DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2021.02.006



王勇1 于腾丽1 刘晓1 占伟2

# 京津冀地区 GNSS ZTD 时序分析及 对厄尔尼诺事件的响应

#### 摘要

京津冀地区夏季暴雨频发,水汽是影 响暴雨形成的关键要素之一.本文利用中 国大陆构造环境监测网络(CMONOC)京 津冀地区 GNSS(全球导航卫星系统)观测 资料,开展 GNSS 天顶对流层总延迟 (ZTD)时序分析及对厄尔尼诺事件的响 应研究.利用快速傅里叶变换与小波变换 方法从频域和时域开展 GNSS ZTD 时序 分析,并对 GNSS ZTD 不同周期时序与东 部型指数(I<sub>FP</sub>)、中部型指数(I<sub>CP</sub>)进行比 较,分析 IEP、ICP 对 GNSS ZTD 周期变化的 影响.研究发现:GNSS ZTD 异常时段与厄 尔尼诺事件存在对应关系.东部型指数  $(I_{\rm FP})$ 与 GNSS ZTD 呈正相关;中部型指数  $(I_{CP})$ 与 GNSS ZTD 呈显著负相关.在东部 型厄尔尼诺事件的影响下, GNSS ZTD 的 季节性周期增大,月周期和半月周期减 小;在中部型厄尔尼诺事件的影响下, GNSS ZTD 的季节性周期、月周期、半月周 期都减小.研究结果可为掌握区域 GNSS ZTD 预测变化规律提供参考,并为利用水 汽感知厄尔尼诺事件提供可行性基础. 关键词

全球导航卫星系统(GNSS);天顶对 流层总延迟(ZTD);厄尔尼诺;东部型指 数;中部型指数;京津冀地区

中图分类号 P412.2 文献标志码 A

#### 收稿日期 2020-12-29

**资助项目** 天津市自然科学基金(17JCYBJC21 600)

#### 作者简介

王勇,男,博士,教授,主要从事 GNSS 气 象学研究.wangyongjz@126.com

于腾丽(通信作者),女,硕士生,主要从 事 GNSS 气象学研究.2318862770@ qq.com

#### 0 引言

近年来,全球极端天气气候事件增加,京津冀地区暴雨天气频繁 发生,造成严重的经济损失和社会影响.厄尔尼诺事件是高于气候噪 声水平的全球大气和海洋相互耦合的信号,厄尔尼诺事件发生时,热 带海洋温度偏高,通过海洋和大气相互作用会改变正常的大气环流, 从而导致全球气候异常[1].京津冀地区位于东亚季风区,东亚夏季风 和冬季风的异常直接导致该地区的气候异常,厄尔尼诺事件通过大 气环流以"遥相关"的形式影响东亚季风系统[2].由于中部型厄尔尼 诺事件和东部型厄尔尼诺事件的不同海温异常分布型所产生的大气 响应不同,它们对气候的影响也有很大差异<sup>[3]</sup>.国内外学者针对两种 分布型厄尔尼诺对降水量的影响做了大量研究[47],不同分布型厄尔 尼诺对中国的部分地区降水存在相反影响.水汽(可降水量,PWV)是 地球大气的重要组成成分,是引发暴雨灾害的关键要素之一,在大气 能量传输和天气系统演变中起着重要作用[8].厄尔尼诺事件是引起东 亚季风水汽输送异常和旱涝发生的关键要素[9].水汽作为形成灾害性 天气的重要因子,对厄尔尼诺事件存在一定响应.来自西太平洋地区 的水汽输送是厄尔尼诺事件影响京津冀地区降水等气象因素的重要 纽带.地基 GNSS 水汽反演方法因其高精度、高时间分辨率、全天候观 测等特点,目前广泛应用于气象领域.多位学者依据全球 GNSS、探空 观测资料,采用多元回归分析、经验正交函数等方法,开展了厄尔尼 诺事件中水汽序列的各种振荡特征分析、GNSS 水汽对 ENSO 的响应 研究,表明 GNSS 水汽可用于指示 ENSO 时间的演变,探索了 GNSS 水 汽作为干旱和洪水发生的预测指标的可行性[10-13].

