研究主要分析环境负载改正前后测站的周年振幅和相位关系。图8为组合环境负载改正前后在最优噪声模型下估计的测站周年振幅和相位,其中箭头长度表示周年振幅,箭头方向表示相位方向,指向东、南、西、北方向依次表示为3月、6月、9月、12月。环境负载改正前,青藏高原东南缘94个测站的周年振幅范围为4.8~13.8 mm,平

表3　组合环境负载改正前后最优噪声模型下估计的GNSS连续站速度不确定度差/(mm·a^{-1})

Table 3　Difference of GNSS Velocity Uncertainty Based on Optimal Noise Model Before and After Combined Environmental Loading Correction/(mm·a^{-1})

测站	改正前后速度差	改正前后速度不确定差	测站	改正前后速度差	改正前后速度不确定差	测站	改正前后速度差	改正前后速度不确定差
ANYU	0.10	0.05	SCMB	0.10	0.05	YNLC	0.05	0.04
BEIC	0.07	0.03	SCML	0.06	0.04	YNLJ	0.07	0.03
CAXI	0.11	−0.02	SCMN	0.06	0.03	YNMH	0.04	0.03
CHDU	0.06	0.03	SCMX	0.07	0.03	YNMJ	0.04	0.06
DAZU	0.06	0.04	SCNC	0.07	−0.03	YNML	0.02	−0.14
GANL	0.05	0.03	SCNN	0.05	0.06	YNMZ	0.02	0.04
GZGY	0.12	0.06	SCPZ	0.06	0.05	YNRL	0.08	0.01
GZSC	0.10	0.03	SCSM	0.05	0.03	YNSD	0.07	0.04
HANY	0.06	0.04	SCSP	0.07	0.05	YNSM	0.04	0.04
JIGE	0.08	0.05	SCTQ	0.06	0.03	YNTC	0.05	0.01
JYAN	0.03	−0.08	SCXC	0.05	0.03	YNTH	0.04	0.04
KMIN	0.09	0.05	SCXD	0.07	0.04	YNWS	0.00	−0.03
LESH	0.04	−0.06	SCXJ	0.06	0.04	YNXP	0.05	0.05
LINS	0.07	−0.17	SCYX	0.11	0.02	YNYA	0.01	−0.03
LUZH	0.10	0.05	SCYY	0.07	0.04	YNYL	0.06	0.03
MOXI	0.06	0.02	TONJ	0.00	−0.16	YNYM	0.05	0.06
MYAN	0.05	−0.09	WANY	0.04	0.03	YNYS	0.06	0.04
NANB	0.07	0.04	WENC	0.07	0.03	YNZD	0.05	0.03
NANJ	0.05	0.03	XIAG	0.06	0.02	ZHJI	0.08	0.04
NEIJ	0.08	0.03	XYON	0.26	−0.33	ZTON	0.15	0.06
PENX	0.06	0.04	XZCD	0.03	0.02	LDHC	−0.02	0.04
PIXI	0.13	0.03	XZCY	0.05	0.02	LDKY	−0.02	0.05
QHBM	0.04	0.02	YAAN	0.07	0.04	LDTD	−0.03	0.06
QLAI	0.07	0.04	YANT	0.07	0.04	YNBC	0.01	0.07
RENS	0.08	0.04	YBIN	0.09	0.04	YNDZ	0.03	0.05
ROXI	0.06	−0.05	YNCX	0.06	0.05	YNJC	−0.11	0.11
SCBZ	0.07	−0.04	YNDC	0.06	0.04	YNLP	−0.05	0.16
SCGZ	0.05	0.04	YNGM	0.04	0.02	YNSP	−0.07	0.14
SCJL	0.05	0.01	YNHZ	0.05	0.03	YNZT	0.19	0.03
SCJU	0.08	0.04	YNJD	0.08	0.06	YNZY	−0.01	0.10
SCLH	0.05	0.03	YNJP	0.02	−0.17			
SCLT	0.04	0.03	YNLA	0.05	0.04			

均为8.6 mm;相位范围为2～5.4月,平均为4.1月。经过环境负载改正后,所有测站的周年振幅范围为0.8～9 mm,平均为3.2 mm,周年相位变化比较杂乱,周年振幅明显降低,说明环境负载中的周年信号能够解释青藏高原东南缘GNSS垂向坐标时间序列中的季节性信号。

