



# 基于小波相干的雾霾与 GNSS 对流层 延迟相关性分析

姚宜斌<sup>1</sup> 罗亦泳<sup>1,2</sup> 张静影<sup>2</sup> 赵纯洁<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌,330013

**摘要:**为了进一步揭示雾霾与对流层延迟相关性的细部特征,基于小波相干算法构建雾霾与天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)相关性分析的新方法,有效地分析了雾霾与 ZTD 相关性的时频空间分布特征及成因。首先,通过分析 IGS(internet GNSS service)北京站 2014—2017 年每个月的 ZTD 与量化评定雾霾的空气质量指数(air quality index, AQI)的相关系数,发现两者在月尺度上相关系数绝对值大于 0.4 的比率占 29.17%,宏观上显示了两者具有相关性。其次,采用小波相干的方法分析了北京 2014—2017 年期间年度 ZTD 与 AQI 的相关性,发现 ZTD 与 AQI 在一定的时频域上具有很强的相关性,并且通过了 95% 置信度检验。最后,由北京、长春部分时域的 ZTD 与 AQI 相关性分析可知,北京 3 月份 ZTD 与 AQI 总体上呈现正相关,并且 AQI 与温度、气压、湿度和风速具有较好的相关性;在研究时域内秸秆燃烧加剧了北京、长春的雾霾,进而影响对流层延迟。

**关键词:**雾霾;对流层延迟;小波相干;空气质量指数

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

雾霾是雾和霾的组合,近年来,人类活动造成的颗粒物排放增加,环境与气象条件引起的天气恶化等导致全国各地雾霾天气频发。雾霾及大气污染物主要集中在近地大气,雾霾污染不仅对空气质量有严重的影响,而且对人类的健康也有巨大的危害<sup>[1]</sup>。目前,观测者主要利用气象站监测雾霾的变化,但气象站数量有限且空间分布不均匀,难以实现雾霾天气的实时监测与预报。随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的快速发展,GNSS 在数值天气预报领域取得了较好的效果,并且正在积极开展 GNSS 天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)在雾霾监测与预报方面的应用研究。在雾霾爆发过程中,空气中颗粒物含量的急增必然引起 GNSS 对流层延迟的变化。有效掌握对流层延迟的变化规律,GNSS 可构建雾霾天气监测新途径。因此,深入研究雾霾与 ZTD 之间复杂的相关性,是实现雾霾监测、预报及成因分析的基础,具有重要的现实意义。

近年来,国内外许多学者积极开展雾霾与对

流层延迟的相关性研究。Solheim 等<sup>[2]</sup>研究了大气中水蒸气、水凝物和其他微粒(沙子、尘埃、气溶胶和火山灰)对 GNSS 信号传播的影响,结果表明水汽、云液、雨和沙尘暴的传播延迟对 GNSS 精密定位有重要的影响。Stoycheva 等<sup>[3]</sup>利用 GNSS 研究了雾的形成、发展和消散过程。王勇等<sup>[4]</sup>采用北京市全球定位系统(Global Positioning System, GPS)连续观测网数据分析雾霾与 ZTD 的变化,结果表明雾霾与 ZTD 同步变化。陈林等<sup>[5]</sup>利用 GPS/GLONASS 组合的精密单点定位技术监测北京雾霾对 ZTD 的影响,表明日均雾霾变化与天顶对流层延迟变化趋势一致。潘文超等<sup>[6]</sup>研究了中国境内 4 个 IGS 站 30 d ZTD 与量化评定雾霾的空气质量指数(air quality index, AQI)的变化趋势,表明 ZTD 与 AQI 有着较强的相关关系。以上文献主要基于回归分析、相关系数分析、图表相关分析等方法研究雾霾、对流层延迟及其他影响因素之间的相关性,宏观上指出了雾霾与对流层存在较强的相关关系。由于雾霾变化与对流层延迟响应之间存在明显的时频空间分

布特征,这些特征的挖掘有助于进一步分析两者相关性的细部特征及成因解释。因此,从时频空间分布角度开展雾霾与ZTD的相关性研究十分必要。

小波相干是基于小波变换提出的两个时间序列在时频域中的相互关系的新方法,可以揭示不同时段不同频率尺度上的一致性和相关性,能再现时频空间中的相位关系,并且通过红色噪音标准谱的检验,验证结果的可靠性。小波相干谱能从时频空间中挖掘两个时间序列局部相干的密切程度<sup>[7]</sup>,较好地度量低能量区域两者的显著相关性。因此,小波相干谱的分析方法在区域气候分析<sup>[8]</sup>、水文分析<sup>[9]</sup>、地球物理分析<sup>[10]</sup>等领域已有广泛的应用,但是小波相干用于雾霾与对流层延迟的相关性研究还未得见。本文利用国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)提供的ZTD数据和量化评定雾霾的AQI数据,基于小波相干的分析方法,从多角度、多时间尺度上分析了ZTD与AQI在月尺度、年度、部分时域上的相关性及成因,并进一步揭示了两者在位相结构及细部变化的规律,为GNSS精确定位、雾霾反演以及空气质量的监测提供可靠的理论与实践依据。

