

雾霾与 GPS 对流层天顶延迟相关性探究

潘文超¹ 郝金明¹ 张 辉¹ 杨 勇²

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450000
2 95956 部队,陕西 西安,710061

摘 要:利用国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)提供的对流层天顶延迟(zenith path delay, ZPD)产品,研究其与雾霾的相关性,并探究了造成雾霾的“元凶”——悬浮颗粒物与气压、温度和湿度的变化关系。首先,研究了中国境内 4 个 IGS 站 30 d 的日平均 ZPD 与量化评定雾霾的空气质量指数(air quality index, AQI)的变化趋势,发现二者基本同步增大(减小)。内陆 3 个站点的相关系数绝对值均大于 0.5,说明 ZPD 与表征雾霾的 AQI 有着较强的相关关系,雾霾对对流层延迟产生影响。其次,对 1 h 采样率的北京房山空气质量分指数(individual air quality index, IAQI)与 ZPD 进行分析,二者的变化趋势基本一致,其中 PM_{2.5}、PM₁₀、AQI 与 ZPD 的相关系数分别为 0.504 2、0.539 1 和 0.555 4。同时,当 AQI 达到 300 以上重度污染时,会对 ZPD 产生 5 cm 以上差值的显著影响。最后,利用 IGS 的 M 文件探究了北京房山各 IAQI 与气压、温度、湿度 24 h 变化,一天中 IAQI、气压、湿度均呈“U”变化趋势,而温度则呈现倒“U”变化,说明雾霾的形成与气压、温度、湿度相关,并利用逐步线性回归给出了概略模型。

关键词:雾霾;空气质量指数;全球定位系统;对流层天顶延迟;线性回归

中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

大气质量的 3/4 都集中在对流层,对流层是多种气体(氮、氧、二氧化碳等)与水蒸气的混合体,包含了大气中 99% 的水汽,主要的天气现象大都发生在对流层底部^[1-2]。卫星导航定位的对流层延迟通常是泛指电磁波信号在通过高度在 50 km 以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟^[3]。对流层总延迟量的 90% 是由于大气干成分折射影响的,剩余 10% 是由大气中的水汽引起的。近代以来的人类生产和工业活动更是直接影响了大气的成分。而倍受关注的雾霾^[4]正是由于汽车尾气、工业排放、建筑扬尘和取暖燃煤废气等人类活动所造成的大气成分的变化^[5]。

通常,雾霾及各种大气污染物主要集中于 1~2 km 以下的近地大气,而影响 GPS 精密定位和数据处理的主要误差源之一的对流层延迟的主要部分也分布在近地面大气,二者必然存在某种程度的相关性。文献[6]利用北京市 GPS 连续观测网数据研究指出,当雾霾发生时,对流层天顶延迟(zenith path delay, ZPD)上升;雾霾持续时,ZPD 在峰值徘徊;雾霾结束后,ZPD 则随之下降。因此,在排除降雨影响后,可利用干净数据分析二

者可能存在的相关性。同时,GPS 对流层延迟除了包含水汽、温度等气象信息外,也必然包含大气中各物质的浓度信息,因此很有必要对这部分信息进行挖掘研究。本文利用国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)网站提供的测站高精度对流层天顶延迟产品^[7]和国家环保部官网提供的城市空气质量数据,探究二者的相关性、变化特征以及影响因素,为进一步研究利用 GPS 对流层延迟产品进行高时间分辨率的空气质量监测和预报,以及雾霾反演奠定基础。

1 空气质量指数和天顶延迟

1.1 雾霾和空气质量指数

雾霾是雾和霾的统称。国家气象局将雾定义为大量微小水滴浮游空中,常呈乳白色,使水平能见度小于 1.0 km;霾定义为大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10.0 km 的空气普遍混浊现象^[8]。雾霾天气是一种大气污染状态,是对大气中各种悬浮颗粒污染物含量超标的笼统表示,其中 PM_{2.5}(空气动力学当

量直径小于或等于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物)被认为是造成雾霾天气“元凶”^[9]。雾霾天气对交通运输、农作物生长、供电系统和人体健康造成较大危害^[10-11]。

