总第47卷 第2期
2024年4月

时间频率学报
Journal of Time and Frequency

Vol.47 No.2
Apr., 2024

引用格式：裴雪艳, 张兴刚, 荆文芳. GNSS 对流层湿延迟随机游走过程噪声时空变化特征分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 139-152.

GNSS 对流层湿延迟随机游走过程噪声时空变化特征分析

裴雪艳[1,2]，张兴刚[1]，荆文芳[1†]

1. 中国科学院 国家授时中心，西安 710600；
2. 中国科学院大学，北京 100049

摘要：全球导航卫星系统 GNSS 对流层天顶湿延迟(zenith wet delay，ZWD)随机噪声不仅影响 ZWD 估计值大小，还会影响 ZWD 的趋势项变化。为揭示 ZWD 随机游走过程噪声(random walk process noise，RWPN)的时空变化特征，本文选取全球 20 个 IGS(International GNSS Service)测站，基于 JPL(Jet Propulsion Laboratory)、GFZ(Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences)和 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)分析中心 2010 至 2020 年对流层产品，从不同地理位置和不同时间序列分析 GNSS ZWD 随机游走过程噪声的变化范围和特征；并且在扣除 ZWD 的趋势项和主要周期项后，进一步揭示了 ZWD 残差信号分量构成。结果表明：不同地理位置湿延迟 RWPN 具有显著差异，年均值范围在 0.01~0.146 mm/$\sqrt{s}$ 之间，且在大气集中的中低纬地区湿延迟 RWPN 值较大，在大气相对稀薄的极地地区其值较小；同一测站的湿延迟 RWPN 具有明显的周年、半周年和季节性特征，极差值高达 0.12 mm/$\sqrt{s}$ 以上；通过对 ZWD 残差值分析，发现 ZWD 残差信号除包含白噪声外，还具有 4.8 h 至 2.43 d 的高频信号分量。

关键词：对流层；全球导航卫星系统；湿延迟；随机游走过程噪声；时空变化；数值天气模型
DOI：10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0139-14

Analysis of spatiotemporal variation characteristics for GNSS tropospheric wet delay random walk process noise

PEI Xue-yan[1,2], ZHANG Xing-gang[1], JING Wen-fang[1†]

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The random noise of GNSS tropospheric zenith wet delay (ZWD) not only affects the estimated value of ZWD, but also affects the change of the trend item of ZWD. In order to reveal the temporal and spatial variation characteristics of ZWD random walk process noise (RWPN), this paper selects 20 IGS (International

收稿日期：2023-04-16；接受日期：2023-05-18；†：jingwenf@126.com
基金项目：国家自然科学基金（E00ZK1701）

GNSS Service) stations and used the tropospheric products of JPL, GFZ and CODE analysis center from 2010 to 2020 to analyze the range and characteristics of noise in the GNSS ZWD random walk process from different geographical locations and different time series; and after deducting the ZWD trend item and the main period item, the composition of the ZWD residual signal component is further revealed. The results show that there are significant differences in the wet delay RWPN in different geographic locations, with the annual average value ranging from 0.01 to 0.146 mm/$\sqrt{s}$, and the wet delay RWPN value is larger in the middle and low latitudes where the atmosphere is concentrated, and in the polar regions where the atmosphere is relatively thin, its value is small; the wet delay RWPN at the same station has obvious annual, semi-annual and seasonal characteristics, and the range value is as high as 0.12 mm/$\sqrt{s}$ or more; through the analysis of the ZWD residual value, it is found that the ZWD residual signal not only includes the white noise, there are also high-frequency signal components from 4.8 hours to 2.43 days.

Key words: troposphere; global navigation satellite system (GNSS); wet delay; random walk process noise (RWPN); time and space change; numerical weather model (NWM)

对流层是地面开始延伸至约 50 km 的大气层，信号在穿过其中时受到不均匀介质的影响会发生传播路径以及传播方向的改变，即对流层延迟[1]。对流层延迟是 GNSS（global navigation satellite system）精确定位的误差源之一，在天顶方向上延迟量可以达到 1.9~2.5 m[2]。根据成因不同，对流层延迟（zenith total delay，ZTD）通常分为静力学延迟（zenith hydrostatic delay，ZHD）和湿延迟（zenith wet delay，ZWD）。其中静力学延迟又称为干延迟，其利用模型法改正精度已达毫米级，这种模型一般分为两大类，一类用地表气象数据作为输入，并基于经验公式计算天顶方向的对流层延迟，包括霍普菲尔德（Hopfield）模型[3]、萨斯塔莫宁（Saastamoinen）模型[4]等；另一类基于时间和位置坐标，使用数值天气预报（numerical weather prediction，NWP）模型的平均参数计算对流层延迟，包括 GPT2 模型[5]、GPT3 模型[6]、UNB3 模型[7]等[8]。相比于干延迟，湿延迟虽然只占总延迟的 10%左右，但它受到随时间和空间变化的水汽含量影响，难以用具体的经验模型描述，通常将其作为未知参数代入卫星定位解算中估计[9]。随机过程法是对流层湿延迟常用的参数估计法之一[10]，在 GNSS 数据处理中，通常固定对流层湿延迟的随机游走过程噪声 RWPN 来对对流层参数施加约束。Kouba 等人[11]建议在 PPP（precise point positioning）中为 ZWD 分配一个 5 mm/$\sqrt{h}$ 的 RWPN 值。Pacione 等人[12]采用了 20 mm/$\sqrt{h}$ 的 ZWD 约束。Lu 等人[13]研究给出了实时 RWPN 范围 5~10 mm/$\sqrt{h}$，但并没有提出进一步的研究。Hadas 等人[8]研究了 ZWD 估计对 RWPN 设置的敏感性，并提出了 3 种最佳选择全球 GNSS 站的 RWPN 方法。董建权等人[14]通过设置不同的随机游走噪声参数，对比分析不同对流层模型对机载数据 PPP 的影响，得到随机游走噪声为 4 mm/$\sqrt{h}$ 时的定位精度更高。在目前的 GNSS 数据处理中，不同的软件采用的湿延迟 RWPN 固定值不一样，取值范围在 0.01~0.1 mm/$\sqrt{s}$。但固定单一的 RWPN 值可能会导致 ZWD 存在系统偏差[15]，而且有时不能区分正常天气事件和极端天气事件，就会导致极端天气条件下的 ZWD 估计值不准确[15]。此外，随时空变化的 RWPN 会导致 ZWD 时间序列复杂的随机变化，使其除了具有明显的线性项和周期性信号，还可能包含大气变化的高频信号，这在 ZWD 预测和气候变化研究中必须予以考虑，因此有必要对对流层湿延迟随机游走过程噪声的时空变化特征进行分析。

1 数据处理方法

本文实验采用 JPL（Jet Propulsion Laboratory）、GFZ（Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences）和 CODE（Center for Orbit Determination in Europe）分析中心（示于表 1）提

供的 11 年（2010—2020）事后对流层产品数据，选取 20 个分布在全球不同位置的 IGS（International GNSS Service）测站（示于图 1），首先用 Saastamoinen 模型计算出干延迟 ZHD，使用 ZWD = ZTD − ZHD 公式提取湿延迟。Saastamoinen 模型将对流层分为干、湿延迟计算，其中，干延迟为

$$\Delta d = 0.002\,277 \frac{P}{1 - 0.002\,66 \times \cos(2\varphi) - 0.000\,28h \times 10^{-3}}。\tag{1}$$