3.3　GNSS测站稳定性分析

文献[13]通过速度不确定度和年均降雨量的线性关系分析了加州和内华达州南部地区236个GNSS测站稳定性,结果表明在N方向上两者具有明显的相关性,在E和U方向上相关性不明显。文献[29]通过环境负载改正前后速度不确定度与年均降雨量、纬度的线性关系来研究中国区域27个GNSS测站在U方向上的稳定性,结果表明GNSS测站的速度不确定度与年均降雨量有一定的相关性,与纬度之间的相关性更强。同理,本文通过组合环境负载改正前后的速度不确定度与高程、年均降雨量、经度、纬度的线性关系来分析青藏高原东南缘GNSS连续站在垂向U方向上的稳定性,图9为线性关系结果。组合环

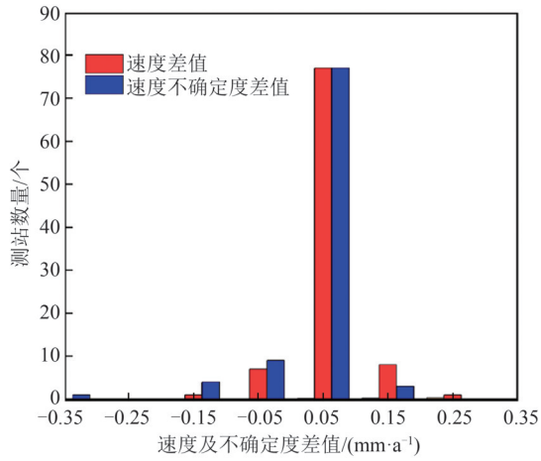
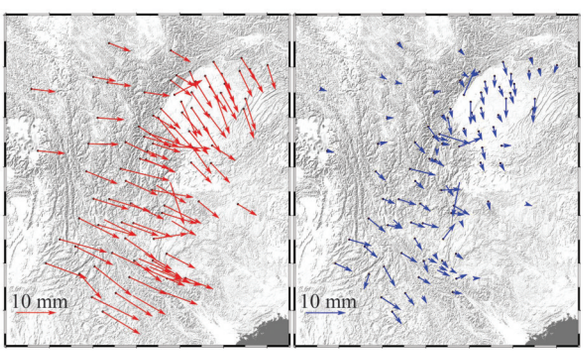


图7 组合环境负载改正前后最优噪声模型下估计的GNSS连续站速度及其不确定度差值分布直方图

Fig. 7 Distribution Histogram of GNSS Velocity and Its Uncertainty Difference Based on Optimal Noise Model Before and After Combined Environmental Loading Correction



(a) 改正前 (b) 改正后

图8 组合环境负载改正前后最优噪声模型下估计的GNSS连续站周年振幅和相位

Fig. 8 GNSS Annual Amplitude and Phase Based on Optimal Noise Model Before and After Combined Environmental Loading Correction

境负载改正前,速度不确定度与高程、年均降雨量、经度、纬度的相关性分别为0.08、0.07、0.11、0.25。测站在垂向U方向上的速度不确定度与高程、年均降雨量、经度相关性不明显,与纬度相关性也不强。经过组合环境负载改正后,速度不确定度与高程,年均降雨量、经度,纬度的相关性都变小,造成这种原因是经过组合环境负载改正之后,部分GNSS测站的速度不确定增大,原有的线性拟合关系被破坏,相关系数变低。

图10为环境负载改正前后的GNSS测站的速度不确定度。由图10可以看出,速度不确定大部分集中在0~0.4 mm/a,且没有明显的规律。文献[1]研究结果表明,青藏高原东南缘的水平速度场由北向南(高纬度向低纬度)逐渐减弱的运动趋势,应变场结果显示,在鲜水河-安宁河-则木河断裂带-小江断裂带上活动构造强烈,但是通过图10中环境负载改正前后,在鲜水河-安宁河-则木河断裂带-小江断裂带附近的测站速度不确定度较小。通过水平速度场、测站速度不确定度、应变场等分析,GNSS测站在垂向U方向上的稳定性与纬度、活动构造等因素关联不大。青藏高原东南缘地质结构复杂,本文所选取的年均降雨量、经纬度、高程并不是判定GNSS测站垂向U方向上稳定性的主要指标,可能青藏高原东南缘的地质类型、观测墩的热膨胀效应以及风化和冰雪融化等地表非构造力等也会对GNSS测站垂向U方向上稳定性存在一定的影响。