雾霾的成因有三个。第一个原因是大气在水平方向上的静风运动变多,妨碍了大气污染物的扩散,使其在城区和郊区的周边聚集。第二个原因是大气垂直方向上出现逆温层,阻碍了空气垂直运动,致使污染物不易向高空扩散而停滞在低空。第三个原因是气态污染物和悬浮颗粒物增加^[12]。监测雾霾的主要方法有卫星遥感和建立地面区域监测站^[13-15]。卫星遥感具有范围大、获取信息快、更新周期短、动态监测等特点,但受到卫星数量和成本以及空间分辨率的限制,并未得到大范围的推广。地面监测站属于定点监测,具有时空局限性,相应地,监测效果尚不能很好地达到宏观监测的要求。现阶段提供的空气质量指数(air quality index, AQI)和空气质量分指数(individual air quality index, IAQI)产品主要有时间分辨率为 1 h 和 24 h 的两种。

本文主要分析造成雾霾的第三个原因,气态污染物和悬浮颗粒物的浓度信息主要通过 AQI 来进行定量描述。影响雾霾的因素主要有降雨、风速、湍流、温度、气压、湿度等^[15],本文只研究与 GNSS 对流层延迟相关的气象参数——温度、气压和湿度。雾霾信息的表征和空气质量的监测,通常采用 AQI 来对空气中的主要污染物如 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、一氧化碳等的浓度进行量化评定。

AQI 是定量描述空气质量状况的无量纲指数,分为 6 个等级,当 AQI 大于 100 时,呈现轻度污染,极易产生雾霾。针对单项污染物还规定了 IAQI。参与空气质量评价的主要污染物为细颗粒物、可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、一氧化碳等 6 项。空气质量指数 I 的计算公式为:

$$I = \max\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\} \tag{1}$$

式中, I_1, I_2, \dots, I_n 为空气质量分指数。污染物项目 P 的 IAQI 计算公式为:

$$I_P = \frac{I_H - I_L}{P_H - P_L}(C_P - P_L) \tag{2}$$

式中, I_P 表示污染物项目 P 的空气质量分指数; C_P 表示污染物项目 P 的质量浓度值; P_H 表示与 C_P 相近的污染物浓度限值的高位值; P_L 表示与 C_P 相近的污染物浓度限值的低位值; I_H 表示与 P_H 对应的空气质量分指数; I_L 表示与 P_L 对应的

空气质量分指数。本文研究的 IAQI 主要是指 PM_{2.5} 和 PM₁₀。

1.2 天顶延迟

对流层延迟是影响 GNSS 导航定位精度的主要因素之一。大气折射延迟主要表现在两个方面:(1)大气折射使电磁波的路径发生弯曲,使传播路径增长,信号到达地面的时间产生延迟;(2)大气中的介质使电磁波在大气中的传播速度小于在真空中的速度,使信号产生时间上的延迟^[16]。由于对流层大气的非弥散特性,不能用双频观测值来计算对流层延迟。通常的做法是将对流层延迟写为天顶延迟与映射函数乘积的形式^[17]。天顶对流层延迟由流体静力学分量(干分量) d_h^z 与湿分量 d_w^z 两部分组成。二者分别计算相加即为总的对流层延迟量 d_t :

$$d_t = d_h^z m_h + d_w^z m_w \tag{3}$$

式中, m_h 和 m_w 为对应的映射函数。国内外建立了许多对流层延迟模型,普遍使用的有 Hopfield 模型、改进的 Hopfield 模型、Black 模型、Saastamoinen 模型和欧洲地球静止导航重叠服务(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)模型。它们的模型精度相当,但在不同情况下会有细小的差异。由于 Saastamionen 模型采用了分层积分的思想,对大气的描述更加准确,且模型干分量本身的精度很高且不受温度误差的影响,流体静力学延迟中误差为 2~3 mm,湿延迟为 2~5 cm^[18-19]。目前,许多高精度的 GPS 解算软件都默认采用 Saastamionen 模型^[20]:

$$\begin{aligned} d_h^z &= 0.002\,277 \times P_0 / F(\varphi, h_0) \\ d_w^z &= 0.002\,277 \left(\frac{1}{T} \frac{255}{T} + 0.05 \right) e_0 / F(\varphi, h_0) \\ F(\varphi, h_0) &= 1 - 0.002\,6 \cos 2\varphi - 0.002\,8 h_0 \end{aligned} \tag{4}$$