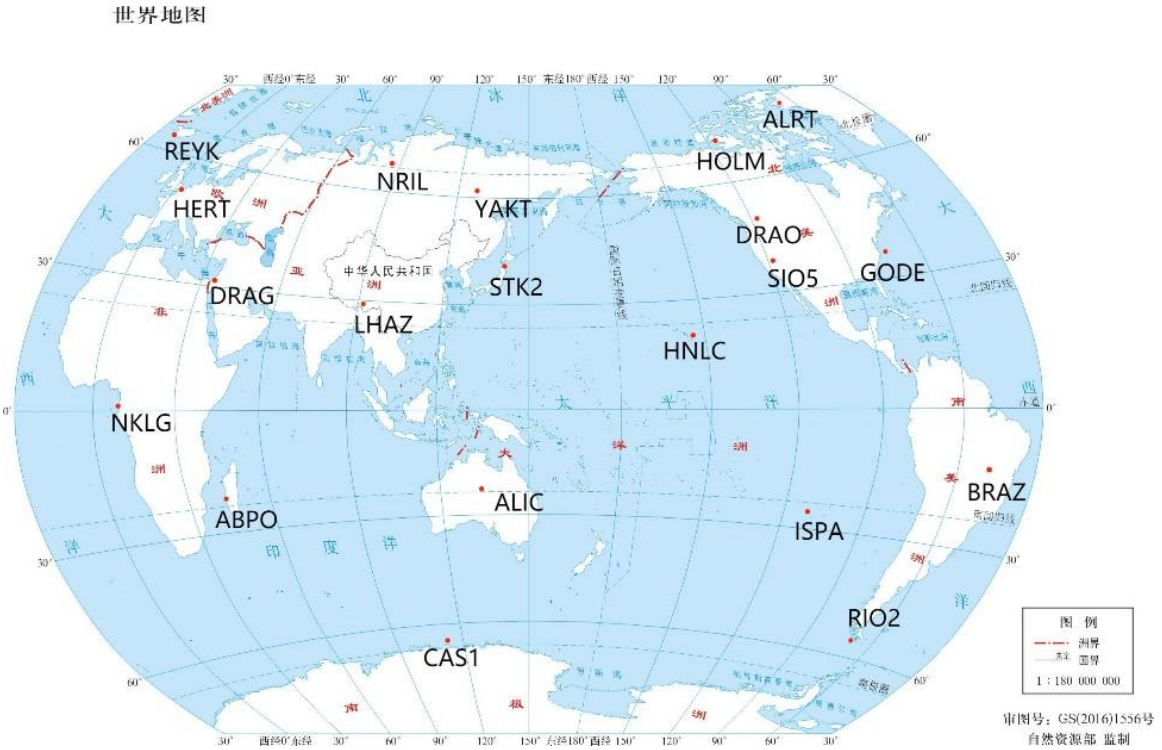
湿延迟为

$$\Delta w = 0.002\,277 \left[\frac{1\,255}{T + 273.06} + 0.05 \right] \frac{e_0}{f(\varphi, h)}。\tag{2}$$

式（1）和（2）中：P 是地面的气压（mbar），T 是地面的温度（K），e_0 是水汽压（mbar），φ 是纬度（°），h 是测站高度（m）。在计算干延迟时实验数据所跨年份较长，无法获取实测气压值，本文选择武汉大学 GNSS 气象集成工具（GNSS meteorological ensemble tools，GMET）的 ERA5 气压值，代入模型求得 ZHD。另外，由于表 1 中各分析中心 ZTD 时间分辨率不同，因此先将数据进行预处理，统一为天间隔的 ZTD。

表 1　分析中心信息表

分析中心缩写	机构名称及所属国家	数据处理软件	ZTD 的时间分辨率
JPL	美国喷气动力实验室	GIPSY	5 mins
GFZ	德国波茨坦地学研究中心	EPOS	1 h
CODE	欧洲定轨中心，瑞士	BERNESE	2 h



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2016）1556 号的标准地图制作，底图无修改

图 1　IGS 测站位置分布

在各种类型的随机过程中，对 ZWD 较合适的是一阶马尔可夫过程[16-17]。马尔可夫过程是一个无记忆的随机过程，未来的结果只与当前状态有关，与过去状态无关。根据马尔可夫理论，假设 n 步后

期望平移距离为 L，每步的平移距离为 ε[8]，则：

$$E(|L_n(\varepsilon)|)=\varepsilon\sqrt{n}\text{。} \tag{3}$$

将公式（3）用于对流层延迟中，则在时间间隔 δt 内，对于对流层延迟 ΔZ 有

$$E(|\Delta Z_{t+\delta t}-\Delta Z_t|)=\varepsilon\sqrt{\delta t}\text{。} \tag{4}$$

从式（4）可以得出，在对流层延迟随机游走过程中，ΔZ 的预期变化取决于时间间隔的长度 δt 和每步平移距离 ε，因此，将 ε 视为对流层延迟随机过程中的随机游走过程噪声 RWPN，进一步将公式（4）表示为

$$E(\varepsilon)=|\Delta Z_{t+\delta t}-\Delta Z_t|/\sqrt{\delta t}\text{。} \tag{5}$$

利用公式（5）分别计算了以年、季节、天为时间长度的平均对流层湿延迟 RWPN，数据流程处理见图 2。

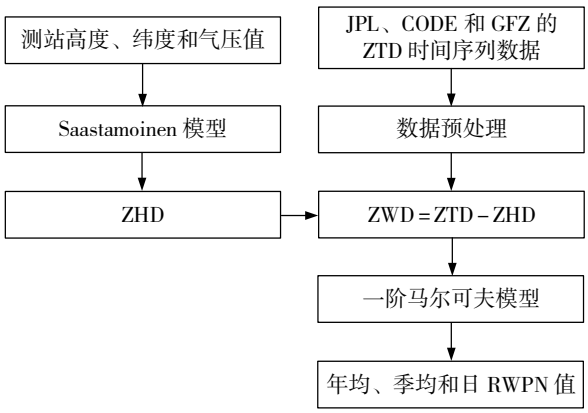


图 2 数据处理流程图

2 湿延迟 RWPN 的时空变化特征分析

2.1 不同地理位置分析

为了研究地理位置差异是否对湿延迟 RWPN 产生影响，选择 20 个全球不同位置的 IGS 测站，对 2010 年至 2020 年的数据进行分析。这些测站遍布全球，涵盖了不同地理位置和气候条件下的大气水汽变化情况，但由于数据收集和处理中心的数据存在不完整性，某些测站的数据是不连续的，其中 CODE 分析中心不包括 SIO5 和 DRAG 测站的数据，GFZ 分析中心不包括 SIO5 测站的数据。

图 3 是不同地理位置的 IGS 测站在 JPL、GFZ 和 CODE 3 个分析中心下的年均湿延迟 RWPN 变化趋势，图中黑线、红线和绿线分别代表 JPL、GFZ 和 CODE 分析中心。从图 3 中可以看出，3 个分析中心的年均湿延迟 RWPN 变化趋势基本一致，说明各分析中心对年均湿延迟的估计相对一致。但是，不同地理位置 IGS 测站的年均湿延迟 RWPN 估计值明显不同，其范围约为 0.01~0.146 mm/$\sqrt{s}$。其中，GODE 测站的 RWPN 值最高，标准偏差约为 0.01 mm/$\sqrt{s}$，这是由于 GODE 测站位于美国境内的沿海区域，其上空水汽变化比较复杂，因此 ZWD 波动范围较大；相比之下，位于加拿大北极的 ALRT 测站的 RWPN 表现最小且平稳，标准偏差约为 0.003 mm/$\sqrt{s}$，其时间序列相对平滑，因为该地区降雨量较少，气候变化稳定，ZWD 波动较小。

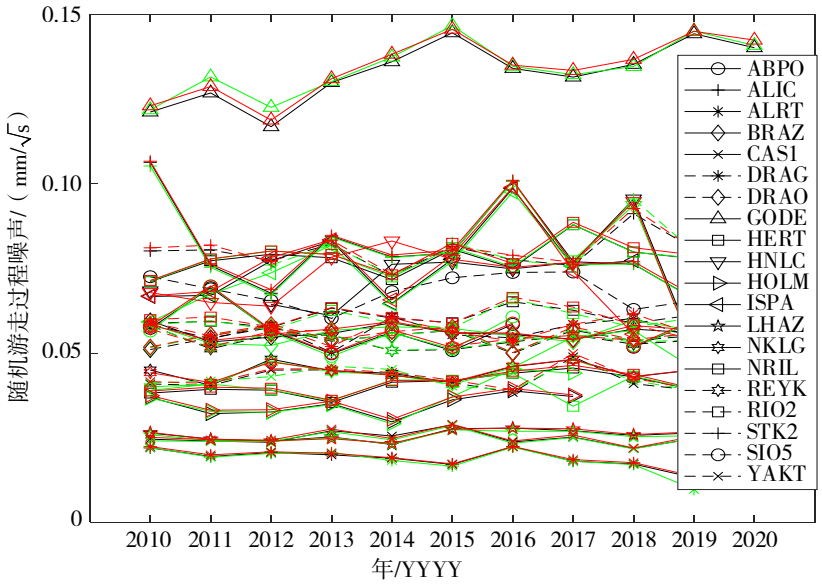


图 3 JPL、GFZ 和 CODE 分析中心不同测站的年均湿延迟 RWPN 时间序列图

根据已有研究，ZTD 与测站纬度高度相关[18]。为分析湿延迟 RWPN 与纬度的变化关系，选取测站数据完整的 JPL 分析中心数据作为实验数据，进一步绘制各个测站湿延迟 RWPN 随纬度的变化情况，示于图 4。从图 4 中可以看出，临近极地地区的湿延迟 RWPN 值较小，大约在 0.02 mm/$\sqrt{s}$ 左右，主要是因为两极地区长年冰寒，降雨量较少，气候变化稳定；在中低纬度地区，湿延迟 RWPN 值较大，尤其在北纬地区，推测由于北半球海陆分布造成了 ZWD 空间变化复杂[18]。但在北纬 29.657°的 LHAZ 测站 RWPN 值较小，其海拔较高，水汽含量较少，因此 ZWD 值变化稳定。