4 结 语

本文通过对青藏高原东南缘94个GNSS连续站垂向坐标时间序列进行噪声特性分析,并考虑了环境负载的影响,讨论了环境负载改正前后的最优噪声模型和GNSS测站稳定性,初步得出以下结论:

1)水文、大气、非潮汐海洋负载与GNSS垂向坐标时间序列都存在着一定相关性,相关系数分别为0.4、0.4、0.2。从GNSS垂向坐标时间序列中分别减去水文、大气、非潮汐海洋负载后,RMS减少百分比平均分别为8.7%、6.7%、0.6%。综合相关性和RMS变化量百分比可知,环境负载形变对GNSS垂向坐标时间序列中的季节性信号有一定的贡献。

2)经过组合环境负载改正前后的最优噪声模型主要表现为PL、WN+FN、WN+PL。改正前后,最优噪声模型下青藏高原东南缘GNSS连续站估计的速度差值范围为-0.11~0.26 mm/a,速度不确定度差值范围为-0.33~0.16 mm/a;环境负载改正前,最优噪声模型下估计的测站周年振幅范围平均为8.6 mm,相位范围平均为4.1月,经过环境负载改正后,周年相位变化比较杂乱,周年振幅明显降低。

3)通过组合环境负载改正前后的速度不确定度与高程、年均降雨量、经度、纬度的线性关系来分析GNSS测站的稳定性,在青藏高原东南缘测站垂向U方向上的速度不确定度与高程、年均降雨量、经度、纬度的相关性分别为0.08、0.07、0.11、0.25,在青藏高原东南缘的年均降雨量、高程、经度、纬度对测站稳定性影响较小。