京津冀地区协同发展是重大国家战略,该地区水资源严重短缺, 水汽是与气候监测和全球水文循环有关的关键因素之一,有必要开 展该地区水汽时序分析及对厄尔尼诺事件的响应研究.中国大陆构造 环境监测网络(Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC)包含京津冀地区 GNSS 站点 16 个,积累了 10 余年的历史 观测数据,利用 GNSS 数据开展水汽时序分析及厄尔尼诺事件响应, 有助于拓展 CMONOC 网络的气象应用.本文将依托 CMONOC 京津冀 地区 GNSS 观测资料,开展 GNSS ZTD (Zenith Tropospheric Delay)时

<sup>1</sup> 天津城建大学 地质与测绘学院,天津,300384

<sup>2</sup> 中国地震局第一监测中心,天津,300180

序分析及对厄尔尼诺事件的响应研究.利用快速傅 里叶变换与小波变换方法从频域和时域开展 GNSS ZTD 时序分析,开展 GNSS ZTD 不同周期时序与东 部型指数(*I*<sub>EP</sub>)、中部型指数(*I*<sub>CP</sub>)比较,分析 *I*<sub>EP</sub>,*I*<sub>CP</sub> 对 GNSS ZTD 周期变化的影响.为掌握区域 GNSS ZTD(水汽)预测变化规律提供参考,并为旱涝灾害 等极端天气监测提供理论支撑.

#### 1 研究数据与研究方法

#### 1.1 研究数据

本文研究数据包括 GNSS ZTD 和厄尔尼诺事件 指数(Niño3.4 区海温距平指数、东部型指数及中部 型指数).

#### 1)GNSS ZTD 数据

GNSS 水汽数据由 GNSS 对流层延迟数据 (ZTD)反演而来.为了避免由于同期的气压和温度 数据的缺失导致 GNSS 水汽数据不完整,鉴于水汽 与 GNSS ZTD 存在较高的相关性<sup>[14]</sup>,本文利用 ZTD 代替水汽开展相应的研究.GNSS ZTD 数据来源于中 国大陆构造环境监测网络(CMONOC),包括站点名 称、站点坐标、数据时间、ZTD(单位:mm)等信息. ZTD 数据采样率为1 h.京津冀地区包含16 个 CMONOC 站点,站点分布如图1所示.由于中国地壳 运动监测网络和陆态网络建设时间不同,GNSS 站点 积累的观测资料长度不一,其中 BJFS、BJSH、JIXN 3 个站点的 ZTD 序列时间为 2008-01-01—2020-06-30, 其余站点 ZTD 序列时间为 2010-12-25—2020-06-30.

#### 2) 厄尔尼诺事件指数

厄尔尼诺事件指数包括 Niño3.4 区海温距平指数、东部型指数及中部型指数.中部型厄尔尼诺是在赤道中太平洋增暖的厄尔尼诺事件;东部型厄尔尼诺事件.由于中部型厄尔尼诺事件和东部型厄尔尼诺事件的不同海温异常分布型所产生的大气响应不同,它们对气候的影响也有很大差异<sup>[3]</sup>.图 2 为厄尔尼诺/拉尼娜事件的主要监测关键区,包括 Niňo1+2 区(90°~80°W,10°S~0°)、Niňo3 区(150°~90°W,5° S~5°N)、Niňo4 区(160°E~150°W,5°S~5°N)和 Niňo3.4 区(170°~120°W,5°S~5°N)<sup>[15]</sup>.将 Niňo3.4 区海温距平指数的 3 个月滑动平均值作为判别 ENSO 事件发生的标准(下文简称 Niňo3.4 指数 3 个月滑动平均值).Niňo3.4 区海温距平指数(SSTA)即赤道太平洋海温检测区 3.4 区的海表温度与多年气



候平均值的差.判别方法如下:Niño3.4 指数3个月 滑动平均值≥0.5 ℃,且持续至少5个月,判定为一 次厄尔尼诺事件;Niño3.4 指数3个月滑动平均值≤ -0.5 ℃,且持续至少5个月,判定为一次拉尼娜事 件.并用东部型指数( $I_{\rm EP}$ )和中部型指数( $I_{\rm CP}$ )来判定 厄尔尼诺事件的类型, $I_{\rm EP}$ 与 $I_{\rm CP}$ 由 Niño3 区海温指数 ( $I_{\rm Niño3}$ )与 Niño4 区海温指数( $I_{\rm Niño4}$ )经过简单的数学 变换获得:

$$\begin{cases} I_{\rm EP} = I_{\rm Niño3} - \alpha \times I_{\rm Niño4}, \\ I_{\rm CP} = I_{\rm Niño4} - \alpha \times I_{\rm Niño3}, \end{cases}$$
(1)

 $\alpha$ 取值如下:当 $I_{Niño3} \times I_{Niño4} > 0$ 时, $\alpha = 0.4$ ;当 $I_{Niño3} \times I_{Niño4} \leq 0$ 时, $\alpha = 0$ .