## 1 ZTD、AQI与小波相干的基本概念

### 1.1 ZTD概念

对流层位于大气层的最低层,紧靠地球表面,对流层延迟是影响GNSS导航定位精度的主要因素之一。ZTD与测站所处的位置、气压、温度和湿度有着密切的关系。近年来兴起的GNSS气象学通过计算大气折射量来反演大气中的水汽分布,进行气象学研究和天气预报<sup>[11-12]</sup>。国内外关于对流层延迟模型的研究成果颇为丰富,如经验模型包括Hopfield模型<sup>[13]</sup>、Saatamoinen模型<sup>[14]</sup>等。目前,天顶对流层延迟产品用于空气质量监测和预报的研究还处于发展阶段,本文使用IGS站提供的测站高精度天顶对流层延迟产品,部分缺失数据使用三次样条插值得到。所谓三次样条插值就是将原始长序列分割成若干段,构建多个三次函数,使得分段的衔接处具有二阶导数连续的性质。

### 1.2 AQI指标定量描述雾霾变化的有效性

雾霾天气是一种大气污染状态,雾是由许多悬浮在近地大气中的小水滴组成的气溶胶,霾是空气中水汽凝结的产物,其中PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>被认为

是造成雾霾天气的主要原因<sup>[15-16]</sup>。AQI是定量描述空气质量状况的无量纲指数,它综合考虑了SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO、O<sub>3</sub>等6项污染物的污染情况,空气质量综合指数越大,表明综合污染程度越重<sup>[17]</sup>。其计算过程为:首先计算每一项污染物的单项质量指数,然后将6项污染物的单项质量指数相加,即得到空气质量综合指数。AQI计算时会利用PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的数据,所以AQI与两者间都存在较高的相关性。本文通过计算北京、长春2015年AQI与PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>之间的相关系数,验证AQI指标定量描述雾霾变化的有效性。其中,北京AQI与PM<sub>2.5</sub>的相关系数为0.95,AQI与PM<sub>10</sub>的相关系数为0.78,相关系数均大于0.7。长春AQI与PM<sub>2.5</sub>的相关系数为0.91,AQI与PM<sub>10</sub>的相关系数为0.93,相关系数均大于0.9。由于雾霾形成的主要原因是PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>,研究ZTD与AQI的相关性能很好地表示ZTD与雾霾的相关关系。AQI数据可以从中国空气质量在线监测分析平台(<http://www.aqistudy.cn/>)获取。

### 1.3 小波相干

小波相干谱可以用来度量时频空间中两个时间序列局部相关的密切程度<sup>[4]</sup>。小波相干谱的显著性检验采用Monte Carlo方法,本文对小波相干谱只标出了 $R_n^2(s) \geq 0.5$ 的位相变化。AQI和ZTD时间序列分别用X、Y表示,定义AQI和ZTD的小波相干谱为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(|s^{-1}W_n^X(s)|^2) \cdot S(|s^{-1}W_n^Y(s)|^2)} \quad (1)$$

式中,S是平滑器;s为伸缩尺度; $W_n^X(s)$ 、 $W_n^Y(s)$ 分别为X、Y的小波变换; $W_n^{XY}(s)$ 为交叉小波谱。

## 2 ZTD与AQI的相关性分析

本文选取中国空气质量在线监测分析平台发布的城市日平均AQI和IGS站的日平均ZTD数据,采用相关系数、小波相干两种分析方法研究了AQI和ZTD的月尺度、年度、部分时域的相关性及成因。

### 2.1 ZTD与AQI月尺度相关性分析

Pearson相关系数可以有效地从宏观角度反映两变量之间的相关关系。相关系数的绝对值越大,两变量之间的相关性越强,相关系数越接近于1或-1时,表示相关度越强;相关系数越接近0时,表示相关度越弱。通过相关系数的绝对值取

