引文格式:黄扬金,常国宾,宦越洋.长期GNSS坐标序列有色噪声建模及其影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):955-964.DOI:10.13203/j.whugis20240149

Citation:HUANG Yangjin,CHANG Guobin,HUAN Yueyang.Modeling of Colored Noise in Long-Term GNSS Coordinate Series and Impact[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(5): 955-964. DOI: 10.13203/j. whugis20240149

长期GNSS坐标序列有色噪声建模及其影响

黄扬金[1] 常国宾[1] 宦越洋[1]

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

摘 要:全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)坐标序列数据中包含的有色噪声对GNSS坐标序列模型分析、特别是速度分析具有重要价值。已有研究主要关注10~15 a的中短期坐标序列的有色噪声建模,较少关注坐标序列经过长期积累后对有色噪声建模的变化。针对近30年来美国加州地区26个国际GNSS服务基准站的78个坐标序列,运用极大似然估计法进行噪声模型参数估计,比较了8种常用的噪声模型,包括白噪声(white noise,WN)、闪烁噪声、幂律噪声(powerlaw noise, PL)、随机漫步噪声(random walk noise, RWN)、广义高斯-马尔可夫噪声,并采用赤池信息量准则进行优选。实验结果表明,在东(E)、北(N)和天(U)方向上,以WN+PL+RWN为最优模型的比例分别为42.3%、61.5%和57.7%,以WN+PL为对照模型进行速度不确定度(标准差)估计,发现最优模型的速度不确定度平均值在E、N和U方向上分别是对照模型的5.0倍、5.2倍和4.0倍。研究表明,采用不同的噪声模型时速度不确定度参数的估计结果相差较大,为合理、客观地表征速度估计的不确定性,建议在实际应用中进行精细的有色噪声建模分析;16 a以上GNSS坐标序列大多具备探测RWN的潜力,不含RWN的模型对速度不确定度存在较明显的精度高估现象,因此在长期的GNSS坐标序列数据中,RWN的影响不容忽视。

关键词:长期GNSS坐标序列;有色噪声;极大似然估计;赤池信息量准则;速度不确定度

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-28

DOI:10.13203/j.whugis20240149 **文章编号**:1671-8860(2026)05-0955-10

Modeling of Colored Noise in Long-Term GNSS Coordinate Series and Impact

HUANG Yangjin[1] *CHANG Guobin*[1] *HUAN Yueyang*[1]

1 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Ming and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: **Objectives**: The presence of colored noise in global navigation satellite system (GNSS) coordinate time series data holds significant value for the analysis of GNSS coordinate models, particularly in velocity analysis. In the previous studies, the researchers focused on modeling colored noise in the short to medium-term coordinate series of 10-15 years, paying less attention to the variation of long-term accumulation of coordinate series on colored noise modeling. **Methods**: Therefore, we investigated 78 coordinate series from 26 international GNSS service (IGS) stations in California, USA, over a period of nearly 30 years. We employed the maximum likelihood estimation method to estimate the parameters of noise models, comparing eight commonly-used models including white noise (WN), flicker noise, power-law noise (PL), random walk noise (RWN), and generalized Gauss-Markov noise. And Akaike information criterion is applied to select the optimal model among the alternative models. **Results**: The results indicate that among the selected IGS reference stations, 42.3% of the series exhibit WN+PL+RWN as the optimal model in the east (E) direction, while this proportion is 61.5% and 57.7% in the north (N) direction and up (U) direction, respectively. Then the velocity uncertainty (standard deviation) estimation is performed between the optimal model and the control model of WN+PL. We find that the average velocity uncertain-

基金项目:国家自然科学基金(42074001);中国矿业大学研究生创新计划(2024WLJCRCZL244)。

第一作者:黄扬金,硕士,研究方向为GNSS坐标序列处理技术。huangyangjin.01@foxmail.com

通信作者:常国宾,博士,教授。guobinchang@hotmail.com

ty of the preferred model is 5.0 times higher than the control model in the E direction, 5.2 times higher in the N direction, and 4.0 times higher in the U direction. **Conclusions**: This paper demonstrates that the choice of noise models has a significant impact on the estimation of velocity uncertainty parameters, and the results vary apparently when different noise models are used. In order to accurately and objectively represent the uncertainty of velocity estimates, it is advisable to carry out meticulous analysis of colored noise modeling in practical applications. Additionally, most of GNSS coordinate series with a duration of over 16 years have the potential to detect RWN, and the models without RWN tend to significantly overestimate velocity uncertainty. Hence, the impact of RWN in long-term GNSS coordinate series data cannot be disregarded.

Key words: long-term GNSS coordinate series; colored noise; maximum likelihood estimation; Akaike information criterion; velocity uncertainty

全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)坐标序列对维持国际地球参考框架、监测地壳运动、地质灾害监测与预警、重特大工程安全性评价等科学研究和实际应用具有重大价值[1-4]。在GNSS坐标序列分析中,采用不同的噪声模型将显著影响相关参数的估计,尤其是使用不恰当的噪声模型会导致速度不确定度被低估[5-6],即速度估计的实际精度低于其名义精度。精度评定的一致性要求名义精度能够客观反映实际精度,在实际应用中这一要求往往难以满足,退而求其次并考虑质量控制因素,在高估精度和低估精度两者中应倾向于选择后者,即在不同噪声模型计算的测站速度接近的情况下,倾向于选择速度不确定度更大的模型[5]。