式中, P_0 为测站的气压(mbar); T 为测站的气温(K); e_0 为测站水汽压(mbar); φ 为测站纬度($^\circ$); h_0 为测站高程(m)。通过模型表达式不难看出,ZPD 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 GPS 气象学,通过计算出包含大气折射信息的大气折射量来反演大气中的水汽分布,从而进行气象学研究和天气预报^[21-22]。

利用伯尔尼、GAMIT 等相关软件处理 GPS 观测数据可得到高精度的对流层延迟信息,利用相关的气象信息,进而可以确定空气中相关物质的浓度,进行高分辨率的空气质量和雾霾监测和预报。目前,国内外利用 GPS 对流层产品进行空

气质量监测和预报的研究目前还处于空白。

2 AQI 和天顶延迟相关性

2.1 数据来源

本文选用国家环保部官网发布的城市日 AQI 和北京市环保局官网提供的北京市各监测点的每小时 AQI 和 IAQI。为了便于研究揭示二者的关系,本文选择雾霾多发的春冬两季^[23]。通过筛选整理,选取了 2014 年数据较为连续、数据质量较高,相对完整,天气状况较为稳定且无大的降雨天气,年积日为 47~76 共计 30 d 的 AQI 数据。同时选用了位于中国境内的北京房山(BJFS)、长春(CHAN)、上海(SHAO)、乌鲁木齐

(URUM)4 个 IGS 站,获取了对应时段 30 d 的 ZPD 文件。为了便于研究,本文只对北京房山每小时的 AQI 和 IAQI 信息进行相关性研究和分析。

根据获取的 AQI 和 ZPD 数据采样率特性,主要分为两个方面进行处理分析:(1) 研究日平均 AQI 和 ZPD 的变化特征和相关性;(2) 研究每小时的 AQI(IAQI)与对应 ZPD 的变化特征和相关性。本文通过对数据进行预处理,使用 Matlab 来进行作图分析。