值范围可以判断变量的相关强度<sup>[18]</sup>。

由于雾霾与对流层延迟受多种因素的影响,为了细致分析 ZTD 与 AQI 在月尺度上的相关性及成因,选取了 2014—2017 年 IGS 北京站的 ZTD 与 AQI 数据,以月为时间尺度分析两者的相关性。所谓月尺度,就是针对两个变量相对应的一个月的日均数据进行处理分析。采用 Pearson 相关系数分析 ZTD 与 AQI 在月尺度上的相关性(表 1)。

表 1 不同年份月尺度的 ZTD 与 AQI 相关系数

Tab. 1 Correlation Between ZTD and AQI on the Monthly Scale in Different Years

月份	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1 月	0.396	0.106	0.110	0.448
2 月	0.462	-0.099	0.459	-0.232
3 月	0.352	0.443	0.109	0.712
4 月	-0.047	0.130	0.254	0.447
5 月	0.513	0.550	-0.006	-0.124
6 月	0.483	0.528	0.189	0.111
7 月	0.140	-0.070	-0.427	-0.534
8 月	0.092	-0.281	0.222	0.286
9 月	0.465	-0.147	0.341	0.589
10 月	-0.062	0.258	-0.244	0.194
11 月	0.125	-0.192	-0.262	0.342
12 月	-0.010	0.250	-0.086	0.109

由表 1 可知,2014 年 2 月、5 月、6 月、9 月,2015 年 3 月、5 月、6 月,2016 年 2 月,2017 年 1 月、3 月、4 月、9 月,ZTD 与 AQI 的相关性为正相关,相关系数均大于 0.4;2016 年 7 月、2017 年 7 月,ZTD 与 AQI 的相关性为负相关,相关系数均小于 -0.4。2014—2017 年,北京 ZTD 与 AQI 相关系数绝对值大于 0.4 的比率占 29.17%,ZTD 与 AQI 在一定的月尺度上具有相关关系。北京地势西北高、东南低,且冬季多为东北风,结合北京的地理条件以及主要农作物,寒流、气温变化、降雨、秸秆燃烧可能会对 ZTD 与 AQI 的相关性有一定影响。

## 2.2 AQI 与 ZTD 年度相关性分析

为了更好地分析 ZTD 与 AQI 在时频域上的相关性、细部特征及变化规律,分别选取了 2014—2017 年间北京市每年的空气质量指数 AQI 和 IGS 北京站 ZTD 数据,利用小波相干谱绘制 ZTD-AQI 频谱图。小波相干谱不仅可以揭示两个时间序列共同的高能量区以及位相关系,而且可以度量时频空间中两个时间序列局部相关的密切程度。为了避免小波边界效应及小波高频虚假信息,针对每一年的分析数据向两端延伸 60 d,年积日的坐标范围为 -59~425,分析范围为图 1 中

的红线区域。图 1 中粗实线区域表示通过显著性水平  $\alpha=0.05$  条件下的红噪声标准谱的检验,小波影响椎(图中细弧线)以内区域为有效谱值;箭头表示两者之间的位相关系,→ 表示 ZTD 与 AQI 同位相,说明两者为正相关关系,← 表示 ZTD 与 AQI 反位相,说明两者为负相关关系,↓ 表示 AQI 变化超前 ZTD 变化 90°(对应时间为 0.25 d),↑ 表示 AQI 变化滞后 ZTD 变化 90°。