判定厄尔尼诺事件类型标准如下:事件过程中  $I_{EP} \ge 0.5 \ C$ 且持续至少3个月的类型判定为东部型 厄尔尼诺;事件过程中 $I_{CP} \ge 0.5 \ C$ 且持续至少3个 月的类型判定为中部型厄尔尼诺.若一次事件中同 时包含上述两种情况,存在两种类型间的转换,则将 事件峰值所在类型定义为事件主体类型,另一种为 非主体类型,整个事件的类型以事件主体类型为准. Niño3.4指数可由中国气象局国家气候中心网站下 载(https://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn\_enso.php? product=cn\_enso\_nino\_indices).Niño3.4指数为每月 一个观测数值,时间序列数据时间与 GNSS 测站时 间一致.Niño3.4指数3个月滑动平均值、 $I_{EP}$ 、 $I_{CP}$ 时间



图 2 热带太平洋区域海温异常监测关键区分布 Fig. 2 Distribution map of key areas for SSTA monitoring in tropical Pacific region

序列如图 3 所示.

由图3可知,2008-01—2020-06 共发生了4次厄尔尼诺事件,包括1次东部型事件与3次中部型事件.由于大部分GNSS测站从2010年开始运行,只有少数站点具有2008—2009年的数据,故难以对2009-06—2010-04发生的厄尔尼诺事件进行分析.本文将对2014-10—2016-04发生的东部型厄尔尼诺、2018-09—2019-06发生的中部型厄尔尼诺和2019-11—2020-03发生的中部型厄尔尼诺事件开展相关研究.

#### 1.2 研究方法

1)快速傅里叶变换(FFT)

快速傅里叶变换(FFT)是一种常用信号分析方法,是离散傅里叶变换的一种快速算法<sup>[16]</sup>.FFT 能将 信号在时域上无法体现的周期特征从频域上体现出 来,尤其是其周期性.本文利用加汉宁窗的 FFT 方法 提取 GNSS ZTD 的周期信号,获得 GNSS ZTD 周期变 化的规律,进而分析厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 周 期变化的影响.

#### 2) 小波变换(WT)

小波变换(WT)是一种信号的时频分析方法,通 过伸缩平移运算对信号(函数)逐步进行多尺度细 化,可聚焦到信号的任意细节.小波分层会分解出低 频项和高频项,其中低频部分主要包含一些确定性 因素,反映数据的宏观演变趋势,高频部分主要包括 周期、噪声干扰、异常突变和随机波动等.通过时间 序列长度来判断应分层数,分层合格的标准为低频 信号曲线呈趋势单一的曲线.将信号进行小波分层 后,可获得每层对应周期的变化情况.小波函数 DbN 系列小波随着阶次增加,消失矩阶数增加,频带划分



的效果更好.本文选择紧支撑标准正交小波 DbN 小 波系<sup>[17]</sup>,将 GNSS ZTD 数据分为 18 层,其中 D1 ~ D18 层为高频项,A18 层为低频项,D11、D12、D13 分 别对应了季节、半年和年的周期变化.

#### 2 GNSS ZTD 时序分析

首先利用 FFT 方法从频域上分析 GNSS ZTD 的显著变化周期,再利用小波变换的方法分析各显著 周期的具体变化,探究 GNSS ZTD 时序特征变化与 厄尔尼诺事件的对应关系.

#### 2.1 GNSS ZTD 频域分析

利用 FFT 方法分析各站点 GNSS ZTD 的显著变 化周期,由于篇幅限制,以北京十三陵(BJSH)、天津 蓟县(JIXN)2个站点为例,绘制 GNSS ZTD 显著变 化周期曲线,结果如图4所示.

由图 4 FFT 频域分析可知, GNSS ZTD 存在显著的 1 年、1/2 年、1/3 年、1/4 年等变化周期.对于各显著变化周期的各周期间的变化情况, 从频域无法体现, 故利用小波变换方法对 GNSS ZTD 时间序列开展时域分析.

#### 2.2 GNSS ZTD 时域分析

为了探究 GNSS ZTD 各显著周期的具体变化情况,利用小波变换的方法提取 GNSS ZTD 的年周期、 半年周期及季节性变化周期对应的高频项.根据 GNSS ZTD 时间序列的小时采样率,获得 GNSS ZTD 年变化、半年变化和季节变化周期分别对应了小波 变换的 D13、D12、D11 层高频项.图 5 和图 6 分别为 BJSH、JIXN 站点年变化、半年变化、季节变化高频项 与 *I*<sub>EP</sub>、*I*<sub>CP</sub>的比较.

