引文格式：胡月华, 姜晓爽, 杨超, 等. 北京地区 GNSS 水汽/雾霾时空特征分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 95-97. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.03.020

北京地区 GNSS 水汽/雾霾时空特征分析

胡月华[1]，姜晓爽[1]，杨　超[1]，高　萍[1]
（1. 山东正元数字城市建设有限公司，山东 烟台 264670）

摘　要：针对北京地区冬季雾霾频发的问题，借助 GNSS 观测数据和气象观测数据对北京地区 GNSS 水汽/雾霾进行时空特性分析。结果表明，雾霾天气的形成过程与 GNSS 水汽含量变化密切相关，且存在较强的季节性变化；北京地区夏季 GNSS 水汽含量最高，基本保持在 100~160 mm 之间，秋季次之，冬季和春季水平相当且最少；北京地区冬季 $PM_{2.5}$ 含量明显高于其他季节，雾霾最严重时 $PM_{2.5}$ 含量达到 190 g/m^3；整个冬季雾霾指数居高不下，水汽较少不足以抑制雾霾天气的发生；大气可降水量与冬季 $PM_{2.5}$ 正相关，夏季负相关。GNSS 水汽资料可在一定程度上监测与治理雾霾天气，为改善空气质量提供依据。

关键词：GNSS；天顶对流层延迟；大气可降水量；雾霾
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0095-03

Spatio-temporal Characteristic Analysis of GNSS Water Vapor and Haze in Beijing

HU Yuehua[1], JIANG Xiaoshuang[1], YANG Chao[1], GAO Ping[1]
(1. Shandong Zhengyuan Digital City Construction Co., Ltd., Yantai 264670, China)

Abstract: In view of the frequent occurrence of haze in Beijing in winter, we analyzed the spatio-temporal characteristics of GNSS water vapor and haze in Beijing with the help of GNSS observation data and meteorological observation data. The experimental results show that the formation process of haze weather is closely related to the change of GNSS water vapor content, and there is strong seasonal change. The summer GNSS water vapor content in Beijing is the highest, which is basically kept between 100 mm and 160 mm. The GNSS water vapor content in autumn is second, and the GNSS water vapor content in winter and spring are equivalent and the least. In Beijing, the content of $PM_{2.5}$ in winter is significantly higher than that of the other three seasons. When the haze are the most serious, the content of $PM_{2.5}$ reaches 190 μg/m^3. The haze index remains high throughout the winter, and less water vapor is not enough to suppress the haze. The content of $PM_{2.5}$ and perceptible water vapor (PWV) are positively correlated in winter and negatively correlated in summer. To a certain extent, GNSS water vapor data can be used to monitor and control haze, and provide a basis for improving air quality.

Key words: GNSS, zenith tropospheric delay, PWV, haze

随着我国经济的快速发展，各类污染物的排放导致空气质量日益下降，进而导致雾霾天气频发，尤其在冬季表现更为严重。雾霾影响范围持续扩大且影响时间更加持久，不仅给人们生活、生产带来恶劣影响，而且将威胁人们的身体健康和财产安全[1-4]。雾霾主要是工业污染造成的严重后果，如何精准监测雾霾的变化趋势并有效治理雾霾，以指导人们生活生产是目前国内外相关领域学者急需解决的问题。当空气能见度小于 10 km，空气中水汽达到饱和状态，空气中含有大量悬浮颗粒物有害化学成分时，就形成了雾霾天气。雾霾是雾和霾的统称，是空气污染和气象因素相互作用的结果，霾常常伴随雾出现[5-6]。