2.2 日平均数据处理分析

首先对各站日均的 AQI 和 ZPD 进行作图分析比较,得到 24 h 均值变化图像,4 个站点的变化值如图 1 所示。

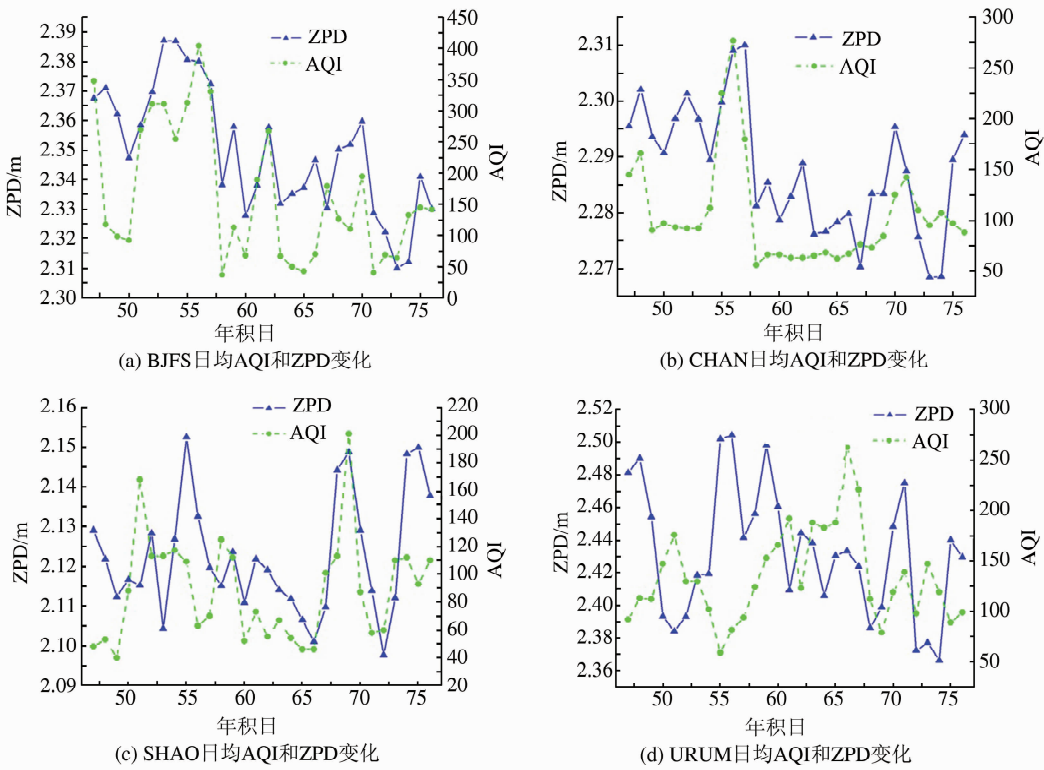


图 1 4 个站点的日均 AQI 和 ZPD 变化值
Fig. 1 AQI and ZPD 24 h Average Variation of 4 Stations

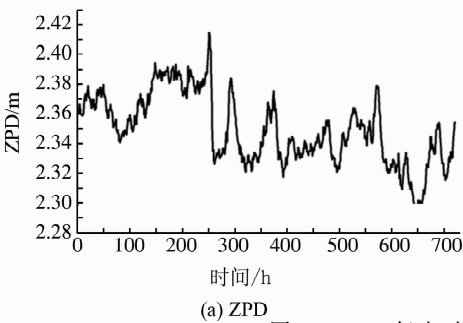
从图 1 中可以看出,除了 URUM 站外,其他站点的 AQI 和 ZPD 基本呈同步变化的趋势,即当测站 ZPD 变大时,AQI 随之变大,而当 ZPD 减小时,AQI 随之变小,说明二者存在较强的相关性。通过 Matlab 作相关性分析,得到各个站点的相关性系数,如表 1 所示。

4 个站点中,BJFS、CHAN、URUM 的相关系数大,相关性较强,而 SHAO 相关系数小,相关性较弱。初步分析是因为由于 SHAO 站位于上海,靠近海洋,因此受到海洋水汽等的影响较为显著,

| 表 1 IGS 站点 AQI 和 ZPD 相关系数 | | | | |
|---|---------|---------|----------|----------|
| Tab. 1 AQI and ZPD Correlation Coefficients of IGS Stations | | | | |
| 站点 | BJFS | CHAN | SHAO | URUM |
| 相关系数 | 0.765 2 | 0.784 9 | -0.375 3 | -0.628 8 |

同时有 11 d 为小雨或中雨天气;而其他 3 个站点均位于内陆地区,天气干燥,受海洋水汽的影响较小,因此呈较强的相关性。这说明 AQI 与近地大气中的水汽存在较大的相关关系。BJFS 在 52~56 的 5 d 内出现了严重的雾霾天气,从图 1(a)中

不难发现,对应天的 ZPD 也大大高于其他天,当年积日 59、60 天气转晴时,AQI 降低,ZPD 也低于其他天。对位于乌鲁木齐的 URUM,所得的 AQI 数据为不同监测站数据的平均值,相关性稍差,因为所得的城市均值 AQI 不能很好地表示 IGS 站所在城市测站位置的 AQI 值。可见 AQI 值也与监测站位置强相关,这与 ZPD 与位置强相关本质上是一致的。



2.3 1 h 数据处理分析

从 30 d 数据中选择 IGS 提供的 ZPD 产品采样率为 300 s,而 IAQI 数据每隔 1 h 记录一次,因此统一为采用每日的 0~23 时整时的数据进行对比分析,包括 PM2.5、PM10 和 AQI。通过数据处理分析得到每小时 IAQI、AQI、ZPD 数据变化,如图 2 所示。