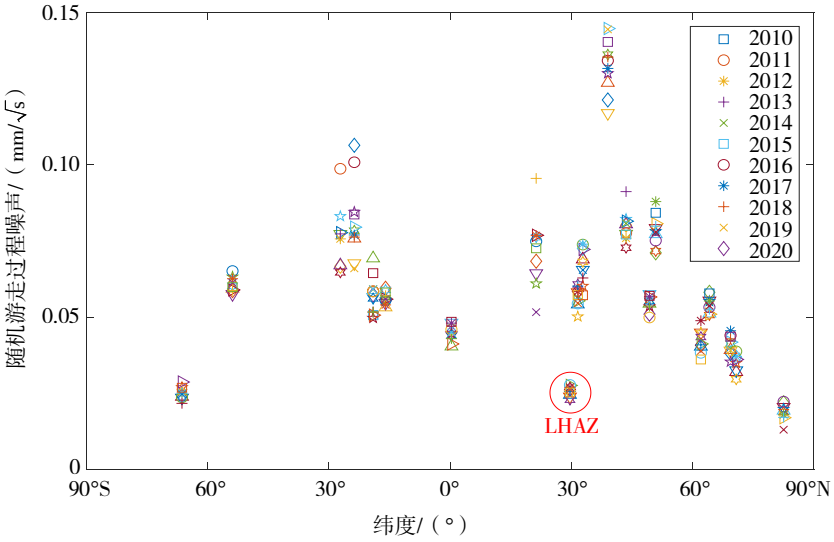
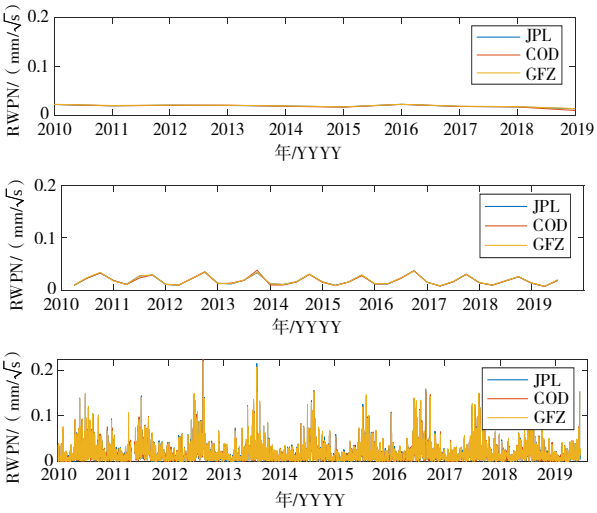


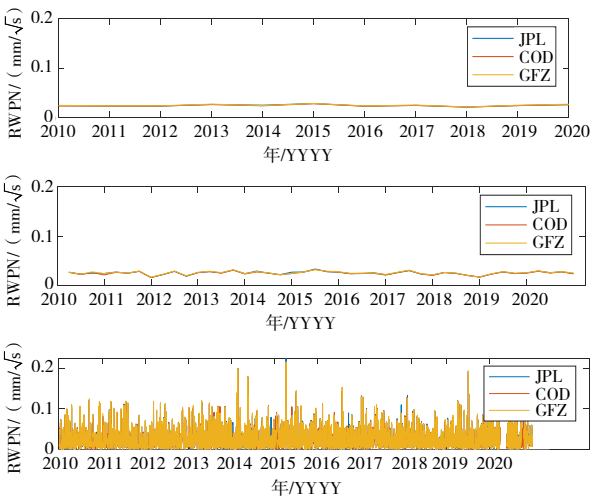
图 4　随纬度变化的年均湿延迟 RWPN

2.2　不同时间序列分析

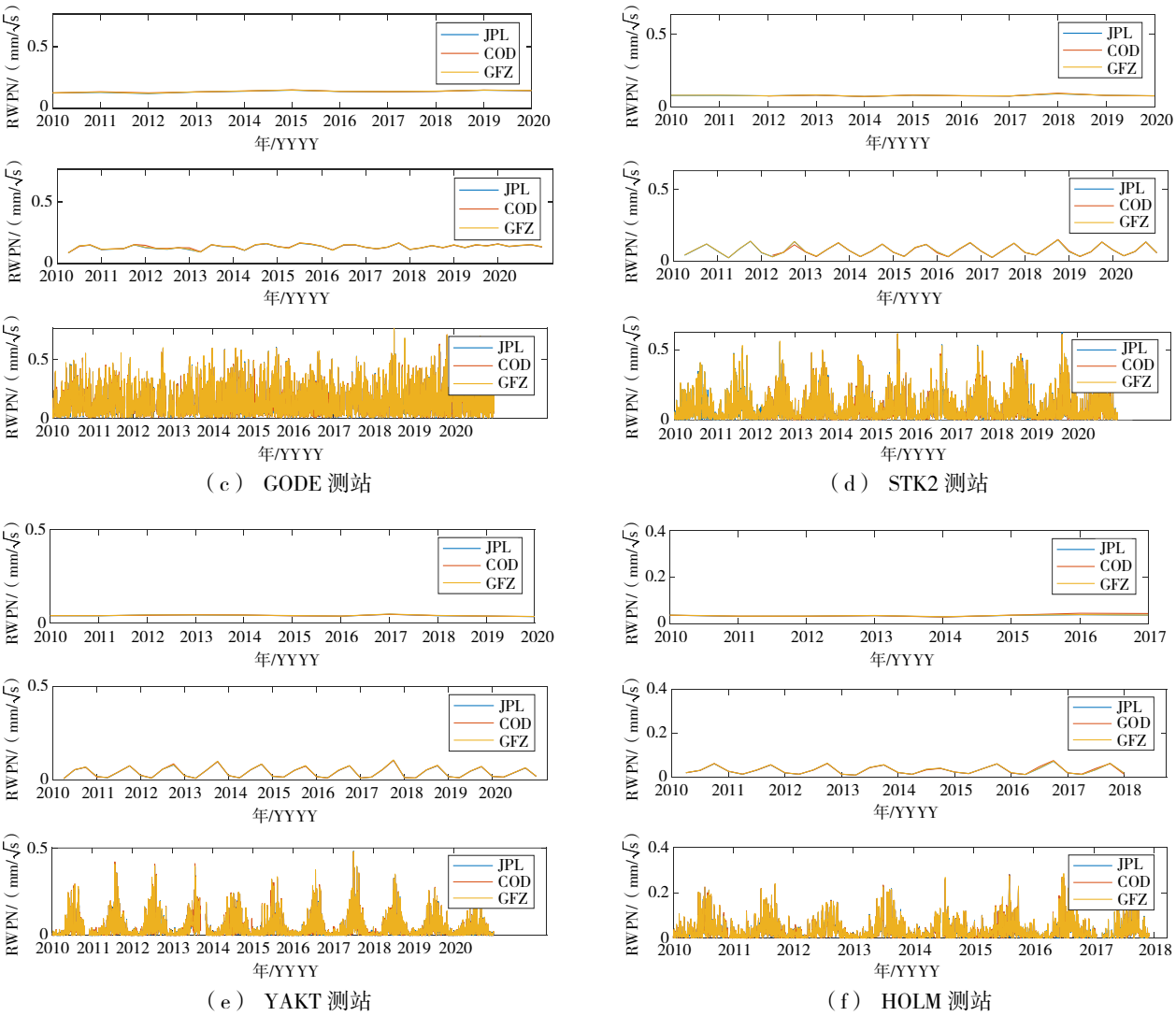
为研究不同时间序列下湿延迟 RWPN 变化，本文将年、季节和日均湿延迟 RWPN 进行对比分析。因篇幅有限，选出 6 个代表性测站，绘制了不同分析中心、不同时间序列的湿延迟 RWPN，示于图 5（图中 COD 即 CODE），其中 CAS1 和 ALRT 测站分别靠近南北极，GODE 和 STK2 测站在湿润地带，YAKT 和 HOLM 测站在荒漠地带。从图 5 中可看出，同一测站，不同时间序列下的湿延迟 RWPN 值不同，为进一步分析其 RWPN 变化特征，采用数据完整的 JPL 分析中心，统计出各时间序列下测站湿延迟 RWPN 的最大值、最小值、极差值和标准差（standard deviation，STD）值，示于表 2。