进入 20 世纪 80 年代以后，全球卫星导航系统（GNSS）的快速发展为 GNSS 气象学的出现奠定了基础。GNSS 气象学是借助地基 GNSS 观测数据探测大气中水汽分布的一种探测技术，可有效弥补传统水汽探测技术在时空分辨率上的不足，可为气象与灾害监测等相关部门提供高精度、大范围、实时的水汽分布信息，是目前监测天气和气候变化的重要手段。该技术的发展对雾霾天气的研究具有重要价值[7-9]。近年来，国内外学者针对雾霾频发地区（如北京、天津、成都、武汉等）进行了 GNSS 水汽/雾霾专项研究分析，如 KANG C M[10]等首次建立了 $PM_{2.5}$ 空气质量物理气候模型，分析了 $PM_{2.5}$ 颗粒物的主要组成成分，并验证了大气可降水量（PWV）与 $PM_{2.5}$ 之间的联系；郭洁[11]等基于成都地基 GNSS 观测数据反演得到的 PWV 和气象观测数据，验证了 GNSS 水汽与大雾天气之间的关系，结果表明，在大雾生成阶段，GPS 水汽呈上升趋

收稿日期：2021-05-27；修回日期：2021-05-28。
第一作者简介：胡月华（1986—），硕士研究生，工程师，主要研究方向为大地测量理论与方法、测绘地理信息，E-mail：huyuehua@tom.com。

势，此时大气中水汽开始增加，从地面蒸发到大气中的水汽开始积累，为雾的形成提供水汽条件；谢劭峰[12]、吕效谱[8]和Baker H C[13]等借助不同的数理统计方法，研究了雾霾期间城市大气污染因子的时空分布特征，进一步证实了GNSS水汽与相对湿度、雾霾指数之间的相关性；毛敏[14]等对比分析了上海市2016年年积日153—214的大气中污染物含量与天顶对流层延迟（ZTD）数据，结果表明，大气中每种污染物含量基本呈相似趋势，ZTD随$PM_{2.5}$含量的增加而增大，夏季$PM_{2.5}$含量与气压、气温和相对湿度成正相关关系，与风速、降水量成负相关关系；江琪[15]等利用2012年北京气象数据，分析了$PM_{2.5}$和反应性气体的变化特征及其与气象条件的相关关系，结果表明，在清洁天与污染天，相对湿度对$PM_{2.5}$质量浓度的影响结果表达不一致。北京是我国雾霾发生频率最高的地区，其主要原因是北京地区冬季北风明显减少变弱以及污染物排放严重增大聚集。雾霾的形成受风速、温度、湿度和气压等多种复杂因素的共同影响，$PM_{2.5}$质量浓度是影响雾霾形成的主要因素，一次微粒和二次微粒是$PM_{2.5}$的两大来源。本文基于GNSS气象学理论与方法，分析了北京地区在雾霾发生过程中雾霾呈现的时空特性，旨在为雾霾的监测与治理提供参考依据。

1 GNSS水汽基本原理

基于GNSS原始观测数据获取对流层天顶总延迟，再结合气象观测资料和天顶静力学延迟计算模型，得到天顶静力学延迟。Saastamonien模型的计算公式为：

$$\mathrm{ZHD}=0.227\,7\times\frac{P}{F(\varphi,h_0)}$$

$$F(\varphi,h_0)=1-0.002\,6\times\cos(2\varphi)-0.000\,28\times h_0$$

式中，φ为测站的纬度；h_0为测站海拔高度，单位为km；P为测站地面气压，单位为hPa；ZHD为天顶静力学延迟，单位为cm。

ZTD减去ZHD得到天顶湿延迟（ZWD），再利用Bevis经验公式计算得到加权平均温度，进一步得到水汽转换系数（Π）。ZWD与Π相乘即可得到PWV。

2 数据来源与方案设计

研究表明，GNSS水汽的时空特性与空气中相对湿度的时空特性具有高度一致性；而空气中的相对湿度与GNSS水汽变化存在局部上的差异，主要是由于GNSS水汽反映的是测站上空水汽含量总的变化，相对湿度反映的是地表水汽压与饱和水汽压的比值，从而导致GNSS水汽滞后于相对湿度的变化。因此，GNSS水汽在一定程度上可以较好地反映霾的形成过程。为了分析北京地区在雾霾发生过程中，雾霾呈现的时空特性，本文采用国际GNSS服务组织（IGS）中心提供的观测数据以及由中国空气质量在线监测分析平台提供的空气质量指数（AQI）和$PM_{2.5}$数据。AQI越小（大），空气质量越好（差）；当AQI≤50时，空气质量处于优的状态，当AQI＞300时，空气质量处于严重污染状态。