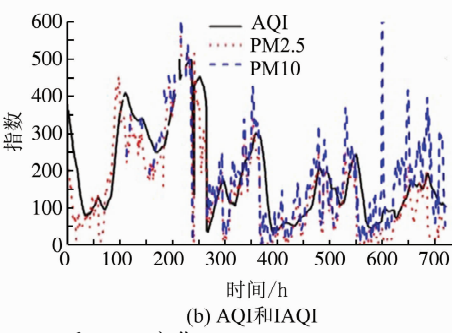


图 2 BJFS 每小时 AQI、IAQI 和 ZPD 变化
Fig. 2 BJFS 1 h AQI, IAQI and ZPD Variation

图 2 中断点部分主要是由于 AQI 和 IAQI 数据残缺所致,剔除残缺数据对应的 ZPD 和 IAQI 时间点数据,得到相关系数(见表 2)。AQI 与 ZPD 的相关系数为 0.555 4。

表 2 IAQI 与 ZPD 相关系数

| Tab. 2 IAQI and ZPD Correlation Coefficients | | |
|--|---------|---------|
| IAQI | PM2.5 | PM10 |
| 相关系数 | 0.504 2 | 0.539 1 |

由图 2 可知,每小时的 AQI、IAQI 与 ZPD 的变化趋势基本一致,同时 AQI 相邻点的曲线较为平滑,而 IAQI 和 ZPD 相邻点的曲线变化则较为频繁。同时,二者又不呈完全一致的变化趋势,对应时间点的 ZPD 与 IAQI 存在较为复杂的关系,受到其他因素影响较多。AQI 与 ZPD 存在相关性的同时,IAQI 与 ZPD 也存在一定的相关性,相关系数均在 0.5 左右,这就为下一步深入探究各空气污染物与 ZPD 的关系,以及利用 GPS 对流层产品进行空气质量监测和预报奠定了基础。

为了进一步研究 AQI 达到多少时才会对 ZPD 产生显著的影响,本文选择常用的 Saastamionen 模型,分别利用 IGS 提供的高精度 ZPD 与实测气象参数解算得到的 ZPD 作差,将文献[22-23]中精度作为限值,分析雾霾对 ZPD 影响的量级 ΔZPD 。由于实际解算中,采用气象参数得到的天顶干延迟精度较高,则只需考虑天顶湿延迟误差,于是有:

$$\Delta ZPD = Z - Z' = Z - (d_h^z + d_w^z) \tag{5}$$

式中,Z 为 IGS 提供的 ZPD 值;Z' 为实测气象参数解算得到的 ZPD 值。

根据 AQI 的 6 个等级,以 $\Delta ZPD = 5\text{ cm}$ 为限值,对各等级的解算结果进行统计,得到限值所对应等级的比率。同时对 PM10 和 PM2.5 也进行了相应的处理,统计结果见表 3。

表 3 AQI 和 IAQI 各等级所占比例

| Tab. 3 Ratio of Each Grade in IAQI and AQI | | | | | | |
|--|-------|--------|---------|---------|---------|-------|
| | 0~50 | 51~100 | 101~150 | 151~200 | 201~300 | >300 |
| AQI | 0 | 0.052 | 0.055 | 0.08 | 0.238 | 1 |
| PM10 | 0 | 0.048 | 0.083 | 0.06 | 0.119 | 0.339 |
| PM2.5 | 0.013 | 0.095 | 0.094 | 0.138 | 0.125 | 0.812 |

从表 3 中不难发现,随着 AQI 增大,达到或者超出限值的所占比例逐渐增大,PM10 和 PM2.5 呈现相同的发展趋势。若以最大 5 cm 为限值,当 AQI 指数达到 300 以上,即为严重污染时,雾霾对 ZPD 产生显著影响。同时,若以 2 cm 为误差限值,则当 AQI 达到 150 以上,即为中度污染时,则应考虑雾霾对 ZPD 产生的影响。

3 IAQI 与气压、温度、湿度关系

为了进一步探究 IAQI 大小受到哪些气象因素的影响,本文选用了 IGS 站提供的 2014 年 BJFS 站采样率为 30 s 的 M 文件,年积日为 47~64(缺失 58)共计 17 d 无降雨的 M 文件,主要包含测站的气压 P、温度 T 和湿度 H,同时筛选对应的 IAQI 数据。由于 IAQI 具有明显的日变化

特性,因此对 17 d 数据按每日 0~23 时每个整点时刻求取各 IAQI 的 17 d 均值,得到 IAQI 时刻点均值变化见图 3(a)。同时,为了便于研究分