（a）　ALRT 测站



（b）　CAS1 测站



（c） GODE 测站　　（d） STK2 测站

（e） YAKT 测站　　（f） HOLM 测站

图 5　6 个代表测站在不同分析中心的年、季节和日均湿延迟 RWPN

表 2　不同时间序列 RWPN 统计量（最大值、最小值、极差值、STD）　　单位：（mm/ $\sqrt{s}$ ）

JPL 测站	年均湿延迟 RWPN				季节均湿延迟 RWPN				日均湿延迟 RWPN			
	最大值	最小值	极差值	STD 值	最大值	最小值	极差值	STD 值	最大值	最小值	极差值	STD 值
ABPO	0.069	0.050	0.019	0.006	0.076	0.037	0.039	0.010	0.420	6×10^{-6}	0.420	0.051
ALIC	0.106	0.067	0.039	0.012	0.118	0.042	0.076	0.023	0.521	1×10^{-5}	0.521	0.079
ALRT	0.029	0.022	0.013	0.009	0.003	0.037	0.008	0.009	0.222	3×10^{-6}	0.222	0.022
CAS1	0.029	0.021	0.008	0.002	0.033	0.016	0.017	0.004	0.224	1×10^{-5}	0.224	0.024
NKLG	0.049	0.040	0.009	0.003	0.057	0.033	0.024	0.006	0.028	8×10^{-7}	0.028	0.037
SIO5	0.074	0,057	0.017	0.006	0.106	0.047	0.059	0.016	0.519	4×10^{-5}	0.519	0.063
LHAZ	0.028	0.023	0.005	0.002	0.044	0.013	0.031	0.008	0.271	2×10^{-6}	0.271	0.027
BRAZ	0.060	0.053	0.007	0.002	0.073	0.037	0.036	0.008	0.429	2×10^{-5}	0.429	0.051

续表 2

JPL 测站	年均湿延迟 RWPN				季节均湿延迟 RWPN				日均湿延迟 RWPN			
	最大值	最小值	极差值	STD 值	最大值	最小值	极差值	STD 值	最大值	最小值	极差值	STD 值
GODE	0.145	0.117	0.028	0.009	0.163	0.082	0.081	0.019	0.753	9×10^{-5}	0.753	0.116
DRAG	0.061	0.050	0.011	0.003	0.071	0.042	0.029	0.007	0.346	3×10^{-5}	0.346	0.046
ISPA	0.099	0.065	0.034	0.010	0.110	0.058	0.052	0.013	0.502	9×10^{-5}	0.502	0.071
DRAO	0.058	0.050	0.008	0.003	0.067	0.042	0.025	0.006	0.384	7×10^{-5}	0.384	0.046
HERT	0.088	0.071	0.017	0.005	0.112	0.052	0.060	0.014	0.462	6×10^{-5}	0.462	0.068
HNLC	0.096	0.052	0.044	0.012	0.110	0.052	0.058	0.015	0.482	7×10^{-5}	0.482	0.066
NRIL	0.046	0.035	0.011	0.003	0.088	0.010	0.078	0.022	0.437	7×10^{-6}	0.437	0.050
REYK	0.058	0.051	0.007	0.003	0.080	0.037	0.043	0.009	0.431	4×10^{-6}	0.431	0.050
RIO2	0.065	0.058	0.007	0.010	0.079	0.039	0.040	0.002	0.339	2×10^{-5}	0.339	0.051
STK2	0.091	0.073	0.018	0.005	0.151	0.025	0.126	0.036	0.631	1×10^{-5}	0.631	0.087
YAKT	0.049	0.036	0.013	0.004	0.107	0.009	0.098	0.028	0.482	1×10^{-7}	0.482	0.056
HOLM	0.039	0.030	0.009	0.003	0.074	0.011	0.063	0.019	0.328	4×10^{-6}	0.328	0.042
均值	0.066	0.050	0.016	0.005	0.088	0.035	0.053	0.014	0.411	2.73×10^{-5}	0.411	0.055

由表 2 均值可知，所有测站以年为单位的湿延迟 RWPN 时间序列变化范围为 0.05~0.066 mm/$\sqrt{s}$，极差值为 0.016 mm/$\sqrt{s}$，STD 值为 0.005 mm/$\sqrt{s}$；以季节为单位的湿延迟 RWPN 时间序列变化范围为 0.035~0.088 mm/$\sqrt{s}$，极差值为 0.053 mm/$\sqrt{s}$，STD 值为 0.014 mm/$\sqrt{s}$，其中 ALIC、GODE、NRIL、STK2 和 YAKT 测站季节湿延迟 RWPN 极差值较大，具有明显的季节性差异；以天为单位的湿延迟 RWPN 时间序列变化范围为 2.73×10^{-5}~0.411 mm/$\sqrt{s}$，极差值为 0.411 mm/$\sqrt{s}$，STD 值为 0.055 mm/$\sqrt{s}$。相对而言，以天为单位的湿延迟 RWPN 时间序列变化范围较大，尤其在 GODE 测站表现明显，极差值为 0.753 mm/$\sqrt{s}$，可能是由于海拔较低且处于湿润地带，短时间内发生的极端天气变化，导致 ZWD 变化激烈。标准差 STD 是用来衡量数据波动程度的一种统计指标，值越小表示数据波动越小，反之则波动越大。因此，从标准差的角度来看，以年为单位的时间序列，RWPN 的波动最小，以季节和天为单位的时间序列，RWPN 的波动则相对较大。

2.3　NWM 数据验证与周期性分析

为验证分析中心产品对湿延迟 RWPN 时空变化分析的准确性，采用了 GMET 的 NWM 数据计算的 ZWD 进行验证，使用上述相同方法，绘制了不同测站的年均湿延迟 RWPN，示于图 6，和随纬度变化的年均湿延迟 RWPN，示于图 7。通过对比图中数据可知，NWM 数据源下湿延迟 RWPN 的变化趋势与分析中心数据源下的湿延迟 RWPN 变化一致。同样以 2.2 节提到的 6 个代表性测站绘制了不同时间序列的湿延迟 RWPN 变化，示于图 8，分别计算 20 个测站的 STD 值，对其取均值，得到以年为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.004 mm/$\sqrt{s}$，以季节为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.014 mm/$\sqrt{s}$，以天为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.054 mm/$\sqrt{s}$，时间尺度越短，RWPN 值越大，可以与上述分析中心相互印证。通过使用外部数据，可以进一步验证湿延迟 RWPN 时空变化分析的准确性。