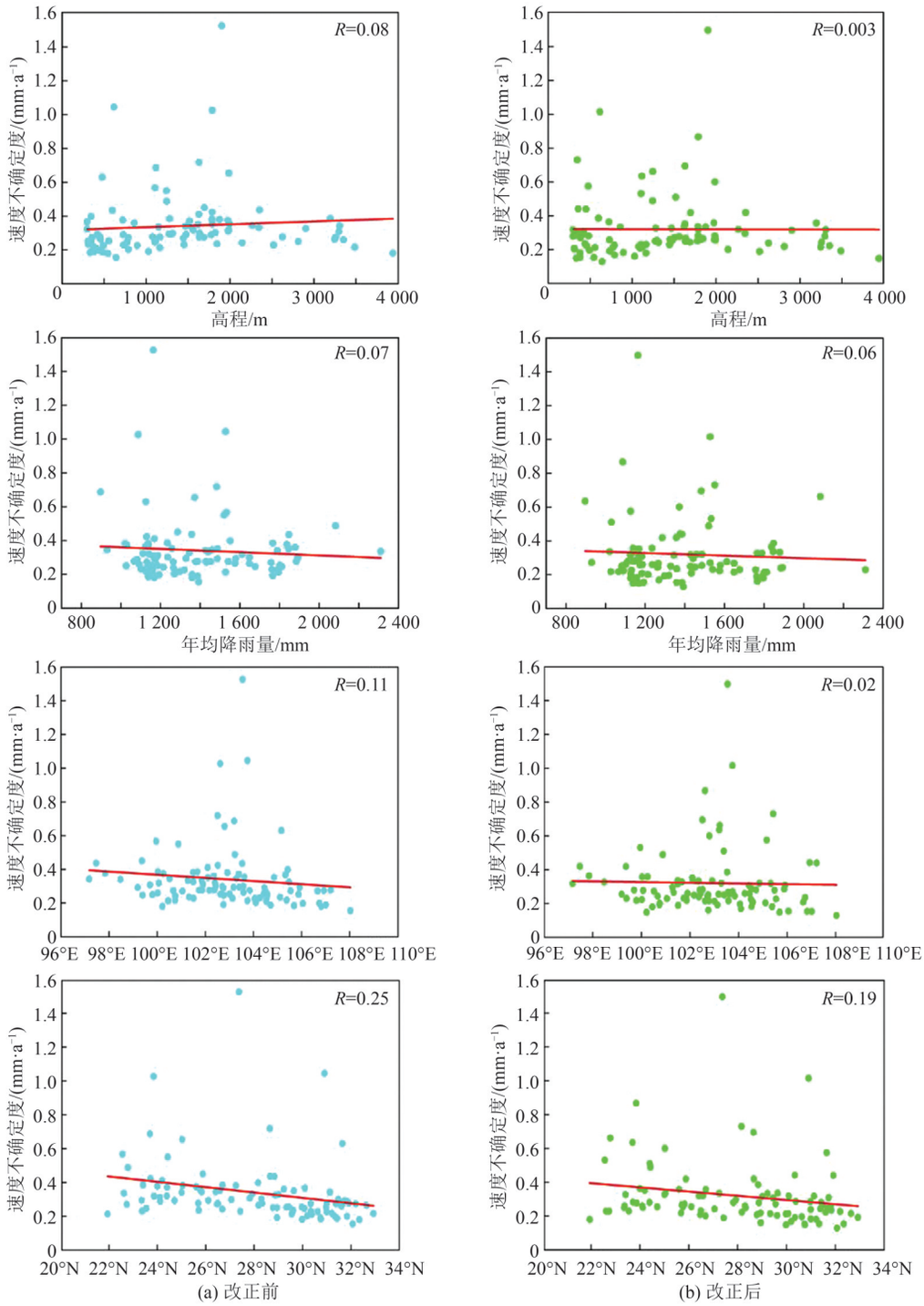


图 9　高程、年均降雨量、经纬度与环境负载改正前后最优噪声模型估计的速度不确定度之间的线性关系

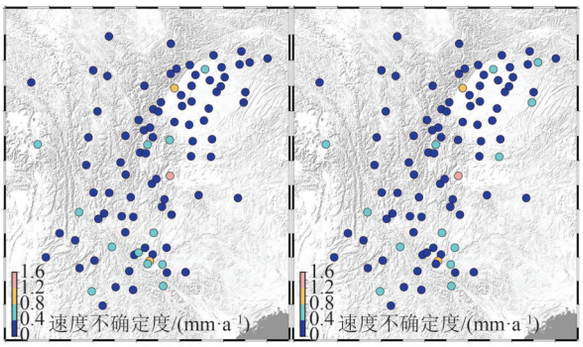
Fig. 9　Linear Relationship Between Elevation, Average Annual Rainfall, Longitude, Latitude and GNSS Velocity Uncertainty Based on Optimal Noise Model Before and After Environmental Loading Correction

本文所选取的高程、年均降雨量、经度、纬度并不是判定 GNSS 测站垂向 U 方向上稳定性的主要指标,在未来的工作中,建议将从以下几方面继续开展工作:

1)扩展研究范围,收集和分析更多关于地质类型、观测墩的物理特性以及地表非构造力等因素的数据。

2)探讨这些因素与 GNSS 测站稳定性之间的可能联系,并尝试建立更为全面的模型来解释 GNSS 测站速度不确定度的变化。

3)深入考察青藏高原东南缘地区的地质构造特征,分析其对 GNSS 测站稳定性的影响,以及这些因素与经纬度变化之间是否存在相关性。



(a) 改正前 (b) 改正后

图10 环境负载改正前后青藏高原东南缘GNSS测站的速度不确定度

Fig. 10 GNSS Velocity Uncertainty of Southeastern Tibet Plateau Before and After Environmental Loading Correction

参 考 文 献

[1] WANG M, SHEN Z K. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018774.

[2] 胡顺强, 王坦, 管雅慧, 等. 利用GPS和水文负载模型研究云南地区垂向季节性波动变化和构造变形[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2613-2630.
HU Shunqiang, WANG Tan, GUAN Yahui, et al. Analyzing the Seasonal Fluctuation and Vertical Deformation in Yunnan Province Based on GPS Measurement and Hydrological Loading Model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(8): 2613-2630.

[3] ZHU H, CHEN K J, HU S Q, et al. Using the Global Navigation Satellite System and Precipitation Data to Establish the Propagation Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought in Yunnan, China[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(4): e2022WR033126.

[4] 肖懿思, 方荣新, 李瑜, 等. 利用高频GNSS观测研究2025年西藏定日Ms 6.8地震地表形变及预警震级[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2176-2186.
XIAO Yisi, FANG Rongxin, LI Yu, et al. Surface Displacement and Early Warning Magnitude of the 2025 Dingri, Xizang Ms 6.8 Earthquake Using High-Rate GNSS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2176-2186.