近年来,GNSS坐标序列噪声建模研究得到了广泛的关注,主要包括白噪声(white noise,WN)、闪烁噪声(flicker noise,FN)、幂律噪声(powerlaw noise,PL)、随机漫步噪声(random walk noise,RWN)、广义高斯-马尔可夫噪声(generalized Guass-Markov noise,GGM)。学者们发现,使用传统的WN模型会造成非常严重的速度估计精度高估问题,当采用更合理的有色模型时,速度估计标准差是采用WN模型时的5~11倍[7-8],由此开始进行GNSS坐标序列有色噪声建模研究。文献[9]研究了两次地震期间国际GNSS服务(international GNSS service,IGS)站点的位置序列,发现WN+FN组合模型可以拟合该数据,且速度不确定度比WN模型大3~6倍;文献[10]对分布在全球各处的23个测站GNSS坐标序列摘取其中3年进行分析,发现WN+FN组合模型是其GNSS坐标序列噪声符合效果最好的模型;文献[11]对美国内华达州南部和加利福尼亚州的236个GNSS测站进行极大似然分析,发现不同地区的最优噪声模型存在差异性,并不都是某个特定的噪声模型;文献[12]将参考坐标系替换为2000国家大地坐标系,对2001—2010年的国家连续运行参考站网坐标序列进行噪声分析,结果表明,进行滤波处理后,坐标序列的噪声特性主要表现为WN+FN+RWN组合模型,且单独使用WN模型会导致速度不确定度低估2~6倍;文献[13]对中国地壳运动研究的相关观测网络进行噪声分析,发现除WN+FN组合模型外,有近半数测站在东(E)方向的噪声特性可表示为RWN+GGM组合模型;文献[14]分析了中国的IGS基准站点的GNSS坐标序列,发现中国不同地区的IGS基准站噪声不都是呈现出同种噪声特性,而统计结果表明,WN+FN和WN+PL两种组合模型能较好地描述GNSS噪声。综上可知,GNSS坐标序列的实际噪声特性较为复杂,且与之相适应的噪声模型种类并不单一,噪声模型的优选工作对于研究GNSS坐标序列噪声具有重要意义。

在以往的GNSS坐标序列噪声建模与模型优选工作中,学者们多专注于10~15 a的中短期坐标序列,而较少关注随时间积累形成的长期序列对于GNSS坐标序列噪声带来的影响[15]。文献[16]指出有些大地测量数据中可能含有RWN,且这种噪声对结果的影响不可忽略,并在WN+FN模型的基础上提出采用WN+FN+RWN组合模型,但是因序列跨度较短而难以准确探测RWN;文献[17]模拟了长度为18 a的GNSS坐标序列,并采用WN+FN组合噪声模型进行参数估计,验证了测站噪声特性随时间变化;文献[18]发现随着时间序列持续观测时间的增加,通常使用的WN+FN模型可能需要改进,因为更长的时间序列可能会揭示其他随机变化的低频特征,并给出WN+FN+RWN和WN+GGM两种方案。由此可见,如今GNSS观测已经持续相当长的时间,有必要重新审视噪声建模问题,特别是长期GNSS坐标序列RWN探测及

RWN的存在对速度参数估计的影响。

本文将8种具有代表性的噪声模型作为备选模型，选择了时长近30 a的78组GNSS坐标序列进行分析，采用极大似然法估计噪声模型参数，并根据赤池信息量准则（Akaike information criterion，AIC）进行模型优选，发现长期GNSS坐标序列大部分可以检测出RWN，并且RWN的存在与否对速度不确定度的估计有着较大的影响。

1　方法与数据

1.1　模型参数求解

建立GNSS坐标序列噪声模型最常采用且精度最高的方法是极大似然估计[6,19]，该方法中模型参数的最优估计应使似然函数L取得极大值，计算式为：

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

式中，$\hat{\boldsymbol{v}}$为单日解坐标序列中噪声振幅向量拟合后的残差；$\boldsymbol{C}_x$为残差值对应的协方差矩阵；N为观测值坐标序列长度（单位为d）；det表示矩阵的行列式[14]。通过调整协方差矩阵的方差分量，使得极大似然估计（maximum likelihood estimation，MLE）取得最大值，此时对应的噪声模型就是最优噪声模型[20-21]。式（1）中似然函数的极大化等价于负对数似然函数的极小化，计算式为：

$$\begin{aligned}-2\ln\left[L(\hat{\boldsymbol{v}},\boldsymbol{C}_x)\right]&=\ln(\det\boldsymbol{C}_x)+\hat{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_x^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}+\\&N\ln 2\pi\propto\ln(\det\boldsymbol{C}_x)+\hat{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_x^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}\end{aligned} \tag{2}$$

1.2　模型性能评价准则

为获得更加可靠的估计结果，本文采用AIC作为评价准则对MLE的噪声模型进行优选[22]。该准则在GNSS坐标序列最优噪声模型选择中已被多次成功应用[23-24]。该方法通过不同噪声模型或其组合模型的AIC值判断模型的优劣，其一般表示为：

$$\mathrm{AIC}=-2\ln L+2k \tag{3}$$

式中，k为噪声模型的变量个数，即惩罚项。惩罚项可以在建模中避免出现过拟合现象。根据模型选择理论，AIC值越小，模型性能越优，由此，备选模型中AIC值最小的为最优模型。

1.3　实验数据与备选模型

本文实验数据来源于美国内华达大学大地测量实验室（Nevada Geodetic Laboratory，NGL）解算的GNSS坐标序列产品，仅选取了位于美国加利福尼亚州的26个IGS测站的坐标序列进行分析，测站与6级以上地震中心分布如图1所示，测站观测持续时间和数据缺失比率如图2所示。

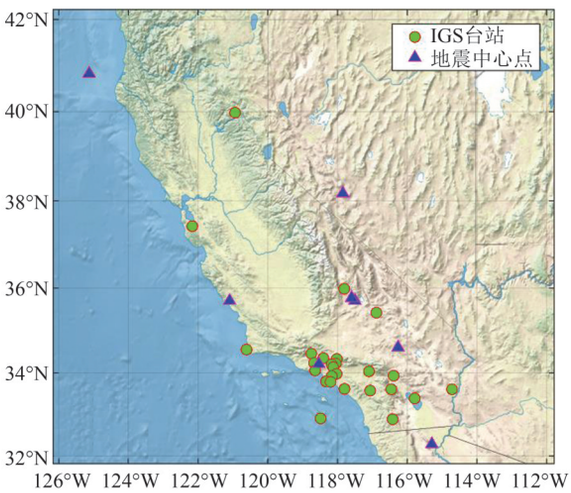


图1　美国加州IGS基准站与6级以上地震中心点分布

Fig. 1　Distribution of IGS Stations and Seismic Centers Above M 6 in California, USA