由图 5、图 6 可知, GNSS 站点的季节性周期、半

年周期、年周期变化与不同时段发生的厄尔尼诺事件存在对应关系.对于 BJSH 站点:季节性周期变化显示出 GNSS ZTD 在 2018 年的夏季出现异常峰值,这与 2018-09—2019-06 发生的厄尔尼诺事件存在对应关系;半年周期变化情况显示 GNSS ZTD 在 2009年与 2016 年的夏季出现异常峰值,与 2009-06—2010-04 和 2014-10—2016-04 发生的两次厄尔尼诺事件存在对应关系;年周期变化情况显示 GNSS ZTD 在 2019年夏季出现异常峰值,这与 2018-09—2019-06 发生的厄尔尼诺事件存在对应关系.JIXN 站点的GNSS ZTD 序列各显著周期峰值的出现时间与厄尔尼诺事件发生时间对应情况,与 BJSH 站点对应情况基本相同.综合各站点 GNSS ZTD 时序分析结果得出结论:GNSS ZTD 异常波动出现的时间与厄尔尼诺事件存在对应关系.

#### 3 厄尔尼诺指数与 GNSS ZTD 相关性分析

将京津冀地区 CMONOC 16 个站点的 GNSS ZTD 时间序列与同期的厄尔尼诺指数( $I_{EP}$ 、 $I_{CP}$ )开展相关 性分析.由于篇幅限制,综合站点分布情况以及数据 完整性考虑,以 BJSH 和 JIXN 站点为例,绘制了厄尔 尼诺指数( $I_{EP}$ 、 $I_{CP}$ )与 GNSS ZTD 时间序列的对比, 如图 7 所示.

由图 7 可知, GNSS ZTD 与厄尔尼诺指数( $I_{\rm EP}$ 、  $I_{\rm CP}$ )存在较为明显的周期差异.由图 4 可知 GNSS ZTD 存在明显的年、半年、季节性变化周期,除此之 外,在(0,12)频率区间内它还存在诸多其他变化周 期,而  $I_{\rm EP}$ 、 $I_{\rm CP}$ 指数的周期从图 7 中难以获得.利用 FFT 方法提取  $I_{\rm EP}$ 、 $I_{\rm CP}$ 指数的显著变化周期,图 8 为  $I_{\rm EP}$ 、 $I_{\rm CP}$ 指数在(0,4)频率区间的显著周期.



Fig. 4 GNSS ZTD frequency domain cycle, (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station







Fig. 6 Comparison of GNSS ZTD high frequency term time series with  $I_{\rm EP}$  and  $I_{\rm CP}($ at JIXN station),(a) seasonal cycle,(b) half-year cycle,and (c) annual cycle



图 7 GNSS ZTD 与厄尔尼诺指数(I<sub>EP</sub>、I<sub>CP</sub>)比较

Fig. 7 Comparison between GNSS ZTD and El Niño index  $(I_{EP}, I_{CP})$ , (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station

由图 8 可知, *I*<sub>EP</sub>、*I*<sub>CP</sub>指数的显著变化周期存在于 (0,1)频率区间内, 但在图中无法精确判断.提取 *I*<sub>EP</sub>、 *I*<sub>CP</sub>的所有变化周期及其对应峰值, 并基于峰值的大小 筛选出了最为显著的 4 个变化周期, 如表 1 所示.



Fig. 8 Frequency domain cycle of  $I_{\rm EP}$  and  $I_{\rm CP}$ 

表1 各厄尔尼诺指数显著变化周期

Table 1	Significant	change	period	of	El	Niño	index
	<i>(</i> )	• • •					

七物米田	周期/年					
相奴矢型	显著周期1	显著周期 2	显著周期3	显著周期4		
I <sub>CP</sub>	5.99	1.22	2.85	1.58		
$I_{\rm EP}$	3.33	6.65	1.52	1.17		

表1为各厄尔尼诺指数在(0,1)频率区间内最显著的4个变化周期.综合以上分析结果,为了合理 探究 GNSS ZTD 与厄尔尼诺事件的相关性,利用小 波变换的方法对 GNSS ZTD 进行分层,筛选出各指 数显著周期所对应的高频项进行重构,利用重构后 的 GNSS ZTD 与各指数进行相关性分析.各指数的4 个显著变化周期分别对应周期小波变换中 D16、 D15、D14、D13 层对应周期范围.利用小波变换分析 GNSS ZTD,提取其 D13~D16 层高频项并进行重构, 截选出东部型与中部型两类不同分布型厄尔尼诺发 生时段的 GNSS ZTD,分别与 *I*<sub>EP</sub>和 *I*<sub>CP</sub>进行相关性分 析,探究不同分布类型厄尔尼诺对 GNSS ZTD 的影 响.BJSH 和 JIXN 站点的相关性分析结果如图 9 所 示,其余各站点相关性分析结果如表 2 所示.