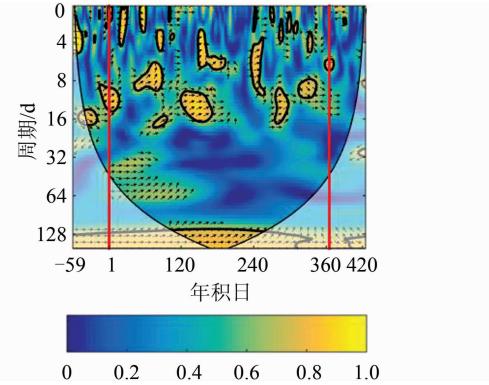


图 1 北京 2014 年 ZTD 与 AQI 小波相干谱

Fig. 1 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum in Beijing, 2014

图 1 显示,0~4 d 周期区间,两信号序列在 18~30、51~62、146~159 年积日上呈现很强的相关性,相关系数达到 0.9,通过 95% 置信度的检验(高能区,显著相关);4~8 d 周期区间,两信号序列在 50~90、148~194、234~252 年积日上呈现很强的相关性,相关系数达到 0.9,通过 95% 置信度的检验;8~16 d 周期区间,两信号序列在 1~17、119~170、239~259、277~298、313~343 年积日上呈现很强的相关性,相关系数达到 0.7,通过 95% 置信度的检验;128~167 d 周期区间,两信号序列在 106~255 年积日上呈现很强的相关性,相关系数达到 0.8,通过 95% 置信度的检验。2014 年北京 ZTD 与 AQI 在 0~16 d、128~167 d 周期区间都呈现显著的能量高值区,且图中置信度大于 95% 区域内箭头的指向基本上在 0~90°(除了 0~4 d 周期区间的 18~30、51~62 年积日,8~16 d 周期区间的 313~343 年积日)。由此可以看出,ZTD 与 AQI 在 2014 年基本上呈现正相关关系。

图 2 显示,4~8 d 周期区间,两信号序列在 328~350 年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到 0.9,通过 95% 置信度的检验;8~16 d 周期区间,两信号序列在 317~346 年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到 0.9,通过 95% 置信度的检验;16~32 d 周期区间,两信号序列在 144~

175年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.7,通过95%置信度的检验;128~167 d周期区间,两信号序列在115~276年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.8,通过95%置信度的检验。2015年北京ZTD与AQI在4~8 d、8~16 d、16~32 d、128~167 d周期区间都呈现出显著的能量高值区,且图中置信度大于95%区域内箭头的指向基本上在0~90°,由此可以看出,ZTD与AQI在2015年基本上呈现正相关关系。

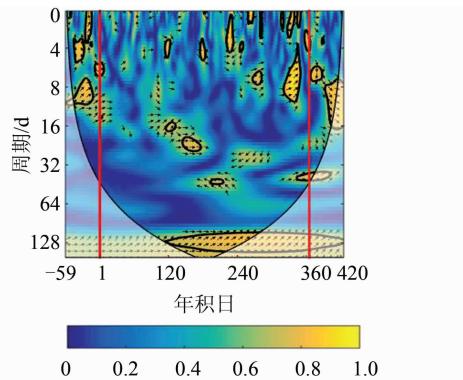


图2 北京2015年ZTD与AQI小波相干谱

Fig. 2 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum in Beijing, 2015

图3显示,0~4 d周期区间,两信号序列在78~94年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.9,通过95%置信度的检验;4~8 d周期区间,两序列在3~20、162~181、214~226、351~363年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.9,通过95%置信度的检验;8~16 d周期区间,两信号序列在130~150、222~283、343~365年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.8,通过95%置信度的检验;32~64 d周期区间,两信号序列在156~236年积日呈现出很强的相关性,相关系数达到0.7,且在图中通过95%置信度检验的区域内,箭头方向基本一致,对应的相位差在0~90°范围内。在4~8 d尺度上的214~226年积日期间、8~16 d尺度上的156~236年积日期间的箭头大致向左,呈现较强的负相关性。由表1可知,2016年7月(即182~212年积日)ZTD与AQI呈现负相关关系,小波相干谱(图3)的分析结果与传统相关系数(表1)的分析结果相吻合。由此可以看出,ZTD与AQI在2016年基本上呈现正相关关系(7月除外)。

图4显示,0~4 d周期区间,两信号序列在131~161年积日呈现很强的相关性,相关系数达到0.9,通过95%置信度的检验;4~8 d周期区间,两信号序列在75~95、170~185、200~213、

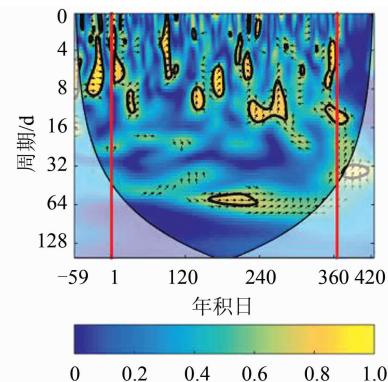


图3 北京2016年ZTD与AQI小波相干谱

Fig. 3 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum in Beijing, 2016

252~288年积日呈现很强的相关性,相关系数达到0.9,通过95%置信度的检验;8~16 d周期区间,两信号序列在66~146、164~213、258~318年积日呈现很强的相关性,相关系数达到0.8,通过95%置信度的检验;32~64 d周期区间,两信号序列在1~101年积日呈现很强的相关性,相关系数达到0.9以上,通过95%置信度的检验。在2017年期间,北京的ZTD序列与AQI序列在0~16 d、32~64 d尺度上都呈现出显著的能量高值区,并且在通过95%置信度检验的区域内,箭头的指向大部分一致,对应的相位差在0~90°范围内。图4显示,在0~4 d尺度上的137~161年积日期间、4~8 d尺度上的170~185年积日与200~213年积日期间、8~16 d尺度上的164~213年积日期间,箭头方向基本向左,呈现负相关。由表1可知,2017年7月(即182~212年积日)ZTD与AQI呈负相关关系,小波相干谱(图4)的分析结果与传统相关系数(表1)的分析结果相吻合。由此可以看出,ZTD与AQI在2017年基本上呈现正相关关系。