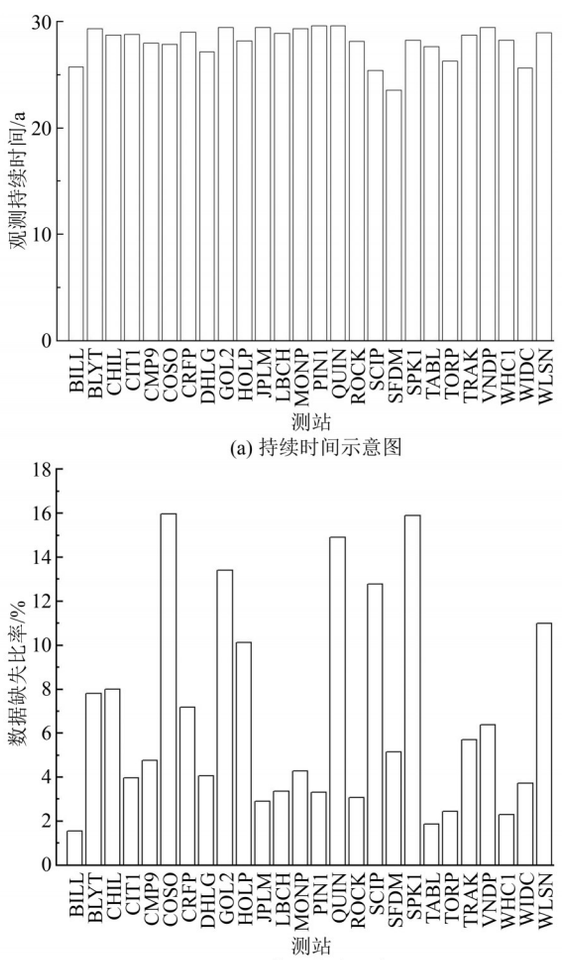


图2　26个IGS测站的观测持续时间和数据缺失比率

Fig. 2　Observation Duration and Observation Data Loss Ratio of the Selected 26 IGS Stations in California, USA

由图2(a)可以看出,大部分测站的连续观测时间都超过25 a。已有研究发现,在连续观测时间超过15 a的GNSS坐标序列中有更大的概率检测出低频率、长周期噪声,如RWN[16,24]。相较于以往研究,本文大部分测站的观测连续性较好,出现数据缺失的情况较少,更利于开展噪声分析(图2(b))。本文采用Hector[25]软件进行GNSS坐标序列的噪声分析和参数估计,基于MLE原理为测站速度相关参数估计提供可靠的参考,针对有数据缺失的GNSS台站坐标时间序列也能进行无偏噪声估计。实验选取了FN、PL、GGM、WN+FN、WN+PL、WN+GGM、WN+FN+RWN和WN+PL+RWN共8种噪声模型,它们在以往研究中曾被作为描述GNSS坐标序列中有色噪声的最优模型[10-14,18]。

2 结果和讨论

2.1 最优噪声模型讨论

Hector软件在进行噪声模型分析时可以自动探测序列中存在的阶跃,所选26个IGS站经历多次地震和设备更换,剔除粗差后进行噪声模型优选,结果见表1。各个备选模型的优选结果占比如图3所示。由图3可以看出,所选的26个IGS测站的最优噪声模型种类丰富,其中WN+PL+RWN模型的占比最大,在E方向占比达到42.3%,N方向和U方向占比分别为61.5%和57.7%;其次是WN+FN+RWN模型和WN+FN模型,在所有方向中平均占比分别为24.3%和14.1%;其他模型在最优模型中的占比则均未达到5%。在所有备选模型中,WN+PL+RWN模型相较于其他模型被优选的比例高得多,说明该噪声组合模型对加利福尼亚州地区的IGS站观测噪声符合效果更好;并且被优选时该模型AIC值与其他模型间存在较为显著的差异。

表1 所选26个测站的最优噪声模型评选结果

Table 1 Optimal Noise Model of the Selected IGS Stations in California, USA

备选模型	方向	最优模型数量	测站分量名称
WN+PL+RWN	E	11	BILL、COSO、DHLG、GOL2、LBCH、MONP、QUIN、SCIP、VNDP、WIDC、WLSN
	N	16	BILL、BLYT、CHIL、COSO、CRFP、HOLP、LBCH、MONP、PIN1、QUIN、ROCK、SFDM、SPK1、TABL、VNDP、WIDC
	U	15	BILL、BLYT、CHIL、CIT1、COSO、CRFP、GOL2、HOLP、MONP、PIN1、QUIN、SPK1、TABL、WHC1、WIDC
WN+FN+RWN	E	7	BLYT、CMP9、HOLP、ROCK、TORP、TRAK、WHC1
	N	7	DHLG、GOL2、JPLM、TORP、TRAK、WHC1、WLSN
	U	5	DHLG、LBCH、ROCK、SFDM、TORP
WN+FN	E	6	CHIL、CRFP、PIN1、SFDM、SPK1、TABL
	N	1	SCIP
	U	4	JPLM、SCIP、TRAK、WLSN
WN+PL	E	0	—
	N	1	CMP9
	U	1	CMP9
WN+GGM	E	1	JPLM
	N	1	CIT1
	U	0	—
PL	E	1	CIT1
	N	0	—
	U	1	VNDP