析,选取 BJFS 雾霾较严重的年积日为 52~56 共 5 d 的气压、温度、湿度整时刻点得到每小时散点图和 17 d 均值变化(见图 3(b)~3(d))。

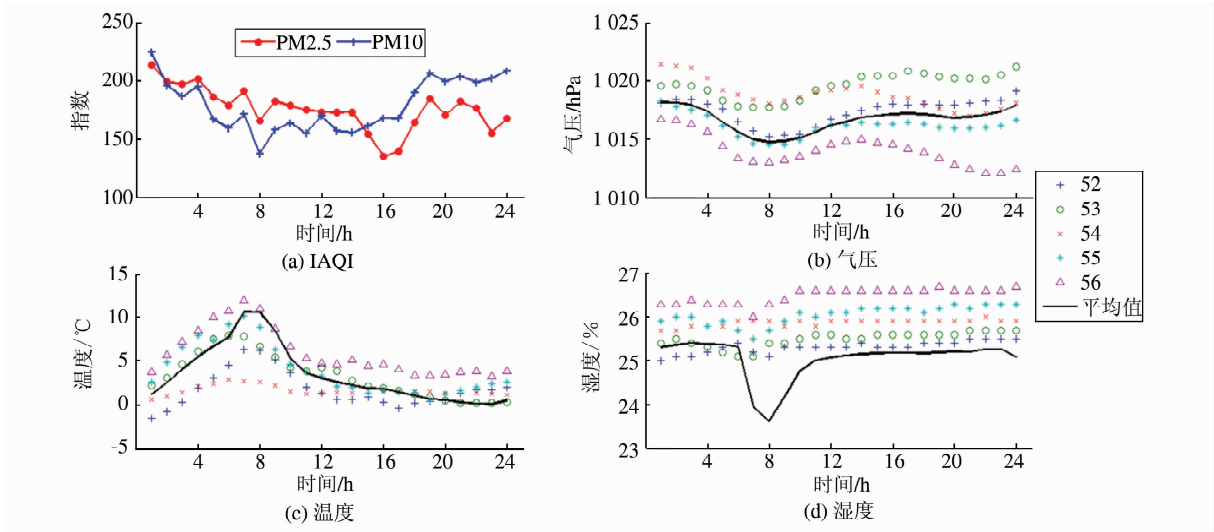


图 3 IAQI 整点均值变化与气压、温度、湿度整点均值变化
Fig. 3 IAQI Integer-in-Time Mean Value and Air Pressure, Temperature, Relative Humidity Integer-in-time and Mean Value Variation

从图 3 中可以发现,PM2.5 和 PM10 在 8~17 时的均值均小于其他时间点的均值,而 17~24 时均值呈上升趋势,0~8 时均值呈下降趋势,再次说明 IAQI 的变化具有明显的日变化特性,基本呈“U”字形变化趋势。同时,对比气压、温度、湿度散点和均值变化图不难看出,气压和湿度基本呈相同的变化趋势,呈“U”字形,在 8 时达到最小值;而温度则呈现倒“U”字形变化趋势,在 8 时达到最大值。PM2.5 和 PM10 则分别在 8 时和 16 时出现峰值。

IAQI 与气压、湿度呈现正相关变化趋势,而与温度变化则呈现负相关趋势。夜间温度低,湿度和气压高,PM2.5 等污染物浓度升高,IAQI 值增大,则容易形成雾霾;白天随着温度的升高,湿度、气压降低,PM2.5 等污染物浓度降低,IAQI 值随之减小,则雾霾随之减弱或者消失。

同时可以发现一天中 IAQI 的变化较为剧烈,而气压、温度、湿度则变化相对较平缓,说明 IAQI 变化还会受到其他因素的影响。

本文采用逐步线性回归的方法,得到了 PM2.5 和 PM10 对应的 IAQI 与测站气压、温度、湿度的线性模型:

$$\begin{aligned} I_{PM2.5} &= 3.752\ 27P + 7.722\ 19T + 55.447\ 8H \\ I_{PM10} &= -2.518\ 42P + 5.092\ 27T + 58.813\ 4H \end{aligned} \tag{6}$$