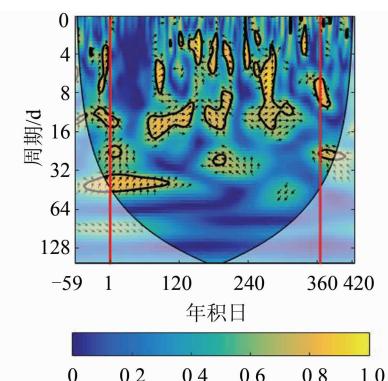


图4 北京2017年ZTD与AQI小波相干谱

Fig. 4 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum in Beijing, 2017

北京 2014—2017 年 ZTD 与 AQI 在不同尺度不同年积日上呈现出很强的相关性, 相关系数达到 0.7, 通过 95% 置信度的检验, 在一定的时间尺度上小波相干谱的分析结果与传统的相关系数的分析结果一致, 并且相关关系更加直观细致。小波相干谱可以清晰地显示 ZTD 与 AQI 的相关性特征、变化规律、AQI 提前或滞后 ZTD 的周期。

### 2.3 ZTD 与 AQI 部分时域相关性分析

为了研究气象要素、秸秆燃烧对 ZTD 与 AQI 相关性的影响。选取北京 2015 年 3 月、5 月、6 月和长春 2015 年 6 月、7 月的数据作为研究对象, 利用小波相干的方法从时频域上揭示两者的变化规律、局部特征和位相差异。

#### 2.3.1 北京站 2015 年 3 月 AQI 与 ZTD 相关性分析

##### 1) ZTD 与 AQI 相关性分析

重点对北京 2015 年 3 月份 ZTD 与 AQI 的相关性进行了分析, 并讨论气象要素对两者相关性的影响。由图 5 可知, ZTD 与 AQI 在 2015 年 63~72、75~88 年积日上变化趋势基本一致, ZTD 增大, AQI 随之增大, 具有较好的相关性。受到气象要素的干扰, 部分时段相关性较差, 需要进一步分析。

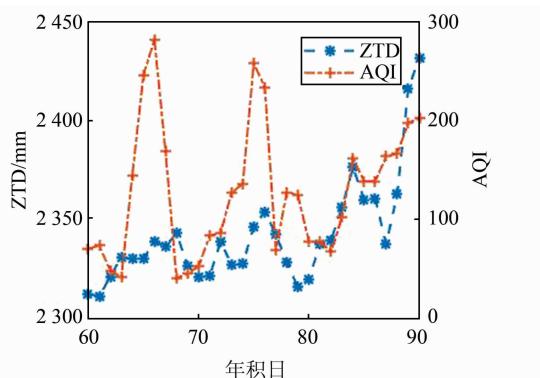


图 5 北京 2015 年 60~90 年积日 ZTD 与 AQI 相关性分析

Fig. 5 Correlation Analysis of ZTD and AQI from 60 to 90 DOY in Beijing, 2015

##### 2) AQI 与气象要素的相关性分析

ZTD 与 AQI 的相关性受多种因素的影响。综合考虑北京市的气候现状、地理条件以及人为因素, ZTD 与 AQI 的相关性不仅受温度的影响, 还与其他气象要素有关。进一步研究温度、气压、风速、湿度与雾霾的相关性, 选取 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2015 年 BJFS 站 60~90 年积日采样率为 6 h 的 nc 文

件, 包括地表气压、相对湿度、风速在  $u$  方向的分量、风速在  $v$  方向上的分量, 温度数据从天气网 ([www.tianqi.com](http://www.tianqi.com)) 获取。便于分析研究, 对 30 d 的数据求日平均值, 分析 AQI 与气压、湿度、风速  $u$  分量、风速  $v$  分量的相关性。