[5] 王鹏, 刘静, 刘小利, 等. GNSS在地表过程研究中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(12): 2159-2180.
WANG Peng, LIU Jing, LIU Xiaoli, et al. Application of GNSS in the Study of Earth Surface Processes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2159-2180.

[6] GAZEAUX J, WILLIAMS S, KING M, et al. Detecting Offsets in GPS Time Series: First Results from the Detection of Offsets in GPS Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(5): 2397-2407.

[7] ZHANG J, BOCK Y, JOHNSON H, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error Analysis of Daily Position Estimates and Site Velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 18035-18055.

[8] 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.
JIANG Weiping, WANG Kaihua, LI Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123.

[9] AGNEW D C. The Time-Domain Behavior of Power-Law Noises[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(4): 333-336.

[10] MAO A L, HARRISON C G A, DIXON T H. Noise in GPS Coordinate Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B2): 2797-2816.

[11] WILLIAMS S D P, BOCK Y, FANG P, et al. Error Analysis of Continuous GPS Position Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B3): 2003JB002741.

[12] 黄立人, 符养. GPS连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报, 2007, 29(2): 197-202.
HUANG Liren, FU Yang. Analysis on the Noises from Continuously Monitoring GPS Sites[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(2): 197-202.

[13] LANGBEIN J. Noise in GPS Displacement Measurements from Southern California and Southern Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5): 2007JB005247.

[14] 包智. 数据驱动的高精度GNSS基准站非线性运动建模[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
BAO Zhi. Data-Driven Non-Linear Motion Modelling of High-Precision GNSS Reference Stations[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[15] HE Y F, NIE G G, WU S G, et al. Analysis and Discussion on the Optimal Noise Model of Global GNSS Long-Term Coordinate Series Considering Hydrological Loading[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 431.

[16] 丁开华, 丁剑, 李志才, 等. 川滇地区陆态网络基准站运动噪声模型分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(12): 56-60.
DING Kaihua, DING Jian, LI Zhicai, et al. Analysis on Noise Model of GNSS Base Station from CMONOC in Sichuan-Yunnan Region[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(12): 56-60.

[17] HU S Q, CHEN K J, ZHU H, et al. Potential Contributors to CME and Optimal Noise Model Analysis in the Chinese Region Based on Different HYDL Models[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 945.

[18] REPLUMAZ A, TAPPONNIER P. Reconstruction of the Deformed Collision Zone Between India and Asia by Backward Motion of Lithospheric Blocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B6): 2001JB000661.

[19] SHI C, LI M, ZHAO Q, et al. WHU Analysis Center Technical Report 2015 [R]. IGS Center Bureau, Bern, Switzerland , 2015.

[20] REICHLE R H, DRAPER C S, LIU Q, et al. Assessment of MERRA-2 Land Surface Hydrology Estimates[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(8): 2937-2960.

[21] GELARO R, MCCARTY W, SUÁREZ M J, et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.

[22] DOBSLAW H, THOMAS M. Simulation and Observation of Global Ocean Mass Anomalies [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C5): 2006JC004035.

[23] MONTILLET J P, MELBOURNE T I, SZELIGA W M. GPS Vertical Land Motion Corrections to Sea-Level Rise Estimates in the Pacific Northwest[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(2): 1196-1212.

[24] WU S G, NIE G G, MENG X L, et al. Comparative Analysis of the Effect of the Loading Series from GFZ and EOST on Long-Term GPS Height Time Series[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2822.

[25] HE X, BOS M S, MONTILLET J P, et al. Investigation of the Noise Properties at Low Frequencies in Long GNSS Time Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1271-1282.

[26] GU Y C, YUAN L G, FAN D M, et al. Seasonal Crustal Vertical Deformation Induced by Environmental Mass Loading in Mainland China Derived from GPS, GRACE and Surface Loading Models [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(1): 88-102.

[27] 赵宁坤, 孙俊奎, 尤卫红, 等. 云南省雨季降水量变化的区域特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2009, 31(6): 592-599.
ZHAO Ningkun, SUN Junkui, YOU Weihong, et al. Regional Characteristics of the Rainy Season Precipitation in Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University* (*Natural Sciences Edition*), 2009, 31(6): 592-599.

[28] BOS M S, FERNANDES R M S, WILLIAMS S D P, et al. Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 351-360.

[29] WU S G, NIE G G, LIU J N, et al. Analysis of Deterministic and Stochastic Models of GPS Stations in the Crustal Movement Observation Network of China[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(2): 335-351.