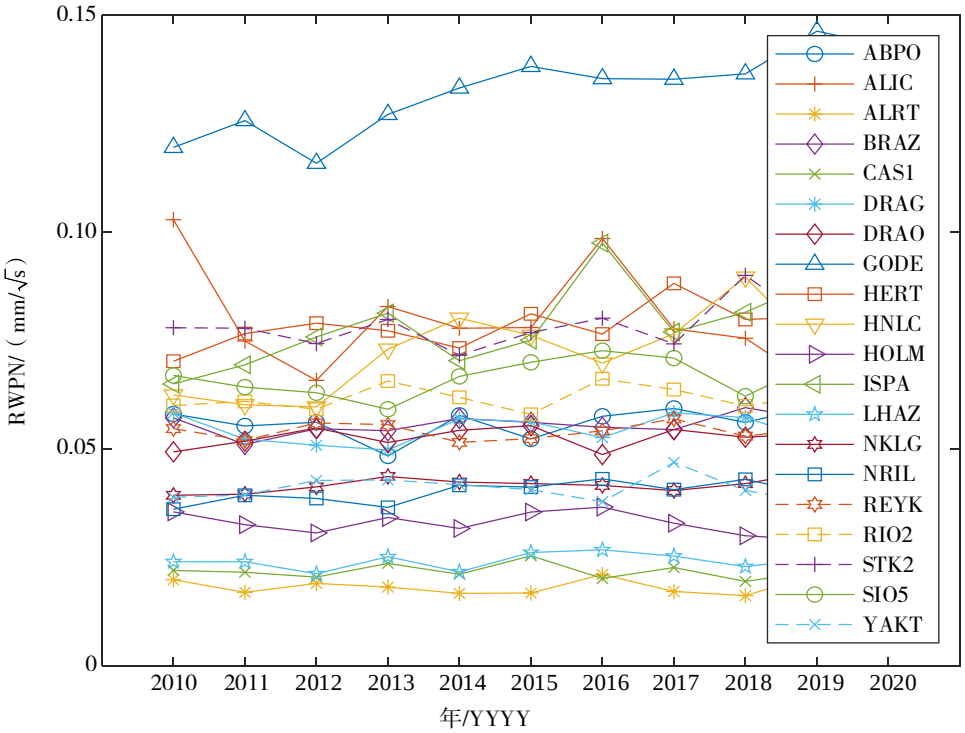


图 6 NWM 数据源不同测站的年均湿延迟 RWPN

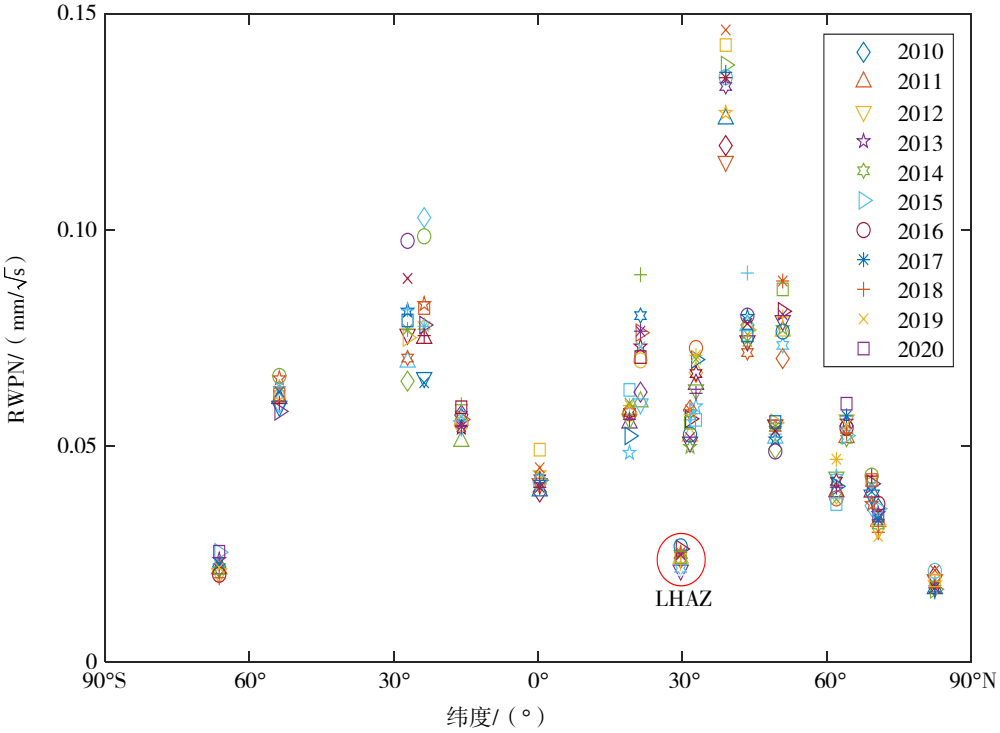


图 7 NWM 数据源随纬度变化的年均湿延迟 RWPN

同样以第 2.2 节提到的 6 个代表性测站绘制了不同时间序列的湿延迟 RWPN 变化，示于图 8，分别计算 20 个测站的 STD 值，对其取均值，得到以年为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.004 mm/$\sqrt{s}$，以季节为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.014 mm/$\sqrt{s}$，以天为单位的湿延迟 RWPN 时间序列 STD 为 0.054 mm/$\sqrt{s}$，时间尺度越短，RWPN 值越大，可以与上述分析中心相互印