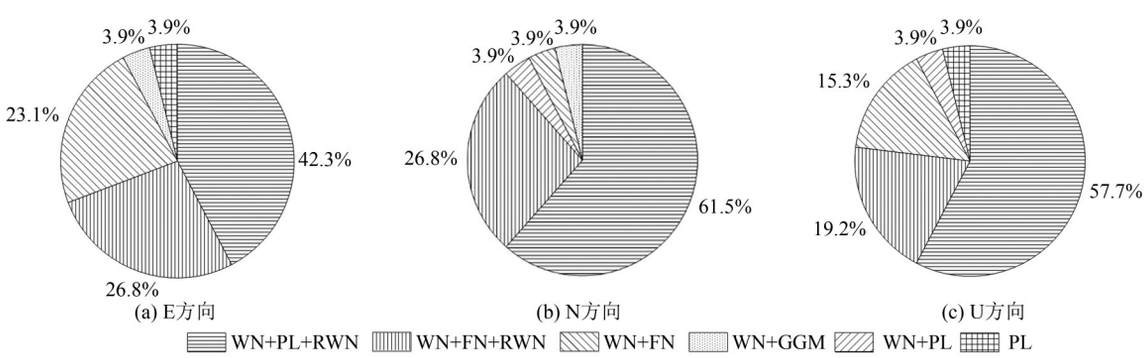


图3 在AIC准则下的最优噪声模型分布

Fig. 3 Distribution of the Optimal Noise Model Under AIC

以WN+PL模型为对照组,将两者的AIC值进行比较,得到部分测站在E、N、U 3个方向的AIC差值,结果如图4所示。根据MLE原理,该结果表明其性能较明显地优于其他模型,因此合理地认为所选测站的最优噪声模型是WN+PL+RWN模型。

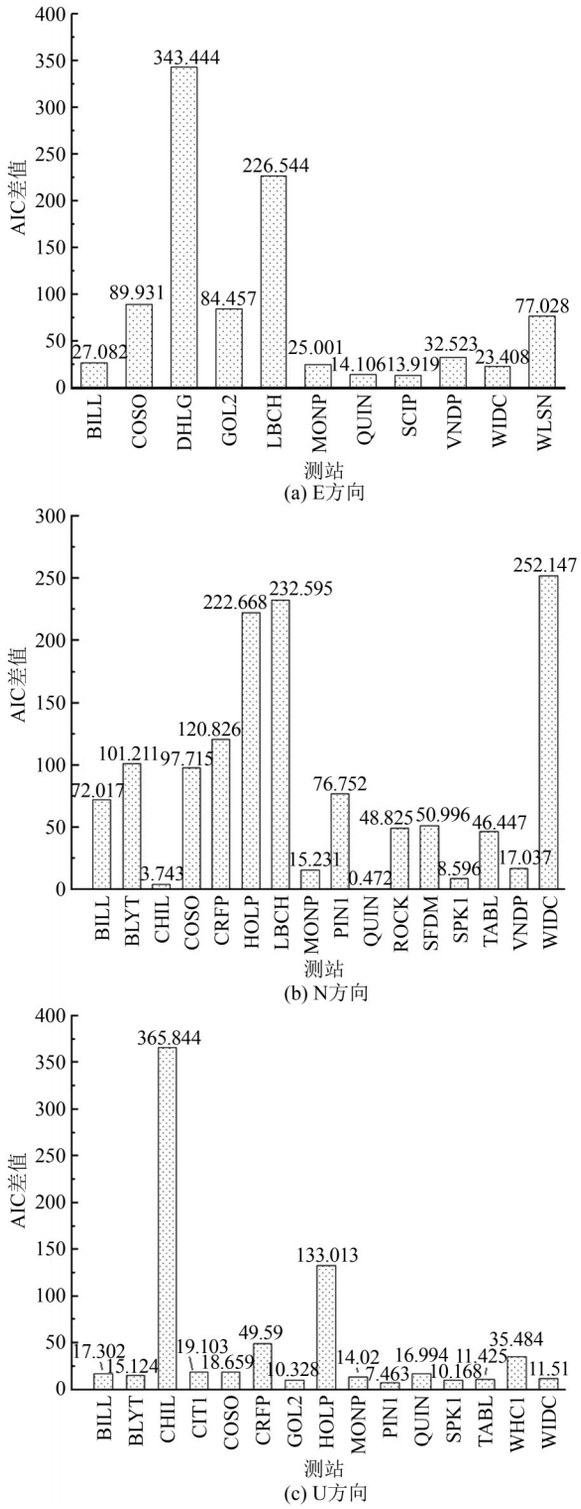


图4　WN+PL+RWN模型与WN+PL模型的AIC差值

Fig. 4　AIC Differences Between WN+PL+RWN Model and WN+PL Model

值得注意的是,在所有测站分量的最优噪声模型评选结果中,WN+PL+RWN和WN+FN+RWN这两个包含RWN的组合模型在E、N、U 3个方向被优选的占比之和分别达到69.1%、88.3%、76.9%,说明实验的GNSS坐标序列中大多数都可以探测出RWN。为探究考虑RWN的GNSS坐标序列需要的累积观测长度,将26个测站的原始坐标序列进行截断,获得4~20 a的截断序列。受限于文章篇幅,本文仅对E方向进行模型优选,结果见表2。由表2可以看出,在观测长度为16 a、20 a的序列中,RWN更容易被检测出来,且含RWN的模型被优选的概率相较于更短年限序列有大幅度的提升,因此认为16 a以上的时间序列需要充分考虑RWN的影响。实验结果说明了上文所提推测的合理性,即在更长时间跨度的GNSS坐标序列中大多存在着RWN噪声成分,这与文献[16]和文献[18]的发现也相吻合。在研究16 a以上长期GNSS坐标序列噪声特性的工作中,可能需要充分考虑RWN的存在性,并将其作为重要组分纳入要建立的噪声估计模型中。本文实验选择的测站数量有限,以上结论仍需大量实验验证。

表2　不同长度GNSS坐标序列模型优选结果

Table 2　Model Selection Results for Different Lengths of GNSS Coordinate Series

时间序列长度/a	观测起止时间	最优噪声模型	最优噪声模型占比/%	含RWN模型优选占比/%
4	2019-01-01—2023-01-01	WN+FN	42.3	11.5
8	2012-01-01—2020-01-01	WN+GGM	38.4	11.5
12	2008-01-01—2020-01-01	WN+FN	50.0	19.2
16	2001-01-01—2017-01-01	WN+FN+RWN	57.7	73.1
20	1997-01-01—2017-01-01	WN+FN+RWN	53.8	80.8