由图 9 和表 2 可知:东部型指数(*I*<sub>EP</sub>)与 GNSS ZTD 呈正相关,即东部型厄尔尼诺发生期间,随着 *I*<sub>EP</sub>增大,GNSS ZTD 也随之升高;中部型指数(*I*<sub>CP</sub>)与 GNSS ZTD 呈负相关,且 2019-11—2020-03 时段相关 性优于 2018-09—2019-06 时段的相关性,即中部型 厄尔尼诺发生期间,GNSS ZTD 相比于正常气候会减 少,且短时段内相关性优于长时段.推测其原因为:





Fig. 9 Comparison of reconstructed GNSS ZTD and El Niño index (I<sub>EP</sub>, I<sub>CP</sub>), (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station

表 2 GNSS ZTD 与厄尔尼诺指数 $(I_{EP}, I_{CP})$ 的相关性

Table 2 Correlation between GNSS ZTD and El Niño Index $(I_{\rm EP}, I_{\rm CP})$								
站点	GNSS ZTD/ $I_{\rm EP}$	GNSS ZTD/ $I_{CP1}$	GNSS ZTD/ $I_{\rm CP2}$	站点	GNSS ZTD/ $I_{\rm EP}$	GNSS ZTD/ $I_{CP1}$	GNSS ZTD/ $I_{\rm CP2}$	
BJFS	0. 665	-0.511	-0.536	HECC	0. 344	-0.310	-0.882	
BJGB	0. 199	-0.278	-0.931	HECD	0.314	-0.314	-0.926	
BJSH	0.614	-0.413	-0.470	HECX	0.327	-0.276	-0.913	
BJYQ	0.608	-0.450	-0.243	HELQ	0.030	-0.307	-0.889	
JIXN	0. 587	-0.506	-0.426	HELY	0.397	-0.501	-0.791	
TJBD	0. 229	-0.271	-0.912	HETS	0. 423	-0.448	-0.844	
TJBH	0.384	-0.405	-0.838	HEYY	0.261	-0.273	-0.923	
TJWQ	0.094	-0.328	-0.902	HEZJ	0.470	-0.429	-0.831	

注:*I*<sub>EP</sub>对应时间为 2014-10—2016-04,*I*<sub>CP1</sub>对应时间为 2018-09—2019-06,*I*<sub>CP2</sub>对应时间为 2019-11—2020-03.

东部型厄尔尼诺年太平洋副热带高压偏强,水汽输送条件较强,有利于将来自太平洋蒸发的大量水汽持续输送至中国<sup>[18]</sup>.

### 4 厄尔尼诺对 GNSS ZTD 变化周期的影响

由上文分析可知, GNSS ZTD 存在显著的年周 期、半年周期、季节性周期等.现利用加汉宁窗的快 速傅里叶变换对正常气候和两类分布型厄尔尼诺事 件下 GNSS ZTD 数据进行对比分析, 探究 GNSS ZTD 在正常气候和两类分布型厄尔尼诺事件下这些显著 周期的差异.由于图 4 仅显示了 GNSS ZTD(0,12)频 率区间内的显著周期, 且显著的年周期、半年周期对 其他周期的分析造成了干扰, 故重新调整 X 轴和 Y 轴的取值范围, 排除了年周期的干扰, 截选了(0,30) 频率区间分析 GNSS ZTD 其他显著变化周期, 其中 BJSH、JIXN 站点的分析结果如图 10 所示.

由图 10 可知, GNSS ZTD 存在 1 年周期、1/2 年周 期、1/3 年周期和 1/4 年周期, 频率区间(1/12,1/15) 内的 1 个月左右周期以及频率区间(1/22,1/24)内的 半月左右周期.由于利用 FFT 分析年变化周期至少需 要 2 年的时间长度, 而厄尔尼诺事件持续的最长时间 长度为 19 个月, 限制了对年周期、半年周期变化的分 析.故本文将基于 FFT 对厄尔尼诺事件与正常气候下 GNSS ZTD 的季节性周期、1 个月周期以及半个月周 期的变化进行对比分析, 探究不同分布型厄尔尼诺事 件对 GNSS ZTD 显著变化周期的影响.