证。通过使用外部数据，可以进一步验证湿延迟 RWPN 时空变化分析的准确性。

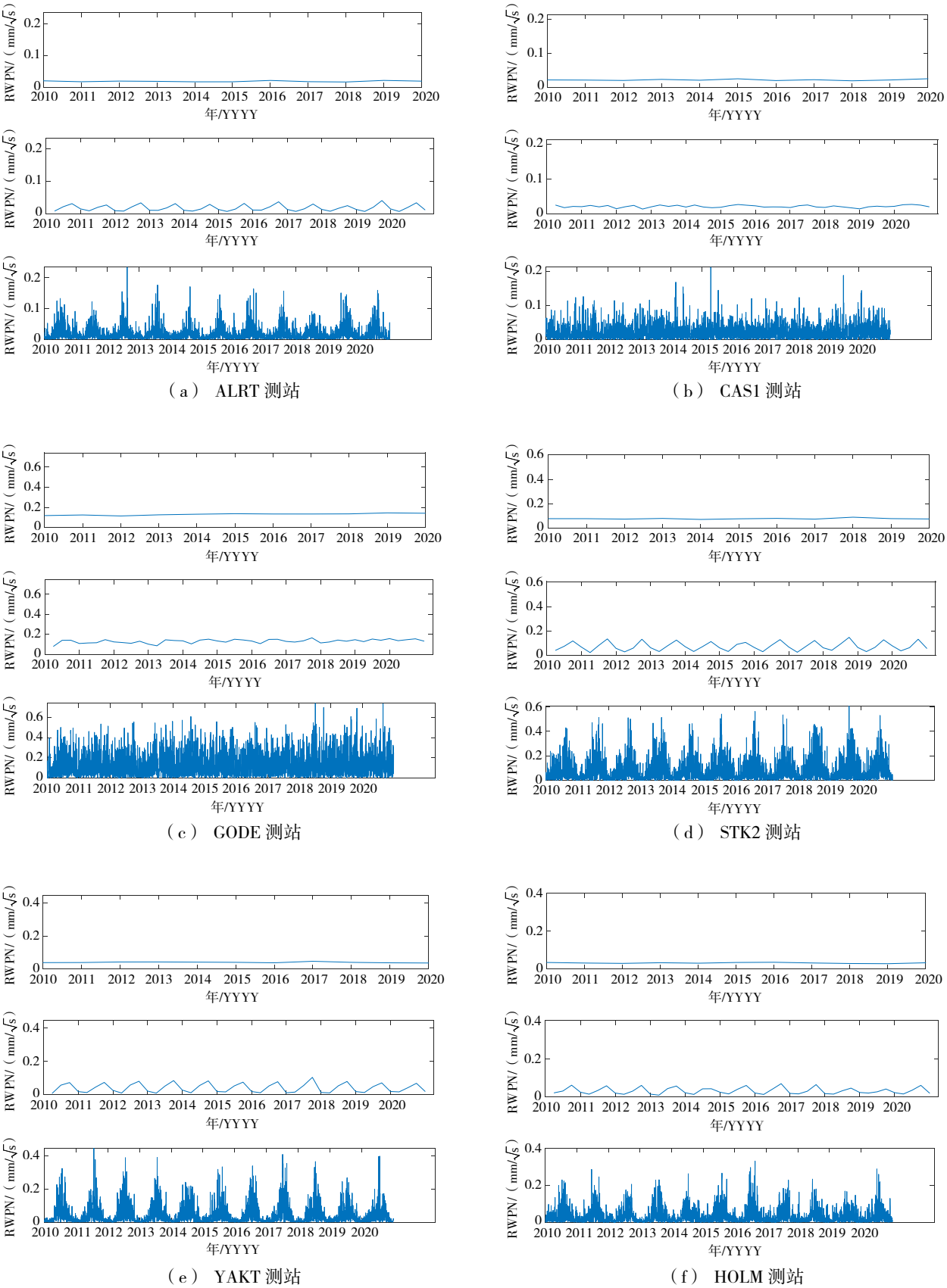
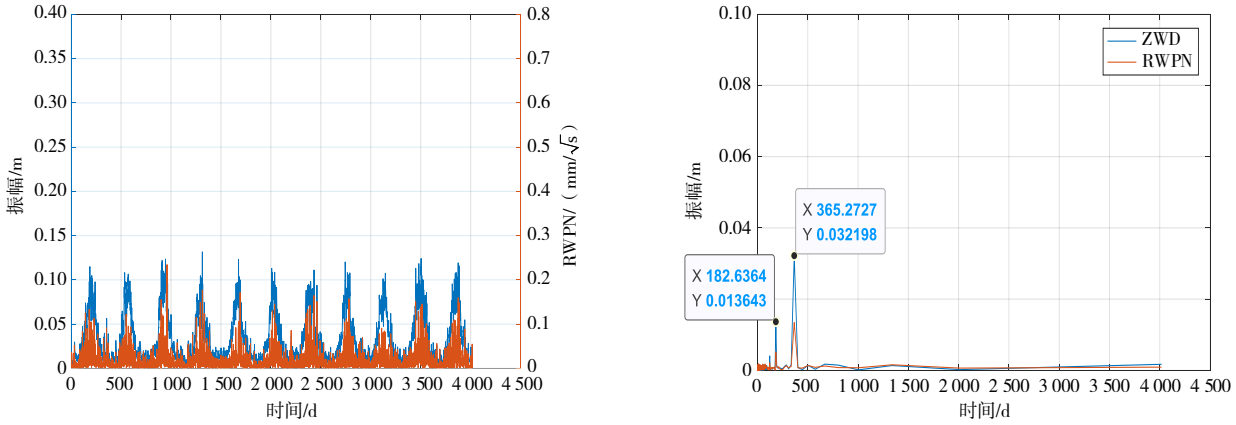
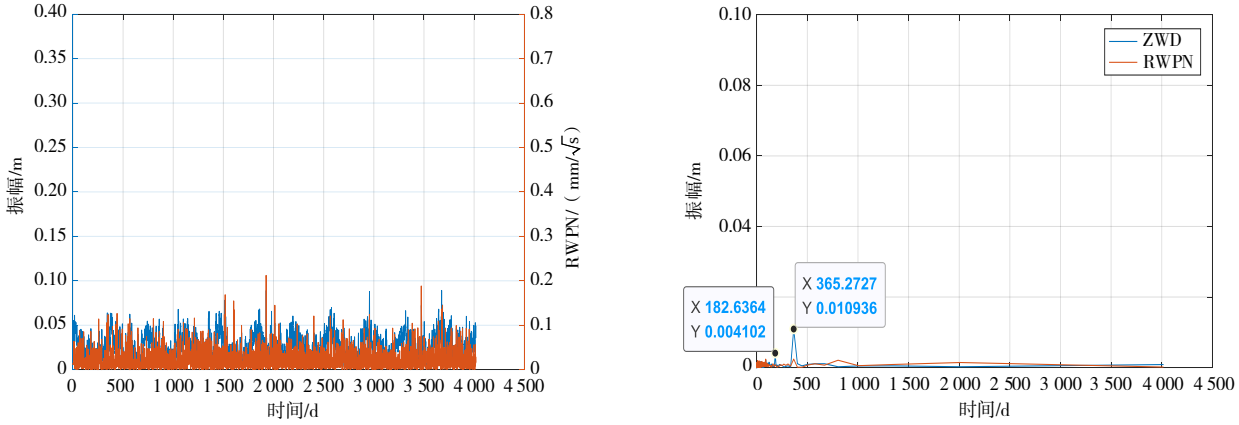


图 8　NWM 数据源 6 个代表测站的年、季节和日均 RWPN 变化

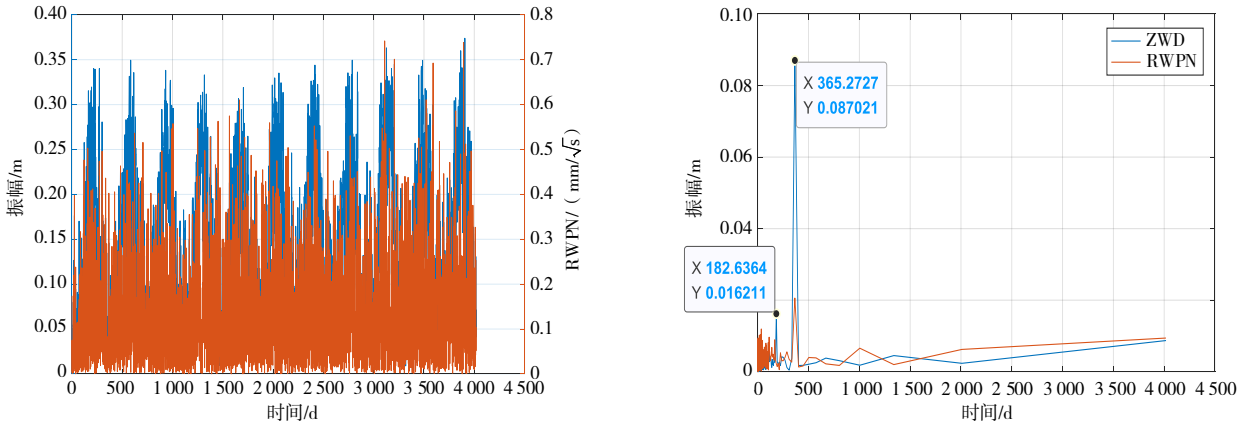
最后为了分析 ZWD 与 RWPN 的周期性变化，对以天为时长的 11 年的 ZWD 及其对应的 RWPN 时间序列进行快速傅里叶变换，这种方法可以将时域上的数据转换为频域上的数据，从而更好地展现数据的周期性变化。图 9 是 6 个测站 2010 年至 2020 年的 ZWD 和 RWPN 时间序列及其快速傅里叶变换结果，通过观察图像，可以发现 RWPN 和 ZWD 含有相同的频率分量，变化规律一致，主要表现为年周期和半年周期，这说明 ZWD 和 RWPN 的周期性变化在某种程度上是相关的。