2.2　噪声模型对速度估计的影响

速度相关参数是GNSS坐标序列噪声的研究中的重要参数,采用不同的噪声模型描述GNSS坐标序列噪声可能对该参数的估计产生影响。本文关注了美国加利福尼亚州78个测站分量的最优噪声模型WN+PL+RWN和对照模型WN+PL,这两个模型估计的测站速度如图5所示。由图5可以看出,最优噪声模型和对照模型所得的测站速度估计值基本一致。

为了保证测站速度的精确度、防止出现精度过高估计,本文认为,在测站速度接近时,测站速度的精度指标,即速度不确定度应该得到更大程度的重视,由此可以认为,速度不确定度更大的

模型更稳健、更优秀。对比最优噪声模型WN+PL+RWN和对照模型WN+PL,所选26个测站的各方向分量的速度不确定度(标准差)的绝对值如图6所示。由图6可以看出,在3个方向上,最优噪声模型在各测站的速度不确定度的绝对值都普遍显著高于对照模型。

统计各个方向上最优噪声模型和对照模型速度不确定度倍差,结果如图7所示。由图7可以看出,最优噪声模型的速度不确定度平均值在E方向上是对照模型的5.0倍,在N方向和U方

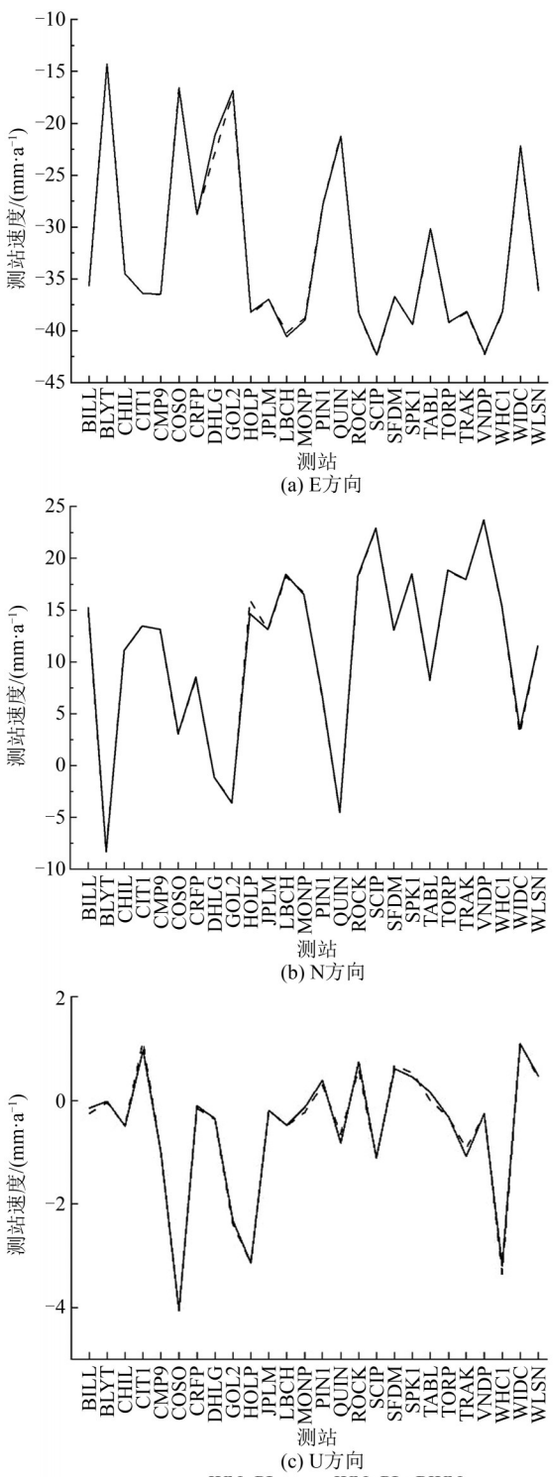


图5 WN+PL+RWN和WN+PL模型在各测站3个方向的速度

Fig. 5 Velocity of WN+PL+RWN Model and WN+PL Model in Different Directions at the Selected Stations