对应的均方根分别为 96.958 和 101.419,回

归直线判定系数分别为 0.330 8 和 0.390 4。对于固定地区来说,污染源相对稳定,因此利用 GPS 提供的高分辨率气象信息研究该地区的气压、温度、湿度等因素的日变化以及年际变化对 IAQI 的影响,对地区的 IAQI 以及雾霾的监测和预报具有十分重要的意义。

4 结 语

本文利用 IGS 站提供的高精度 ZPD 产品和对应测站的 AQI 和 IAQI 数据,进行了相关性分析和研究,发现二者存在较强的相关性。同时, AQI 和 IAQI 还受到其他因素的影响,如水汽、测站位置等,且呈现日变化和年变化特点。作为造成雾霾的 PM2.5、PM10,与 ZPD 存在较强实时相关性。这为利用高精度、实时、全天候的 GPS 数据进行空气污染物监测和预报提供了一种新的方法。本文还给出了 PM2.5 与 PM10 与测站气压、温度和湿度的关系及相应的概略关系式。通过本文的研究可以预见,未来利用 GPS 相关的大气产品进行雾霾的监测和预报将具有两个方面的优点:

1) 可以克服地面建立固定站点花费高、测量精度受限、只能反映小范围的污染情况,监测点位偏少且分布不合理等缺点。利用 GPS 接收机,即可固定或者移动进行相关的信息采集,从而得到

宽地域连续的 IAQI 信息,减少资金投入。同时,亦可利用现有的城市 CORS 站数据进行相应的数据采集分析,将节省大量的人力、财力和物力。

2) 利用 GPS 的高精度、实时、全天候特性,使更高时间分辨率和全天候的污染物浓度值预报成为可能,减少人为因素造成的数据缺失遗漏等问题,为空气质量监测预报、市民生活出行以及雾霾问题的处理提供了更多细节信息。

参 考 文 献

[1] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Measurements and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005(李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005)

[2] Ding Xiaoguang. Research of Tropospheric Delay Model and Applications Based on the GPS Data Processing[D]. Xi'an:Chang'an University,2009 (丁晓光. 对流层延迟改正 GPS 数据处理中的应用与研究[D]. 西安:长安大学,2009)

[3] Gao Xingwei, Chen Ruizh, Li Xiyin. A Study of the Neutral Atmospheric Effects on Pseudorange Positioning with Nondifference Models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 134-140(高星伟,陈锐志,李夕银. 中性大气对非差伪距定位的影响及其模型改正分析[J]. 测绘学报,2007, 36(2): 134-140)

[4] China Meteorological Administration. QX/T45-2007 Surface Weather Observations Specification Version [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2007(中国气象局. QX/T45-2007 地面气象观测规范[S]. 北京:气象出版社,2007)

[5] Tong Yaoqing. Haze Phenomenon and Analysis of the Characteristics of Its Pollutants in Nanjing Area [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology,2008(童尧青. 南京地区霾天气及其污染特征分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2008)

[6] Wang Yong, Wen Debao, Liu Yanping, et al. Effects of Fog and Haze Weather on GPS 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 GPS 天顶对流层延迟与可降水量影响研究[J]. 大地测量学与地球动力学,2014,34(2):120-123)

[7] Byun S, Bar-Sever Y. A New Type of Troposphere Zenith Path Delay Product of the International GNSS Service[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 1-7

[8] Chinese Ministry of Environmental Protection. HJ633-2012 Environmental Air Quality Index

(AQI) Technology [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012 (中国环境保护部. HJ633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012)

[9] Hachfeld B, Jurgens N. Climate Patterns and their Impact on the Vegetation in a Fog Driven Desert: The Central Namib Desert in Namibia[J]. *Phytocologia*, 2000, 30(3/4): 567-589

[10] Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli, et al. Study of Simultaneous Non-linear Retrieval of Atmospheric Parameters and Surface Skin Temperature from MODIS Infrared Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 400-403(赵强,杨世植,乔延利,等. 利用 MODIS 红外资料反演大气参数以及表层温度的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(4): 400-403)

[11] Chen Yijun, You Jiahong, Shu Jiong, et al. A WRF-RTIM-Based Model Output Statistics Method for Haze Event Prediction in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3): 574-581(陈亦君,尤佳红,束炯,等. 基于 WRF-RTIM 的上海地区霾预报 MOS 方法研究[J]. 环境科学学报,2014, 34(3): 574-581)