通过小波相干及相关系数分析可知, 温度与 AQI 在 60~90 年积日的部分时段呈负相关关系, 相关系数为 -0.7; 气压与 AQI 在 60~90 年积日上主要呈负相关关系, 相关系数为 -0.531, 气压下降有利于霾的产生; 湿度与 AQI 在 65~78 年积日上呈正相关关系, 60~90 年积日, 在发生雾霾的天数里, 相对湿度基本上小于 30%, 相对湿度小于 30% 更有利于雾霾的产生; 风速  $u$  变量、风速  $v$  变量与 AQI 在 60~90 年积日上基本上呈正相关关系。60~90 年积日, 在发生雾霾的天数里, 风速小于 4 m/s 的占 72%, 小于 4 m/s 的风速里, 东北风的比例占 69%, 东南风的比例占 31%, 这表明近地层长时间的小风速为雾霾的发生创造了有利的条件, 且东北风更有利于雾霾的产生, 这与周宁芳等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。因此, 研究 AQI 与温度、地表气压、湿度、风速的变化规律, 对于地区雾霾的监测和预报具有重要的意义。

#### 2.3.2 北京站与长春站 2015 年秸秆燃烧时期 ZTD 与 AQI 相关性分析

为了探究北京 2015 年 5 月、6 月和长春 2015 年 6 月、7 月 ZTD 与 AQI 相关性的成因, 综合考虑北京市地理环境、温度、湿度、气压、人为因素等, 初步分析该时间段 ZTD 与 AQI 相关性与北京市秸秆燃烧有关, 而北京种植的为冬小麦, 长春种植的为春小麦。冬小麦一般 9、10 月份播种, 来年 5、6 月份收割; 春小麦一般 3、4 月份播种, 当年 6、7 月份收割。避免边界效应及小波高频虚假信息, 研究数据向两端延伸 20 年积日, 选取 2015 年北京 100~200 年积日、长春 130~230 年积日的数据, 利用小波相干验证两者的相关性以及变化规律, 具体见图 6、图 7。

图 6 显示, 2015 年 16~32 d 周期区间, 两信号序列在北京 120~170 年积日上通过 95% 置信度的检验, 相关系数达到 0.8, 箭头的方向基本上在  $0\sim60^\circ$ , 表明雾霾与对流层延迟在北京 120~170 年积日上具有很强的正相关关系, 雾霾位相超前对流层延迟变化, 雾霾发生后的 2~5 天对流层延迟的值增大。图 7 显示, 2015 年 8~16 d 周期区间, 两信号序列在长春 170~190 年积日通过 95% 置信度的检验, 相关系数达到 0.8, 箭头的方

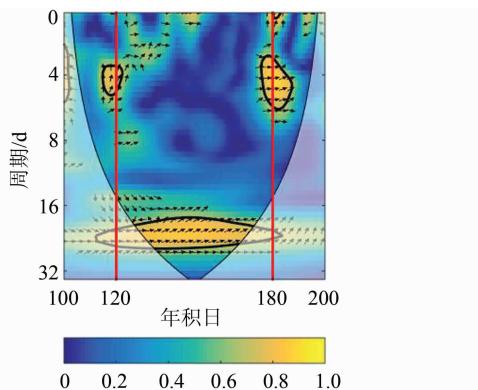


图6 北京2015年100~200年积日  
ZTD与AQI小波相干谱

Fig. 6 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum from 100 to 200 DOY in Beijing, 2015

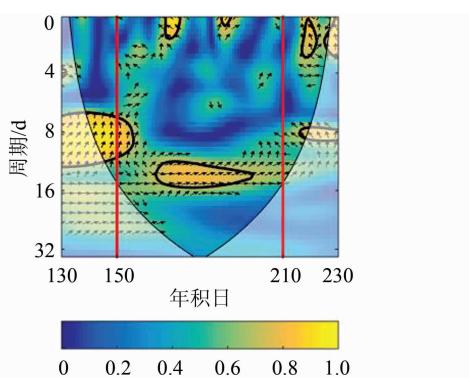


图7 长春2015年130~230年积日  
ZTD与AQI小波相干谱

Fig. 7 ZTD and AQI Wavelet Coherence Spectrum from 130 to 230 DOY in Changchun, 2015

向基本上在0~60°,表明长春雾霾与对流层延迟在170~190年积日具有很强的正相关关系,雾霾位相超前对流层延迟变化,雾霾发生后的1~3天对流层延迟的值增大。ZTD与AQI的相关性受秸秆燃烧的影响,秸秆燃烧会加剧雾霾的产生,从而影响对流层延迟。

### 3 结语

本文利用IGS站提供的GNSS高精度BJFS、CHAN站的ZTD产品,以及中国空气质量在线监测分析平台提供的AQI、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>数据,基于小波相干构建ZTD与AQI相关性及成因分析的新方法,从多角度、多时间尺度揭示ZTD与AQI相关性及其细部特征。