# 4.1 东部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 周期变化 的影响

为研究东部厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 周期变 化影响,选取两个正常气候时段与一个厄尔尼诺事 件时段(2014-10—2016-04)进行对比分析.此次厄尔

尼诺事件持续时间较长,历时19个月,在所研究时 间序列范围中只有一段正常气候的时间序列与之恰 好对应,即2014-10—2016-04.为了确保分析结果的 准确性,从该东部型厄尔尼诺事件时间序列中截取 了 12 个月的时间长度:2015-05—2016-04,与正常气 候时段 2016-05-2017-04 进行了对比分析.利用 FFT 的方法分析 3 个时间段内 GNSS ZTD 的变化周期, 由于是对季节变化周期、月周期与半月周期进行分 析,频率单位选用 cpm.截选(0.1,3)频率区间即周期 范围为大于 1/3 个月小于 10 个月,对 GNSS ZTD 的 季节性周期、月周期和半月周期进行对比,获得 GNSS ZTD 在有无东部型厄尔尼诺事件这两种情况 下周期的变化差异.判断季节性周期、月周期和半月 周期的标准为:选取最接近 1/3、1、2 这 3 个频率的 最高峰值所对应的周期.BJSH 和 JIXN 站点分析结 果如图 11 所示.

由图 11 可看出,东部型厄尔尼诺事件下的 GNSS ZTD 变化周期与正常气候下的 GNSS ZTD 变 化周期存在明显差异.由于从图中无法判断变化周 期的精确值,提取两种气候类型下的 GNSS ZTD 的 频率与周期.两种气候下各站点 GNSS ZTD 季节性变 化周期对比结果如表 3 所示,其中正常气候 1 指 2012-10—2014-04 正常气候时段;厄尔尼诺 1 指 2014-10—2016-04 厄尔尼诺事件发生时段;正常气候 2 指 2016-05—2017-04 正常气候时段;厄尔尼诺 2 指 2015-05—2016-04 厄尔尼诺事件发生时段.

表 3 给出了各站点在东部型厄尔尼诺事件下的 GNSS ZTD 季节周期相比于正常气候的变化情况.由 于篇幅限制,将东部型厄尔尼诺事件下与正常气候 下 GNSS ZTD 的月周期和半月周期的比较结果以站 点分布的形式体现,如图 12 所示.



Fig. 10 GNSS ZTD frequency domain analysis results based on FFT, (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station



图 11 东部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 变化周期的影响 Fig. 11 Influence of EP-El Niño event on GNSS ZTD cycle, (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station

#### 表 3 东部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 季节变化周期的影响(单位:月)

Table 3	Influence	of EP-El	Niño	events	on sea	isonal
variat	tion cycles	of GNSS	ZTD	(unit;	month	)

		-						
		变化1			变化 2			
站点	正常 气候1	厄尔 尼诺 1	变化 情况	正常 气候 2	厄尔 尼诺 2	变化 情况		
BJFS	2.077	2.456	<b>↑</b>	2.648	3.632	1		
BJGB	2.075	2.511	1	2.657	3.641	Ť		
BJSH	2.045	2.468	1	2.643	3.587	Ť		
BJYQ	2.063	2.498	1	2.624	3. 596	Ť		
JIXN	2.174	2.456	Î	2.643	3.605	Ť		
TJBD	2.174	2.439	1	2.658	3.578	Ť		
TJBH	2.183	2.427	1	2.672	3.535	Ť		
TJWQ	2.117	2.477	Î	2.658	2.485	$\downarrow$		
HECC	2.014	2.515	Î	2.610	3.623	Ť		
HECD	2.132	2.477	Î	2. 591	3.659	Ť		
HECX	1.848	2.411	Î	2.653	3.526	Ť		
HELQ	2.460	2.489	Î	2.833	2.966	Ť		
HELY	2.435	2.407	$\downarrow$	2.653	3.501	Ť		
HETS	2.210	2.439	Î	2.884	0.369	Ť		
HEYY	2.083	2.582	Î	2.502	3. 509	Ť		
HEZJ	2.415	2.507	Ť	2.895	2.111	$\downarrow$		

由表 3、图 12 可知,京津冀地区 GNSS ZTD 在东 部型厄尔尼诺事件的影响下,季节性变化周期增大, 月周期和半月周期都减小(个别站点由于部分数据 缺失导致分析结果异常).

# 4.2 中部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 周期变化 的影响

以中部型厄尔尼诺事件(2018-09—2019-06)开 展其对 GNSS ZTD 的周期变化影响分析.为研究中部 型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 周期变化影响,选取两个正常气候时段(2012-09—2013-06和 2016-09—2017-06)与厄尔尼诺事件时段进行比较,分析季节周期、月周期、半月周期的变化.利用 FFT 法提取GNSS ZTD 变化周期,获得 GNSS ZTD 在有无中部型厄尔尼诺事件这两种情况下周期的变化差异,如图13 所示.