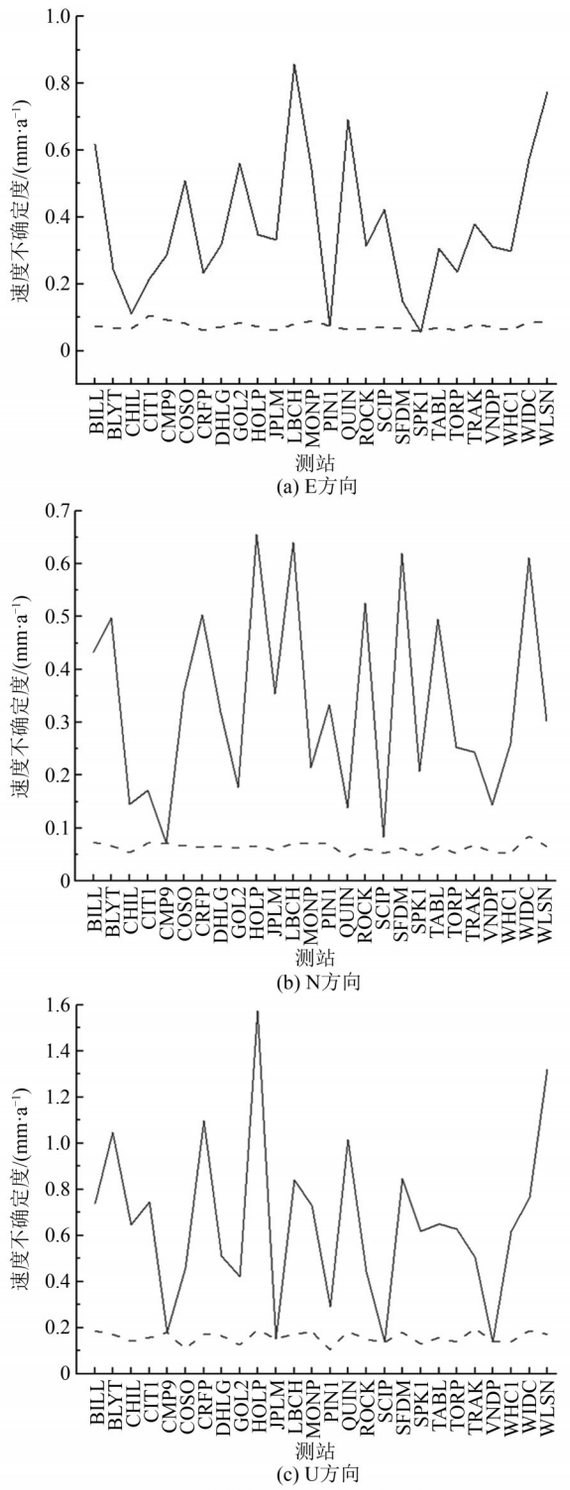


图6 WN+PL+RWN模型和WN+PL模型在各测站3个方向的速度不确定度

Fig. 6 Velocity Uncertainties of WN+PL+RWN Model and WN+PL Model in Different Directions at the Selected Stations

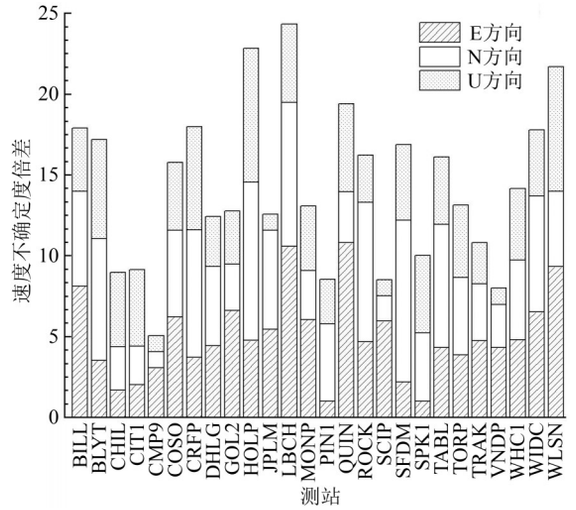


图7　WN＋PL＋RWN模型与WN＋PL模型在各测站的速度不确定度倍差

Fig. 7　Multiplier of Velocity Uncertainties of WN＋PL＋RWN Model and WN＋PL Model at the Selected Stations

向上分别是5.2倍和4.0倍。结果表明,最优噪声模型WN＋PL＋RWN对速度参数的估计相较对照模型WN＋PL保守稳重得多,由此可以认为最优噪声模型的性能更优秀。

值得注意的是,实验中存在最优模型和对照模型的速度不确定度相等的测站分量,在E方向上是PIN1和SPK1测站,在N方向上是CMP9测站,在U方向上是CMP9、SCIP和VNDP测站,具体情况见表3。由表3可以看出,在出现上述情况的测站分量中,最优噪声模型的RWN成分占比为0,即未检测出RWN,此时WN＋PL＋RWN实质上与WN＋PL为同一种模型。因此RWN成分的存在使最优噪声模型的速度不确定度显著性增大,若在速度提取时未考虑该成分,可能会导致速度精度出现较明显的高估现象。

对WN＋FN＋RWN和WN＋FN模型进行速度不确定度比较,结果如图8所示。这也印证了忽略RWN将使测站速度精度过于乐观的设想:在长期GNSS坐标序列噪声研究中,对RWN噪声的存在应有足够的重视,否则将产生较严重的速度不确定度精度高估。

表3　最优模型与对照模型速度不确定度相等的测站模型噪声成分构成

Table 3　Noise Components of Stations with Equal Velocity Uncertainties of Optimal Model and Reference Model

测站	方向	对照模型噪声构成/%		最优噪声模型噪声构成/%		
		WN	PL	WN	PL	RWN
CMP9	N	45.860	54.140	45.860	54.140	0
	U	33.847	66.153	33.847	66.153	0
PIN1	E	66.036	33.964	66.036	33.964	0
SCIP	U	58.373	41.627	58.371	41.629	0
SPK1	E	43.692	56.308	43.691	56.309	0
VNDP	N	0	100	0.026	99.974	0
	U	0	100	0	100	0