1)基于相关系数分析了ZTD与AQI在月尺度上的相关性。结果表明,北京2014~2017年ZTD与AQI在不同的月尺度上具有相关关系,

两者相关系数绝对值大于0.4的占比29.17%,宏观上较好地分析了每月ZTD与AQI的相关性。

2)ZTD与AQI年度相关性结果表明,北京2014~2017年AQI与ZTD在一定的时频域上呈现出很强的相关性,相关系数达到0.9,通过95%置信度检验,结果可靠性较高。小波相干谱中箭头的指向可以清晰地显示ZTD与AQI的相关性特征(时频域空间分布特征),计算AQI提前或滞后ZTD的相位(可换算成提前或滞后时间)。

3)在研究时域内,北京3月份ZTD与AQI总体呈现正相关趋势。部分时段温度与AQI呈显著负相关关系,气压下降、相对湿度小于30%、东北风更有利雾霾的产生。北京、长春地区秸秆燃烧显著加剧了雾霾的产生,进而影响对流层延迟。

### 参 考 文 献

- [1] Li Lanmiao, Li Longguo, Li Naiwen. Studies Review on Cause and Damage of Urban Haze[J]. *Environmental Engineering*, 2017(12):92-97 (李岚森, 李龙国, 李乃稳. 城市雾霾成因及危害研究进展[J]. 环境工程, 2017(12):92-97)
- [2] Solheim F S, Vivekanandan J, Ware R H, et al. Propagation Delays Induced in GNSS Signals by Dry Air, Water Vapor, Hydrometeors, and Other Particulates[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D8):9 663-9 670
- [3] Stoycheva A, Guerova G. Study of Fog in Bulgaria by Using the GNSS Tropospheric Products and Large Scale Dynamic Analysis[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, 133:87-97
- [4] Wang Yong, Wen Debao, Liu Yanping, et al. Effects of Fog and Haze Weather on GNSS Zenith Tropospheric Delay and Precipitable Water Vapor[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(2):120-123 (王勇, 闻德保, 刘严萍, 等. 雾霾天气对GNSS天顶对流层延迟与可降水量影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2):120-123)
- [5] Chen Lin, Guo Chengjun, Fan Jinwei. Monitoring Effects of Haze Weather on Zenith Tropospheric Delay by GNSS[J]. *Application of Electronic Technique*, 2016, 42(4):95-98 (陈林, 郭承军, 范进伟. GNSS系统监测雾霾对天顶对流层延迟的影响[J]. 电子技术应用, 2016, 42(4):95-98)
- [6] Pan Wenchao, Hao Jinming, Zhang Hui, et al. Correlation of the Haze and GPS Troposphere Zenith Path Delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5):609-615 (潘文超, 郝金明, 张辉, 等. 雾霾与GPS对流层天顶延迟

- 相关性探究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(5): 609-615)
- [7] Sun Peng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong. Periodic Properties and Its Implications of the Sediment Load and Runoff Changes of the Poyang Lake Basin[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2011, 57(4): 298-304(孙鹏, 张强, 陈晓宏. 鄱阳湖流域水沙周期特征及其影响因素[J]. 武汉大学学报(理学版), 2011, 57(4): 298-304)
- [8] Sun Weiguo, Cheng Bingyan. Application of Cross Wavelet Transform to Analysis on Regional Climate Variations[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008(4): 479-487 (孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008(4): 479-487)
- [9] Shao Jun. Hydrological Multi Scale Correlation Analysis of Hydrological Time Series Based on Cross Wavelet Transform[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(2): 22-26 (邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26)
- [10] Duan Pengshuo, Liu Genyou, Liu Lintao, et al. Wavelet Coherence Analysis of the Correlation Between Interannual Variability in the Earth's Dynamic Oblateness and the Antarctic Oscillation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(30): 2 947-2 955(段鹏硕, 刘根友, 柳林涛, 等. 地球动力学扁率与南极涛动年际变化的小波相干分析[J]. 科学通报, 2014, 59(30): 2 947-2 955)
- [11] Baker H C, Dodson A H, Penna N T, et al. Ground-Based GPS Water Vapour Estimation: Potential for Meteorological Forecasting[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63: 1 331-1 341
- [12] Wang Yong, Liu Lintao, Xiao Jianhua, et al. GPS Meteorology Network in Wuhan Region[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 435-438 (王勇, 柳林涛, 肖建华, 等. 武汉地区 GPS 气象网试验研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(5): 435-438)
- [13] Hopfield H S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74 (18): 4 487-4 499
- [14] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites[J]. *Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 1972, 15(6): 247-251
- [15] Zhang Shuangcheng, Zhao Lidu, Lv Xuyang, et al. Application of GNSS Water Vapor to Hazy Weather [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 451-456 (张双成, 赵立都, 吕旭阳, 等. GNSS 水汽在雾霾天气监测中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(3): 451-456)
- [16] Wang Shan, Xiu Tianyang, Sun Yang, et al. The Changes of Mist and Haze Days and Meteorological Element During 1960—2012 in Xi'an[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1): 19-26 (王珊, 修天阳, 孙扬, 等. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 19-26)
- [17] Dai Yongli, Tao Jun, Lin Zejian, et al. Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006—2009[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 2 925-2 932 (戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006—2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 2 925-2 932)
- [18] Hu Tianyi, Yang Guang, Chen Bo, et al. Pearson Correlation Test-Based ARIMA Model of Displacement Prediction[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(1): 71-75(胡添翼, 杨光, 陈波, 等. 基于 Pearson 相关性检验的 ARIMA 边坡位移监测模型[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 71-75)
- [19] Zhou Ningfang, Li Feng, Rao Xiaoqin, et al. Study on Haze Weather in China During Winter-Time of 2006 [J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(6): 81-88 (周宁芳, 李峰, 刘晓琴, 等. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象, 2008, 34(6): 81-88)