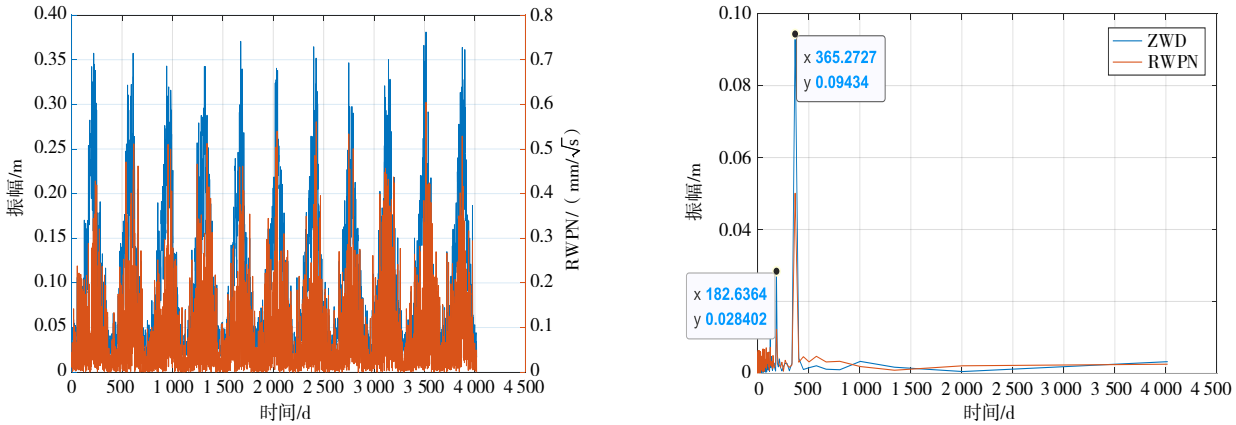
（a） ALRT 测站



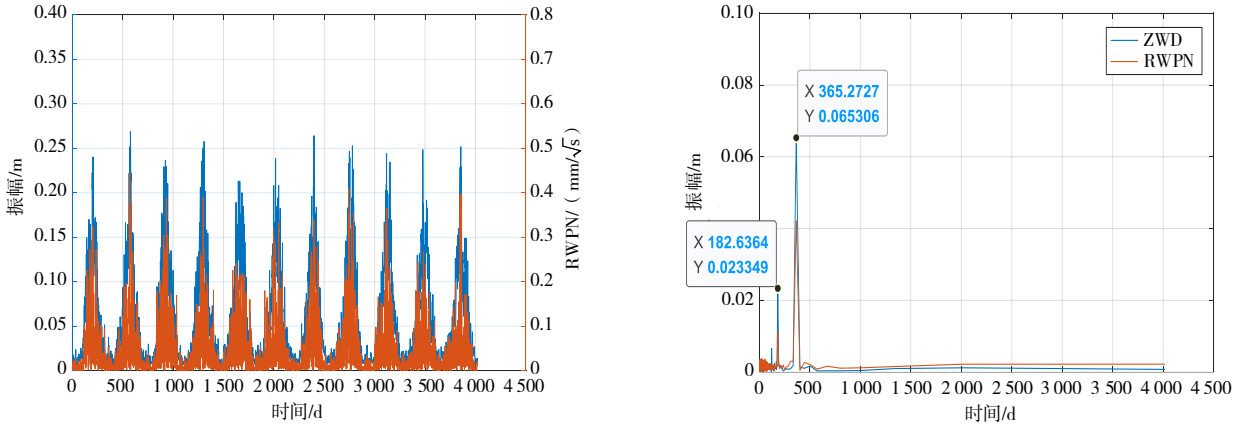
（b） CAS1 测站



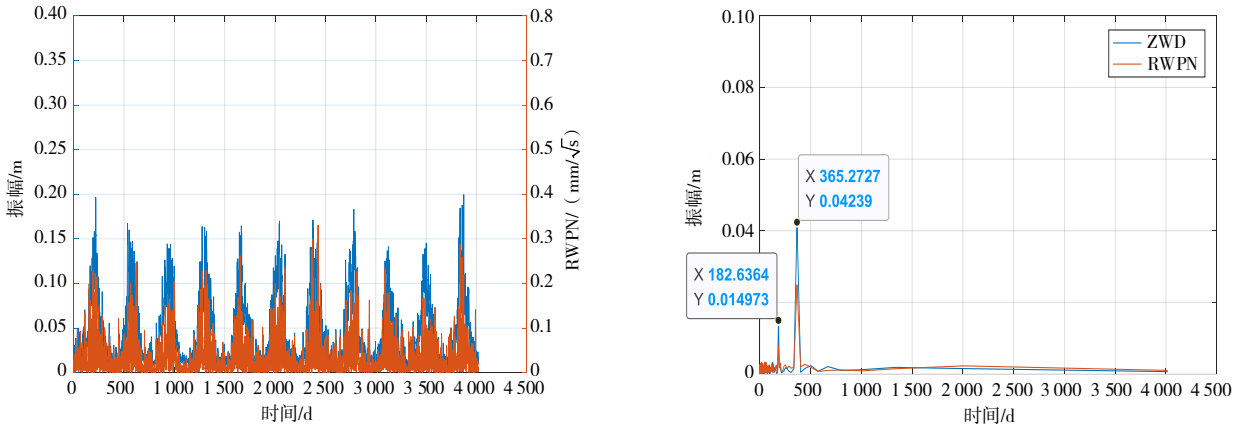
（c） GODE 测站



（d） STK2 测站



（e） YAKT 测站



（f） HOLM 测站

图 9　6 个代表测站 2010—2020 年 ZWD 和 RWPN 的时间序列及其快速傅里叶变换

3　ZWD 残差高频信号分析

3.1　ZWD 时间序列的函数模型

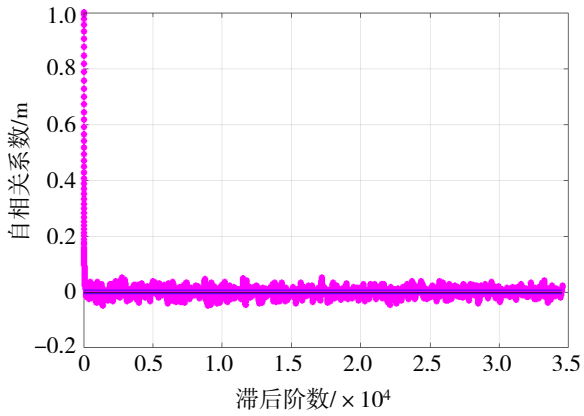
根据 2.3 节数据分析可知，ZWD 及其对应的 RWPN 存在明显周年和半周年信号，这些显著信号可能会掩盖 ZWD 残差的其他高频信号，为分析 ZWD 残差高频信号分量，考虑到年周期项和半年周期项，采用最小二乘法用公式（6）拟合 ZWD 的主要周期信号。

$$D_{ZW} = a + b\cdot t + A_0\cdot\sin(\frac{2\pi}{365.25}\cdot t) + B_0\cdot\cos(\frac{2\pi}{365.25}\cdot t) + A_1\cdot\sin(\frac{4\pi}{365.25}\cdot t) + B_1\cdot\cos(\frac{4\pi}{365.25}\cdot t) + \varepsilon(t) \text{ 。} \quad (6)$$

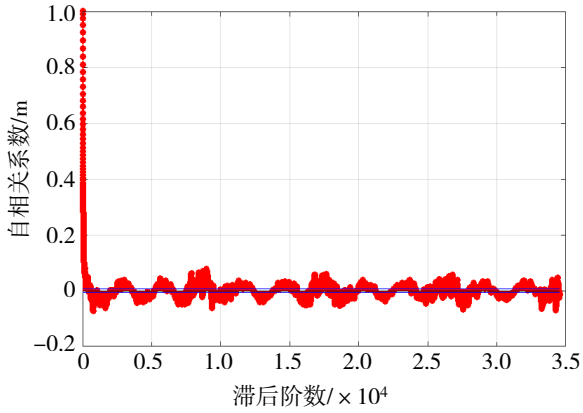
式（6）中：a 和 b 是线性项系数；t 为时间；A_0 和 B_0 是年周期振幅；A_1 和 B_1 是半年周期振幅；$\varepsilon(t)$ 表示残差，包含了去除确定信号后的高频随机信号，进而通过自相关和谱密度分析分别在时域和频率域揭示 ZWD 残差高频信号特征。

3.2 ZWD 残差的自相关性分析

时间序列的自相关表示随机信号与经过一定时间延迟后信号本身的相关性，相关性分析有助于探测被噪声淹没的周期信号。图 10 是 JPL 分析中心的 ZWD 残差时间序列绘制的 GODE 和 YAKT 测站自相关图，滞后步长为 1 h，水平蓝线表示 95% 置信度。测站 GODE 位于美国东部沿海，气候湿润，地理坐标为（39.0 N，–37.68 L，14.5 H）；测站 YAKT 位于俄罗斯东部，气候干旱，地理坐标为（62.03，129.68，103.37 H）。分析中心 CODE、GFZ 以及 NWM 数据绘制的自相关图与 JPL 相似，在此不再展示。理论上，如果 ZWD 时间序列仅包含白噪声，那么 ZWD 残差 $\varepsilon(t)$ 在滞后时间为 0 时相关性为 1，在其他滞后时间相关性均为 0。