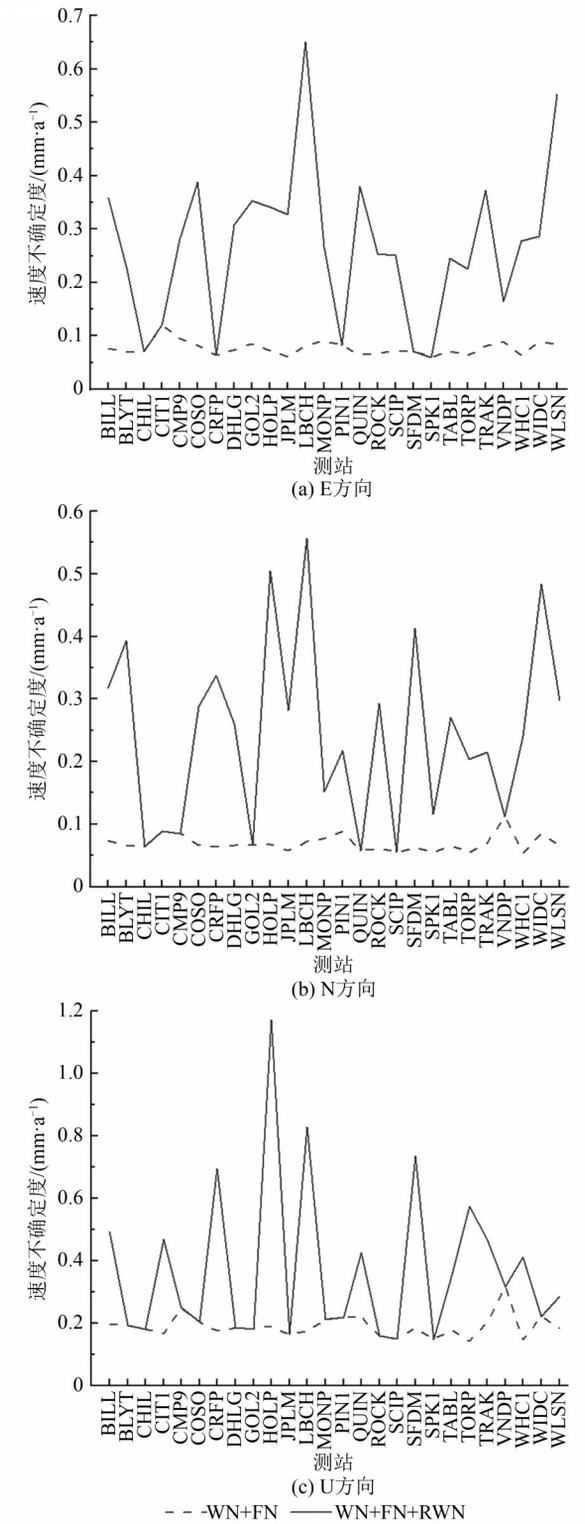


图8　WN＋FN＋RWN模型和WN＋FN模型在各测站3个方向的速度不确定度

Fig. 8　Velocity Uncertainties of WN＋FN＋RWN Model and WN＋FN Model in Different Directions at the Selected Stations

2.3 不同机构产品对有色噪声的影响

不同机构采用不同解算软件得到的GNSS时间序列结果往往存在差别[26]。本文使用的NGL产品采用无电离层载波相位和伪距数据进行精密单点定位,以IGS14为参考框架,使用GIPSY/OASIS-Ⅱ软件分析来自全球17 000多个GPS站的数据,使用有限元海洋潮汐模型进行海潮校正,使用全球映射函数和随机漫步参数进行大气校正,并采用大陆尺度空间滤波器分离空间共模误差[27],在进行参考系对齐时消除了比例差异,得到GNSS坐标序列最终解。该中心保持对序列的更新,可以从其网站获得最新的数据。

为了分析不同处理策略、不同处理软件对GNSS时序产品中有色噪声的影响,本文基于NGL、华盛顿中心大学(Central Washington University,CWU)、新墨西哥矿业及理工学院(New Mexico Institute of Mining and Technology,NMT)、板块边界观测站(Plate Boundary Observatory,PBO)4个分析中心的时间序列产品进行了对比分析,各机构解算方案概况见表4。

表4 各分析中心的时间序列解决方案

Table 4 Time Series Solutions of Four Analysis Centers

机构	参考框架	解算软件	尺度差异	解质量
NGL	IGS14/NA12	GIPSY/OASIS-Ⅱ	消除	最终解
CWU	IGS14/NAM08	GIPSY/OASIS	未消除	重处理解
NMT	IGS14/NAM08	GAMIT/GLOBK	未消除	最终解
PBO	IGS14/NAM08	CWU/NMT组合方案	未消除	重处理解

本文仅挑选了BILL和TABL两个台站的数据进行验证分析,噪声模型优选和速度不确定度估计的结果见表5。由表5可以看出,基于不同机构的数据估算的测站速度差异较小,但速度不确定度的估计结果有时候相差较大,此现象反映出GNSS坐标时序的有色噪声来自数据解算阶段,厘清其准确的起因尚需在后续的工作中开展更深入的分析。

表5 各分析中心不同解算软件得到的时间序列结果比较

Table 5 Comparison of Time Series Calculated by Different Solving Softwares of Four Analysis Centers

机构	测站	方向	最优噪声模型	测站速度/(mm·a^{-1})	速度不确定度/(mm·a^{-1})
NGL	BILL	E	WN+PL+RWN	−35.550	0.617
		N	WN+PL+RWN	15.256	0.433
		U	WN+PL+RWN	−0.253	0.738
	TABL	E	WN+PL+RWN	−30.153	0.307
		N	WN+PL+RWN	8.341	0.495
		U	WN+PL+RWN	0.157	0.652
CWU	BILL	E	WN+PL+RWN	−35.503	0.133
		N	WN+PL+RWN	14.976	0.353
		U	WN+PL+RWN	−0.555	0.338
	TABL	E	WN+PL+RWN	−30.224	0.307
		N	WN+PL+RWN	8.329	0.349
		U	WN+PL+RWN	−0.206	0.311
NMT	BILL	E	WN+FN+RWN	−35.970	0.118
		N	WN+PL+RWN	14.981	0.342
		U	WN +PL	−0.148	0.323
	TABL	E	WN+PL+RWN	−30.196	0.248
		N	WN+PL+RWN	8.192	0.292
		U	WN+PL+RWN	0.430	1.305
PBO	BILL	E	WN+FN+RWN	−35.641	0.155
		N	WN+PL+RWN	14.843	0.295
		U	PL	−0.476	0.175
	TABL	E	WN+PL+RWN	−30.591	0.328
		N	WN+PL+RWN	7.771	0.347
		U	PL	0.362	0.155

3　结　语

本文对美国加利福尼亚州区域26个IGS测站的78个长期坐标序列进行了噪声建模与模型优选工作，发现长期坐标序列呈现出与中短期坐标序列不同的噪声特性，优选出最优噪声模型后，研究其与对照模型在速度估计上的性能差异，得到以下结论：

1)本文以AIC评选最优噪声模型，选取了观测时间跨度更长的GNSS坐标序列，各测站分量的最优噪声模型中WN＋PL＋RWN模型和WN＋FN＋RWN模型占据大多数。说明随着坐标序列长度的积累，在超过16 a的长期坐标序列中随机变化的长周期低频噪声RWN更容易被探测出来，这也验证了文献[18]的设想。

2)不考虑RWN的模型在进行速度参数估计时存在较明显的速度不确定度高估。对最优噪声模型WN＋PL＋RWN和对照模型WN＋PL进行速度不确定估计，发现最优噪声模型的速度不确定度绝对值显著高于对照模型，平均可达到对照模型的4～5倍。不含RWN的模型对速度精度过于乐观，在分析长期GNSS坐标序列的速度参数时，应考虑RWN的影响。

参　考　文　献

[1] 何月帆，聂桂根，武曙光，等. ITRF2014框架下顾及降雨量与水文负载的CMONOC坐标时间序列关系分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024，49(6)：960-969.
HE Yuefan，NIE Guigen，WU Shuguang，et al. Analysis of Relationship Between CMONOC Coordinate Time Series Considering Rainfall and Hydrological Loading Under ITRF2014 Framework[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2024，49(6)：960-969.