利用地基GNSS数据反演PWV时，截止高度角设置为10°，电离层模型采用无电离层组合，映射函数采用在全球地区适用性较强的GMF映射函数模型，加权平均温度采用Bevis模型，反演PWV的产品结果文件的时间分辨率为1 h，每天共计25组。

3 数据分析

为了对北京地区GNSS水汽与雾霾浓度进行相关性分析，本次实验收集了北京地区2019-09-01—2020-08-31的GNSS水汽数据产品资料和$PM_{2.5}$数据产品资料。

为了能全面准确地分析GNSS反演的PWV与$PM_{2.5}$之间的关系，本文绘制了2019-09-01—2020-08-31的PWV与$PM_{2.5}$的时间序列图（图1），可以看出，北京地区夏季GNSS水汽含量最高，基本保持在100~160 mm之间，秋季次之，冬季和春季的GNSS水汽含量水平相当且最少；雾霾存在较强的季节性变化，冬季$PM_{2.5}$含量明显高于其他季节；雾霾最严重时，$PM_{2.5}$含量达到190 μg/m³。北京地区冬季雾霾天气多发在一定程度上与冬季天气干燥、降水量较少、暖气供应和尾气排放等因素相关；北京地区水汽含量较多时，雾霾天气较少，水汽含量较少时，雾霾天气较多，说明水汽含量增加在一定程度上可抑制雾霾天气的发生。

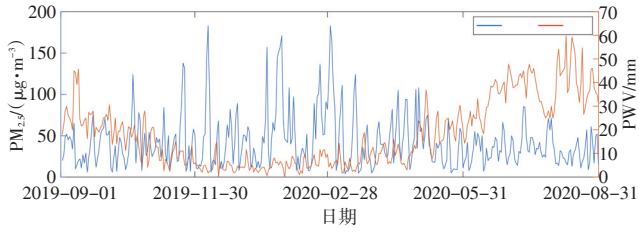
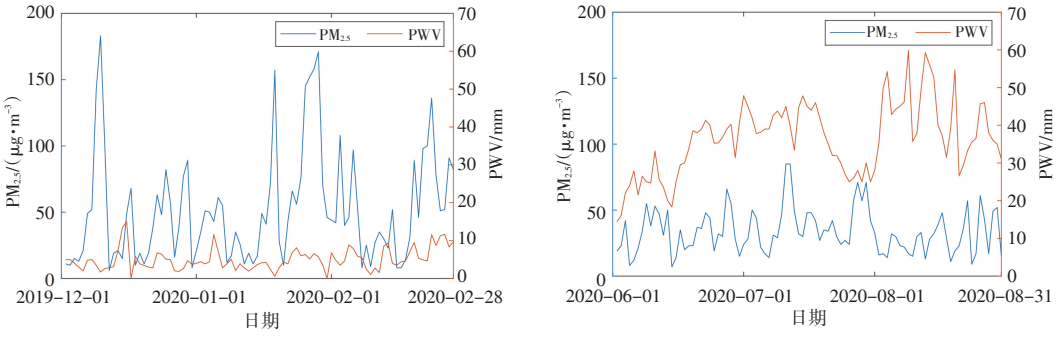