（a） GODE 测站



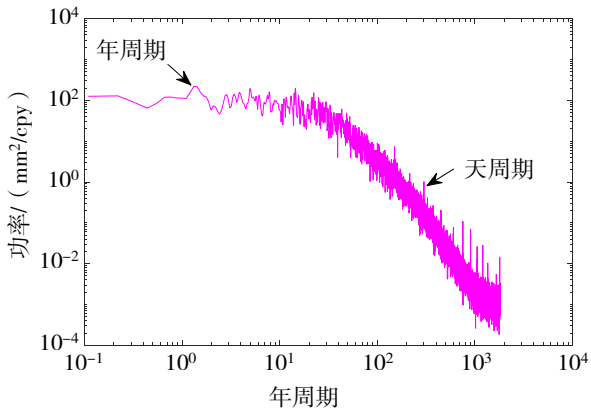
（b） YAKT 测站

图 10 不同地理位置 GODE 和 YAKT 测站的自相关图

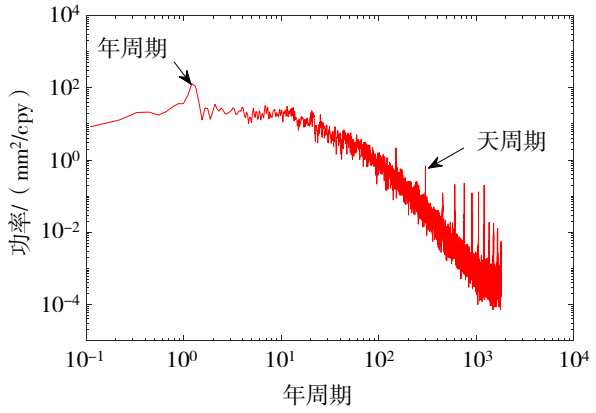
理论上，如果 ZWD 时间序列仅包含白噪声，那么 ZWD 残差 $\varepsilon(t)$ 在滞后时间为 0 时相关性为 1，在其他滞后时间相关性均为 0。但从图 10 可以看出，GODE 和 YAKT 测站的 ZWD 残差样本在非零滞后时间的相关性不为 0，且具有明显的周期性特征和微弱的相关性。相比于 YAKT 测站，GODE 测站的自相关函数变化更加复杂，显示可能存在多个高频信号，这是因为 GODE 海拔较低且处于雨量充沛的沿海位置，导致 GODE 的水汽变化快。

3.3 ZWD 残差的谱密度分析

进一步用谱密度分析 ZWD 残差频域特征。图 11 是 GODE 和 YAKT 测站 ZWD 残差时间序列的功率谱密度图，横坐标单位为年周期（cycle per year，cpy），数据来源于 JPL 分析中心，CODE、GFZ 以及 NWM 数据绘制的谱密度图与 JPL 相似，不再展示。为了方便对比，将图中各个数据源谱密度显著的高频信号统一记录在表 3 中。



（a） GODE 测站



（b） YAKT 测站

图 11　GODE 和 YAKT 测站的功率谱密度图

图 11 表明，ZWD 残差具有丰富的随机信号，ZWD 除了周年和半周年信号外，还具有明显的季节性信号和高频信号。当信号频率低于 10 cpy 时，ZWD 残差呈现白噪声特征，当信号频率高于 10 cpy 时，则呈现明显的有色噪声特征，其中高频信号的变化范围在 4.8 h 至 2.43 d（58.32 h）之间。

表 3　ZWD 残差周期—谱密度统计图表

Station	周期/h	谱密度（mm/$\sqrt{period}$）			
		JPL	CODE	GFZ	NWM
GODE	58.32	2.49	2.74	2.54	3.47
	29.28	1.01	0.72	0.64	0.67
	19.44	0.45	0.48	0.51	0.30
	14.64	0.28	0.35	0.47	0.29
	11.76	0.33	0.30	0.41	0.29
	9.60	0.24	0.10	0.48	0.19
	8.40	0.15	N/A	0.40	0.21
	7.20	0.17	N/A	0.36	0.12
	6.48	0.10	N/A	0.33	0.19
	4.80	0.12	N/A	0.37	0.18
YAKT	58.56	1.47	1.54	1.39	1.25
	29.04	0.83	1.05	0.89	0.34
	19.44	0.35	0.42	0.37	0.11
	14.64	0.46	0.51	0.86	0.12
	11.76	0.48	0.18	0.66	0.07
	9.60	0.35	0.08	0.53	0.06
	8.40	0.33	N/A	0.83	0.03
	7.20	0.44	N/A	1.46	0.05
	6.48	0.14	N/A	0.43	0.03
	5.76	0.13	N/A	0.67	0.04
	5.28	0.11	N/A	0.53	0.03
	4.80	0.07	N/	0.34	0.05

表 3 表明在所有高频信号中，JPL、CODE、GFZ 和 NWM 各个数据源 2.43 d 和 1.22 d 的周期信号最为显著；测站 YAKT 比测站 GODE 多了 5.76 h 和 5.28 h 的周期信号；NWM 周期信号与各个分析中心结果基本一致；相比于其他分析中心，CODE 分析中心小于 10 h 的周期信号并不显著，由于在 GNSS 数据处理中，CODE 修正了非潮汐大气负荷，而其他分析中心没有考虑这一因素。因此，在分析对流层随机噪声时，不仅应该考虑 ZWD 的地理位置和时间差异，还应考虑不同数据源 GNSS 数据处理背景模型的差异性。

4　结语

本文实验使用 JPL、CODE 和 GFZ 分析中心提供的全球 20 个测站 2010—2020 年的事后对流层产品，从不同地理位置和不同时间序列分析对流层湿延迟 RWPN 时空变化特性，在扣除 ZWD 确定性模型后，对 ZWD 残差信号进行分析研究，得出以下结论。

① 不同地理位置的湿延迟 RWPN 值不同，在大气相对稀薄的极地地区其值较小，大气集中的中低纬地区其值较大。

② 通过对不同时间序列湿延迟 RWPN 最大值、最小值、极差和 STD 的比较，分析发现湿延迟 RWPN 具有季节性特征。并通过快速傅里叶变换发现 RWPN 和 ZWD 含有相同的频率分量，变化规律一致，主要表现为年周期和半年周期。

③ ZWD 残差分析表明，除周年和半周年信号外，ZWD 残差时间序列还包括 4.8 h~2.43 d 的高频信号。在对流层预测中应该予以考虑，以免影响 ZWD 趋势项估计精度。

参考文献：

[1] 杜晓燕，乔江，卫佩佩. 一种用于中国地区的对流层天顶延迟实时修正模型[J]. 电子与信息学报，2019, 41(1): 156-164.

[2] 黄文德，康娟. 北斗卫星导航定位原理与方法[M]. 北京：科学出版社, 2019: 119-121.

[3] HOPFIELD H S. The effect of tropospheric refraction on

the Doppler shift of a satellite signal[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1963, 68(18): 5157-5168.

[4] SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[J]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, 1972, 15(6): 247-251.

[5] LAGLER K, SCHINDELEGGER M, NILSSON T, et al. GPT2: empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(6): 1069-1073.

[6] LANDSKRON D, BOHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. Journal of Geophysical Research, 2018, 92(4): 349-360.

[7] LEANDRO R F, LANGLEY R B, SANTOS M C. UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques[J]. GPS Solutions, 2008, 12(1): 65-70.

[8] HADAS T, TEFERLE F N, KAZMIERSKI K. et al. Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time[J]. GPS Solution, 2017(21): 1069-1081.

[9] 聂檄晨. 对流层天顶湿延迟模型及水汽反演应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

[10] 熊聚中. 估计对流层折射的随机过程方法研究[J]. 全球定位系统, 2007, 32(6): 11-13.

[11] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solution, 2000, 5(2): 12-28.

[12] VESPE F, PACIONE R, PACE B. Near real-time GPS zenith total delay validation at E-GVAP super sites[J]. Bollettino Di Geodesia E Scienze Affini, 2009(1): 61-73.

[13] LU C X, LI X, NILSON T, et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(9): 843-856.

[14] 董建权, 郭将, 栗广才, 等. 不同对流层模型对机载精密单点定位的影响分析[J]. 全球定位系统, 2022, 47(6): 9-17+37.

[15] 张兴刚, 贺成艳. 一种 GNSS 对流层湿延迟估计方法、系统、设备及介质: 中国, 202111075538.5[P]. 2021.

[16] TRALLI DAVID M, LICHTEN S M. Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements[J]. Bulletin Géodésique, 2006 64(2): 127-129.

[17] 邵占英, 葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射率随机模型的研究[J]. 地壳形变与地震, 1996(2): 1-7.

[18] 王瑾芳, 杨玲. 对流层延迟对 GNSS 单点定位影响的全球评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(11): 1194-1199.