[2] 范峥研，姚宜斌，张豹. 格陵兰GNSS测站坐标时间序列噪声分析[J]. 测绘地理信息，2024，49(1)：42-49.
FAN Zhengyan，YAO Yibin，ZHANG Bao. Noise Analysis of Coordinate Time Series of Greenland GNSS Station[J]. *Journal of Geomatics*，2024，49(1)：42-49.

[3] 胡顺强. GNSS坐标时序分析及其在青藏高原东南缘垂向构造变形和干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024，49(7)：1250.
HU Shunqiang. GNSS Coordinate Time Series Analysis and Application of Vertical Tectonic Deformation and Drought Monitoring to the Southeastern Qinghai Tibet Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2024，49(7)：1250.

[4] 吴明魁，尚霆锋，赵文祎，等. 基于EMD-iForest的GNSS变形监测时间序列粗差探测方法[J]. 测绘地理信息，2025，50(2)：67-72.
WU Mingkui，SHANG Tingfeng，ZHAO Wenyi，et al. The EMD-iForest Based Gross Error Detection Method for GNSS Deformation Monitoring Time Series[J]. *Journal of Geomatics*，2025，50(2)：67-72.

[5] LANGBEIN J. Estimating Rate Uncertainty with Maximum Likelihood：Differences Between Power-Law and Flicker-Random-Walk Models[J]. *Journal of Geodesy*，2012，86(9)：775-783.

[6] 田云锋. GPS位置时间序列中的中长期误差研究[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2011.
TIAN Yunfeng. Study on Intermediate- and Long-Term Errors in GPS Position Time Series[D]. Beijing：Institute of Geology，China Earthquake Administration，2011.

[7] HACKL M，MALSERVISI R，HUGENTOBLER U，et al. Estimation of Velocity Uncertainties from GPS Time Series：Examples from the Analysis of the South African TrigNet Network[J]. *Journal of Geophysical Research*：*Solid Earth*，2011，116：B11404.

[8] WANG W，ZHAO B，WANG Q，et al. Noise Analysis of Continuous GPS Coordinate Time Series for CMONOC[J]. *Advances in Space Research*，2012，49(5)：943-956.

[9] 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.

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

[12] 蒋志浩，张鹏，秘金钟，等. 顾及有色噪声影响的CGCS2000下我国CORS站速度估计[J]. 测绘学报，2010，39(4)：355-363.
JIANG Zhihao，ZHANG Peng，BEI Jinzhong，et al. Velocity Estimation on the Colored Noise Proper-

ties of CORS Network in China Based on the CGCS2000 Frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 355-363.

[13] 田云锋, 沈正康, 李鹏. 连续GPS观测中的相关噪声分析[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 696-704.
TIAN Yunfeng, SHEN Zhengkang, LI Peng. Analysis on Correlated Noise in Continuous GPS Observations[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(6): 696-704.

[14] 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.
LI Zhao, JIANG Weiping, LIU Hongfei. 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.

[15] 马俊, 姜卫平, 周晓慧, 等. 联合小波和方差分量估计方法分析中国IGS测站时间序列变化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(4): 629-636.
MA Jun, JIANG Weiping, ZHOU Xiaohui, et al. Coordinate Time Series of IGS Station in China Based on the Combination of Wavelet Spectral and Variance Component Estimation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 629-636.

[16] LANGBEIN J, JOHNSON H. Correlated Errors in Geodetic Time Series: Implications for Time-Dependent Deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B1): 591-603.

[17] 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.

[18] GOBRON K, REBISCHUNG P, DE VIRON O, et al. Impact of Offsets on Assessing the Low-Frequency Stochastic Properties of Geodetic Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(7): 46.

[19] TEHRANCHI R, MOGHTASED-AZAR K, SAFARI A. Fast Approximation Algorithm to Noise Components Estimation in Long-Term GPS Coordinate Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(2): 18.

[20] 姜卫平, 李昭, 刘鸿飞, 等. 中国区域IGS基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2228-2237.
JIANG Weiping, LI Zhao, LIU Hongfei, et al. Cause Analysis of the Non-Linear Variation of the IGS Reference Station Coordinate Time Series Inside China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7): 2228-2237.

[21] 鲁铁定, 何锦亮, 贺小星, 等. 参数优化变分模态分解的GNSS坐标时间序列降噪方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1856-1866.
LU Tieding, HE Jinliang, HE Xiaoxing, et al. GNSS Coordinate Time Series Denoising Method Based on Parameter-Optimized Variational Mode Decomposition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1856-1866.

[22] AKAIKE H. A New Look at the Statistical Model Identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.

[23] SANTAMARÍA-GÓMEZ A, BOUIN M N, COLLILIEUX X, et al. Correlated Errors in GPS Position Time Series: Implications for Velocity Estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1): B01405.

[24] 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.

[25] 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.

[26] LU R, LI Z, CHEN Q S, et al. On the Contributions of Refined Thermal Expansion Model to Nonlinear Variations in Different GNSS Height Time Series Products[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 80.

[27] BLEWITT G, KREEMER C, HAMMOND W C, et al. Terrestrial Reference Frame NA12 for Crustal Deformation Studies in North America[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72: 11-24.