## Correlation Analysis Between Haze and GNSS Tropospheric Delay Based on Coherent Wavelet

YAO Yibin<sup>1</sup> LUO Yiyong<sup>1,2</sup> ZHANG Jingying<sup>2</sup> ZHAO Chunjie<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geodesy and Geomatics Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

**Abstract:** Firstly, by analyzing the correlation coefficient between ZTD (zenith tropospheric delay) and AQI (air quality index) of IGS(International GNSS Service) Beijing station in 2014—2017 every

month, it is found that the ratio of the absolute value of the correlation coefficient over 0.4 on the monthly scale is 29.17%, and the strong correlation characteristic is shown on the macro. Secondly, wavelet coherence are used to analyze the correlation of annual ZTD and AQI during the period of Beijing 2014–2017. It is found that ZTD and AQI have strong correlation in a certain time frequency domain and pass the 95% confidence test. Finally, according to the correlation analysis of ZTD and AQI in some time domains of Beijing and Changchun, the ZTD and AQI in March in Beijing showed a positive correlation on the whole, and AQI had a good correlation with temperature, pressure, humidity and wind speed. In the study, straw burning in the time domain aggravated the formation of haze in Beijing and Changchun, and then affected the tropospheric delay.

**Key words:** haze; tropospheric delay; wavelet coherence; AQI

**First author:** YAO Yibin, PhD, professor, Distinguished Professor of Changjiang Scholar Program, specializes in GNSS data processing and GNSS space environment. E-mail: ybyao@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574028, 41861058.

(上接第 2084 页)

## ISB/IFB Estimation and Characteristic Analysis with Multi-GNSS Precise Orbit Determination

DANG Yamin<sup>1</sup> ZHANG Longping<sup>1</sup> CHEN Junyong<sup>1</sup>

1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

**Abstract:** The effects of inter system bias (ISB) and inter frequency bias (IFB) need to be taken into account in the multi-GNSS precise orbit determination. In this paper, the ISB/IFB estimation model in the context of the multi-GNSS orbit determination is derived. A constraint method for reduce the rank defect about ISB/IFB is presented based on the GPS datum. Experimental results from MGEX data indicate that ISBs/IFBs of the different system are of good stability, and have high consistency for satellite time series in each system. The standard deviation of the BDS ISB, Galileo ISB, GLONASS IFB are 0.36 ns, 0.18 ns, 0.51 ns, respectively. The ISBs from different monitoring stations are relatively closed to those stations with the same type receiver, but ns-level differences can be still achieved. The GLONASS IFBs are consistent with the same channel number satellites of the same monitoring station and different monitoring stations.

**Key words:** GNSS; datum unification; precise orbit determination; ISB; IFB

**First author:** DANG Yamin, PhD, professor, specializes in GNSS data processing, regional crustal deformation analysis and modeling by space geodetic techniques, tectonic plate motion and geodynamics, geodetic datum and reference frames. E-mail: dangym@casm.ac.cn

**Corresponding author:** ZHANG Longping, PhD. E-mail: lpzh1988@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41474011.