由图 13 可知,中部型厄尔尼诺事件下的 GNSS ZTD 变化周期与正常气候下的 GNSS ZTD 变化周期 存在明显差异.由于从图中无法判断变化周期的精 确值,提取两种气候类型下的 GNSS ZTD 的频率与 周期.由于篇幅限制将中部型厄尔尼诺事件下与正 常气候下 GNSS ZTD 的季节性周期、月周期和半月 周期的对比结果以站点分布的形式体现,结果如图 14 所示.

由图 14 可知,京津冀地区 GNSS ZTD 在中部型 厄尔尼诺事件的影响下季节周期、月周期和半月周 期相比于正常气候都减小.

#### 5 结论

本文利用 FFT 与小波变换方法开展了京津冀地 区 GNSS ZTD 时序分析,及其对两类分布型厄尔尼 诺事件的响应研究.获得结论如下:

1)由 GNSS ZTD 频域和时域分析结果可知, GNSS ZTD 异常时段与厄尔尼诺事件存在对应关系.

2) 东部型指数( $I_{EP}$ ) 与 GNSS ZTD 呈正相关; 中 部型指数( $I_{CP}$ ) 与 GNSS ZTD 呈显著负相关.

3)在东部型厄尔尼诺事件的影响下,GNSS ZTD 的季节性周期增大,月周期和半月周期减小;在中部 型厄尔尼诺事件的影响下,GNSS ZTD 的季节性周 期、月周期、半月周期都减小.



Fig. 12 Influence of EP-El Niño events on monthly (a) and half-monthly (b) variation cycles of GNSS ZTD



图 13 中部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 变化周期的影响

### Fig. 13 Influence of CP-El Niño event on GNSS ZTD cycles, (a) at BJSH station, and (b) at JIXN station

### 参考文献

References

- [1] 任福民,袁媛,孙丞虎,等.近 30 年 ENSO 研究进展回顾[J].气象科技进展,2012,2(3):17-24
   REN Fumin,YUAN Yuan,SUN Chenghu, et al.Review of ENSO research progress in recent 30 years[J].Advances in Meteorological Science and Technology, 2012,2(3): 17-24
- [2] 袁媛,杨辉,李崇银.不同分布型厄尔尼诺事件及对中 国次年夏季降水的可能影响[J].气象学报,2012,70
   (3):467-478

YUAN Yuan, YANG Hui, LI Chongyin. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 467-478

[3] 吴萍,丁一汇,柳艳菊.厄尔尼诺事件对中国夏季水汽 输送和降水分布影响的新研究[J].气象学报,2017, 75(3):371-383

WU Ping, DING Yihui, LIU Yanju. A new study of El Niño impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75 (3):371-383

- [4] Cao Q, Hao Z C, Yuan F F, et al. Impact of ENSO regimes on developing-and decaying-phase precipitation during rainy season in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21 (11):5415-5426
- [5] 袁帅,徐建军,潘裕山.超强 El Niño 事件的多样性及 其对东亚夏季风降水的影响[J].热带气象学报, 2019,35(3):379-389

#### 前京信息工行大学学报(自然科学版),2021,13(2):170-180 Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition),2021,13(2):170-180



图 14 中部型厄尔尼诺事件对 GNSS ZTD 季节、月和半月变化周期的影响

Fig. 14 Influence of CP-El Niño events on seasonal (a), monthly (b) and half-monthly (c) variation cycles of GNSS ZTD

YUAN Shuai, XU Jianjun, PAN Yushan. Diversity of super El Niño events and their impact on east Asian summer monsoon precipitation [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(3): 379-389

[6] 庞铁舒,秦宁生,王春学,等.ENSO 事件的季节演变对 西南夏季降水异常的影响分析[J].高原气象,2020, 39(3):581-593

> PANG Yishu, QIN Ningsheng, WANG Chunxue, et al. Analysis on the impact of ENSO events seasonal evolution on summer rainfall anomalies in southwest China [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3):581-593

[7] 王欢,李栋梁.气候变暖背景下全球海温对中国东部 夏季降水年代际转折的影响[J].热带气象学报, 2019,35(3):398-408 WANG Huan, LI Dongliang. The impacts of global sea

surface temperature on decadal transitions of summer precipitation over Eastern China at global warming transition points[J].Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35 (3):398-408