图1 PWV与$PM_{2.5}$时间序列

为进一步分析水汽含量与雾霾之间的相关关系，

本文对雾霾高发期（冬季）和雾霾低发期（夏季）的PWV与$PM_{2.5}$的相关关系进行分析研究，结果如图2所示，可以看出，整个冬季雾霾指数居高不下，GNSS水汽处于较低水平，水汽较少不足以抑制雾霾天气的发生；GNSS水汽含量与$PM_{2.5}$浓度变化在趋势上保持一致，通过线性回归分析得到北京地区2019–12–01—2020–02–28的$PM_{2.5}$与PWV的相关系数为0.35，呈正相关；整个夏季GNSS水汽一直处于较高水平，雾霾指数处于较低水平，通过线性回归分析得到北京地区2020–06–01—2020–08–31的$PM_{2.5}$与PWV的相关系数为–0.42，呈负相关。



a 冬季　　b 夏季

图2　冬季和夏季PWV与$PM_{2.5}$相关关系图

4　结　语

北京是我国雾霾发生频率最高的地区。北京地区冬季北风明显减少变弱和污染物排放严重增大聚集是雾霾天气发生的两大因素。本文基于GNSS气象学理论与方法分析了北京地区在雾霾发生过程中，雾霾呈现的时空特性。结果表明，北京地区夏季GNSS水汽含量最高，基本保持在100~160 mm之间，秋季次之，冬季和春季水平相当且最少；雾霾存在较强的季节性变化，冬季$PM_{2.5}$含量明显高于其他3个季节，雾霾最严重时$PM_{2.5}$含量达到190 μg/m³；整个冬季雾霾指数居高不下，GNSS水汽处于较低水平，水汽较少不足以抑制雾霾天气的发生。通过线性回归分析得到北京地区2019–12–01—2020–02–28的$PM_{2.5}$与PWV的相关系数为0.35，呈正相关；整个夏季GNSS水汽一直处于较高水平，雾霾指数处于较低水平，通过线性回归分析得到北京地区2020–06–01—2020–08–31的PWV与$PM_{2.5}$的相关系数为–0.42，呈负相关。综上所述，GNSS水汽在一定程度上有助于雾霾天气的监测，为雾霾监测与治理提供参考依据。

参考文献

[1] 刘博威. GPS反演大气可降水量与区域$PM_{2.5}$的相关性研究:以徐州地区为例[D]. 徐州:中国矿业大学,2019

[2] 任栋. 融合GNSS水汽、风速、PM_{10}的$PM_{2.5}$浓度模型研究[D]. 天津:天津城建大学,2019

[3] 朱恩慧. 地基GNSS探测水汽方法及应用研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学,2018

[4] 邬康康. 地基GNSS大气可降水量与区域$PM_{2.5}$的相关性研究[D]. 西安:西安科技大学,2020

[5] 李蓓. 呼和浩特市雾霾天气气象条件分析与初步治理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2020

[6] 李国平,黄丁发,郭洁,等. 地基GNSS气象学[M]. 北京:科学出版社,2010

[7] 何盛浩,周志敏,梁涛. 鄂中区域大雾天气中地基GPS监测的水汽总量及其演变分析[J]. 气象科技进展,2018,8(6):6-16

[8] 吕效谱,成海容,王祖武,等. 中国大范围雾霾期间大气污染特征分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(3):104-110

[9] 张双成,赵立都,吕旭阳,等. GPS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

[10] Kang C M, Lee H S, Kang B W, et al. Chemical Characteristics of Acidic Gas Pollutants and $PM_{2.5}$ Species During Hazy Episodes in Seoul, South Korea[J]. Atmospheric Environment,2004,38(28):4 749-4 760

[11] 郭洁,李国平,黄文诗. GPS可降水量与大雾天气关系的初步分析[J]. 自然灾害学报,2011,20(4):142-146

[12] 谢劭峰,梁春丽,刘中流,等. 雾霾天气与对流层延迟、气象因素的相关性分析[J]. 科学技术与工程,2018,18(9):184-188

[13] Baker H C, Dodson A H, Penna N T, et al. Ground-based GNSS Water Vapour Estimation: Potential for Meteorological Forecasting[J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics,2001,63(12):1 305-1 314

[14] 毛敏,王利,张双成,等. 上海夏季雾霾的影响因素研究[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(7):714-718

[15] 江琪,王飞,张恒德,等. 北京市$PM_{2.5}$和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学,2017, 37(3):829-837