[12] Sun Liang. Hazard and Treatment of Haze Weather [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(10): 71-72 (孙亮. 灰霾天气成因危害及控制治理[J]. 环境科学与管理,2012,37(10):71-72)

[13] Zhang Yunying, Huang Fei. Spatial and Temporal Distribution of Visibility Under Fog and Haze Condition in Guangdong Province: Annual and Inter-annual Change [J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(4): 324-328 (张运英,黄菲. 广东雾霾天气能见度时空特征分析: 年际年代际变化[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 324-328)

[14] Jiang Jie, Zha Yong. Application of Remote Sensing Technology in Haze Monitoring [J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2011, 23(2): 15-17(姜杰,查勇. 遥感技术在灰霾监测中的应用综述[J]. 环境监测管理和技术,2011,23(2):15-17)

[15] Wang Shan, Xiu Tianyan, Sun Yang, et al. The Changes of Mist and Haze Days and Meteorological Element During 1960-2012 in Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(1): 19-26(王珊,修天阳,孙扬,等. 2014. 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, 34(1): 19-26)

[16] Yin Haitao, Huang Dingfa, Xiong Yongliang, et al. New Model for Tropospheric Delay Estimation of GPS Signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(5): 454-457

(殷海涛,黄丁发,熊永良,等. GPS 信号对流层延迟改正新模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007,32(5):454-457)

[17] Dai Wujiao, Chen Zhaohua, Kuang Cuilin, et al. Modeling Regional Precise Tropospheric Delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 392-396(戴吾蛟,陈招华,匡翠林,等. 区域精密对流层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(4):392-396)

[18] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites[J]. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*,1972, 15:247-251

[19] Saastamoinen J. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction [J]. *Bulletin Geodesique*, 1973,107:13-34

[20] Dach R, Hugentobler U, Fridez P, et al. Bernese GPS Software Version 5.0[R]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007

[21] 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

[22] Bevis M,Businger S, Herring T, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(D14):15 787-15 801

[23] Qian Ling. Observation Studies on the Pollution Characteristics and Influencing Factors of Aerosol in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information,2008(钱凌. 南京大气气溶胶的污染特征及其影响因素观测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008)

Correlation of the Haze and GPS Troposphere Zenith Path Delay

PAN Wenchao¹ HAO Jinming¹ ZHANG Hui¹ YANG Yong²

1 College of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China
2 Troops 95956, Xi'an 710061, China

Abstract: The main part of the tropospheric delay in satellite navigation and positioning is caused by the refraction inherent in the composition of the atmosphere and changes in atmospheric composition, due to haze, an air polluting condition that places enormous impact on production and life. There must be some degree of correlation between these two factors. By using the zenith path delay (ZPD) production supplied by the IGS, we study the correlation between haze and probe suspended particulate matter, the "culprit" of haze, and variation in air pressure, temperature, and humidity. A study of 30-day daily-average ZPD and air quality index (AQI) and quantitative assessment of haze trends showed at four IGS stations in China that both synchronously increased and decreased. The correlation coefficient of three inland stations was greater than the absolute value of 0.5, indicating ZPD and AQI, the characterization of haze, were strongly correlated and that haze has an impact on tropospheric delay. Trends individual air quality index (IAQI) and ZPD at Beijing Fangshan (BJFS) with a one-hour sampling rate were analyzed, both changed basically the same way. The correlation coefficients for PM_{2.5}, PM₁₀, AQI and ZPD were 0.504 2, 0.5391 and 0.558 3. Meanwhile, the AQI, when it reached 300 or more, had a significant impact on ZPD with more than 5cm bias. M-file of IGS is exploited to probe the changing tendencies of each IAQI with the air pressure, temperature and humidity over a 24-hour period. It shows that IAQI, air pressure, and humidity have a "U" trend, and the temperature has inverted "U" change in one day. This suggests that the air pressure, temperature, and humidity make great contribution to the formation of haze, a schematic model is given using stepwise linear regression.

Key words: haze; air quality index; GPS; troposphere zenith path delay; linear regression