- [8] 王勇,刘严萍.地基 GPS 气象学原理与应用研究[M]. 北京:测绘出版社,2012
   WANG Yong, LIU Yanping. Theory and application of ground-based GPS meteorology[M]. Beijing: China Surveying and Mapping Press,2012
- [9] 王苗,郭品文,邬昀.ENSO 对我国东部极端降水的季 节影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(6): 808-816 WANG Miao,GUO Pinwen,WU Yun.Impact of ENSO on

the seasonal extreme rainfall over eastern China [J].Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (6):808-816

[10] Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q, et al.Near-global GPS-derived PWV and its analysis in the El Niño event of 2014-2016 [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, 179:69-80

- [11] Wang X M, Zhang K F, Wu S Q, et al. The correlation between GNSS-derived precipitable water vapor and sea surface temperature and its responses to El Niño-Southern Oscillation [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216:1-12
- [12] 马雄伟,赵庆志,姚顽强,等.PWV 对全球气候变化的 响应研究[J].测绘通报,2019(增1):54-59
   MA Xiongwei, ZHAO Qingzhi, YAO Wanqiang, et al. PWV response to global climate change[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2019(sup1):54-59
- [13] Zhao Q Z, Liu Y, Yao W Q, et al. A novel ENSO monitoring method using precipitable water vapor and temperature in southeast China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(4):649
- [14] 王勇,娄泽生,刘严萍,等.中国 IGS 站点 ZTD 长时序 特征及其与年降水量的关系研究[J].大地测量与地 球动力学,2019,39(10):1037-1040,1085
  WANG Yong, LOU Zesheng, LIU Yanping, et al. ZTD long time series characteristics of IGS stations in China and their relationship with annual precipitation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1037-1040,1085
- [15] 国家气候中心,中国气象科学研究院.厄尔尼诺/拉尼 娜事件判别方法:GB/T 33666—2017[S].北京:中国 标准出版社,2017
   National Climate Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences. Identification method for El Niño/La Niña events:GB/T 33666 - 2017[S]. Beijing: China Standards Press,2017
- [16] Rao K R, Kim D N, Hwang J J.快速傅里叶变换:算法 与应用[M].万帅,译.北京:机械工业出版社,2013
   Rao K R, Kim D N, Hwang J J.Fast Fourier transform: algorithms and applications [M]. Translated by WAN Shuai.Beijing: China Machine Press,2013
- [17] 何思源,李贵元,刘华姣,等.最优小波基选择法在测

震数据干扰处理中的研究与应用[J].华南地震, 2019, 39(3):49-56

mology, 2019, 39(3):49-56

HE Siyuan, LI Guiyuan, LIU Huajiao, et al. Application and research of optimal wavelet base selection method in seismic data processing [J]. South China Journal of Seis[18] Askne J, Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J].Radio Science, 1987,22(3):379-386

## GNSS ZTD time series in Beijing-Tianjin-Hebei region and their response to El Niño events

WANG Yong<sup>1</sup> YU Tengli<sup>1</sup> LIU Xiao<sup>1</sup> ZHAN Wei<sup>2</sup>

1 School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384

2 The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180

**Abstract** Summer rainstorms occur frequently in Beijing-Tianjin-Hebei region. As one of the key factors affecting the formation of heavy rain, precipitable water vapor has been recognized as highly correlated with the Global Navigation Satellite Systems Zenith Tropospheric Delay (GNSS ZTD). In this study, the time series of GNSS ZTD and their response to El Niño events were analyzed based on GNSS observations in Beijing-Tianjin-Hebei region. Fast Fourier transform and wavelet transform were used to carry out GNSS ZTD timing sequence analysis from frequency domain and time domain, and the time sequence of GNSS ZTD with different periodicity was compared with the Eastern-Pacific types of El Niño index ( $I_{EP}$ ) and the Central-Pacific types of El Niño index ( $I_{CP}$ ). The results showed that there was a corresponding relationship between the abnormal period of GNSS ZTD and El Niño events. Specifically, the GNSS ZTD was positively correlated with  $I_{EP}$ , and significantly negatively correlated with  $I_{CP}$ . Under the influence of  $I_{EP}$ , the GNSS ZTD increased in seasonal cycle, but decreased in monthly cycle, and half-monthly cycle. The above results can provide reference for regional GNSS ZTD variation analysis, and provide a reliable basis for sensing El Niño events with precipitable water vapor.

**Key words** Global Navigation Satellite Systems (GNSS); zenith tropospheric delay (ZTD); El Niño; Eastern-Pacific types of El Niño index; Central-Pacific types of El Niño index; Beijing-Tianjin-Hebei region