

GPS 和无线电探空的水汽变化与 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化的相关性研究

王 勇^{1,2} 刘严萍³ 李江波⁴ 柳林涛⁵

1 天津城建大学地质与测绘学院,天津,300384

2 河北省地震工程研究中心,河北 唐山,063009

3 天津城建大学经济与管理学院,天津,300384

4 河北省气象局,河北 石家庄,050022

5 中国科学院测量与地球物理研究所,湖北 武汉,430077

摘 要:依据 2013 年北京天坛站地面 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、BJNM 站 GPS 水汽和无线电探空水汽观测资料,分别进行了 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 与 GPS 水汽、无线电探空整层(分层)水汽的比较。研究发现,夏季 GPS 水汽(PWV)变化与 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化没有明显的相关性规律;在秋、冬、春季节,GPS PWV 变化与 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化的相关系数大于 0.5;秋、冬、春季节无线电探空整层(分层)水汽变化与 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化的相关系数大于 0.5,第 3、4 层(850~3 000 m)水汽变化与 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化的相关性最佳。

关键词:水汽;GPS;无线电探空; $PM_{2.5}$; PM_{10}

中图法分类号:P228.4;P426.615 **文献标志码:**A

雾霾是空气污染和气象因素共同作用的结果。大气中的微颗粒物($PM_{2.5}/PM_{10}$)是导致能见度降低的主要因素^[1],城市大气 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 污染影响空气质量,威胁人群健康,是具有区域性特征、危害严重的大气污染物。Fang^[2]以美国东北部为例研究了夏季 $PM_{2.5}$ 空气质量的物理气候模型;Boynard^[3]利用红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASD)卫星测量技术探测了中国华北地区的冬季空气污染。近年来,我国部分学者针对北京、广州、深圳和天津等城市开展了城市 $PM_{2.5}$ 浓度特征及其影响因素的分析研究^[4-9]。

水汽(可降水量)是影响天气变化的关键要素,也是雾霾天气形成的外在影响因素之一,国内众多学者开展了 GPS 水汽的应用研究^[10,11]。研究发现,GPS 可降水量在雾霾过程前后有较大的变化^[12]。据此可以推测,水汽的变化可能会影响大气中 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的质量浓度变化。本文利用 2013 年北京市天坛站的 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 观测资料,

结合 GPS 水汽资料、无线电探空水汽资料,进行北京地表 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化与大气水汽变化的相关性研究,并对相关性结果进行分析。

1 实验数据与方法

本文研究数据主要包含 GPS 水汽(precipitable water vapor, PWV),无线电探空水汽(整层水汽和分层水汽)以及 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度观测数据 3 类数据。

1) GPS 水汽

国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)提供国际 GPS 站点的对流层延迟解算资料和气象观测数据,通过下载 BJNM 站点的对流层延迟和气象资料,依据 GPS 气象学原理可计算获得时值 GPS 水汽序列,单位为 mm。但由于 IGS 提供的 GPS 对流层延迟数据和气象数据不完整,导致解算的 GPS 水汽序列不连续,有个别天数数据缺失。

收稿日期:2015-02-12

项目资助:国家自然科学基金(41021003);大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2013-5-5-E);河北省自然科学基金(D2015209024)。

第一作者:王勇,博士,教授,主要从事 GPS 气象学研究。wangyongjz@126.com

通讯作者:柳林涛,博士,研究员。llt@asch.whigg.ac.cn

2) 无线电探空水汽

无线电探空是气象领域探测水汽的一种常用手段,利用该方法可探测各层气压、高度、温度、风速和风向等要素,利用各分界层的气压和温度观测数据可反演各层的水汽和整层水汽。无线电探空在每天的 8:00 和 20:00(北京时间)进行观测。本文收集了北京市 2013 年无线电探空观测资料,按照李国平^[13]提供的无线电探空水汽计算方法,获得无线电探空整层水汽和分层水汽,单位为 mm。

3) PM_{2.5}/PM₁₀ 浓度

北京有多个 PM_{2.5}/PM₁₀ 浓度观测站点,本文选择与 BJNM 站点最为接近的天坛站点,该站点资料为时值观测数据。北京天坛站 2013 年的 PM_{2.5}/PM₁₀ 观测资料缺失 9 月和 10 月上旬数据,其他时间也有个别天数不连续。PM_{2.5}/PM₁₀ 观测数据的单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

BJNM 站点 GPS PWV 与天坛站 PM_{2.5}/PM₁₀ 观测资料均为时值观测数据,因此本文的相关性分析均是时值数据比较;无线电探空观测站点每天观测两个时次,无线电探空水汽用于分析分层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 观测的相关性,两者相关性的计算对应每日 8 时和 20 时的两个频次。

2 GPS PWV 变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的比较

由于北京处在大陆干冷气团向东南移动的通道上,每年从 10 月到次年 5 月受来自西伯利亚的干冷气团控制,6~9 月前后受到海洋暖湿气团的影响。降水主要集中在夏季,7、8 月尤为集中。由于夏季与其他季节气候状态明显不同,因此本文将 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较分为夏季和秋、冬、春季节两个时段进行。

2.1 夏季 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较

6~8 月为北京的夏季,降水对大气中的雾霾起到了清除和冲刷作用。对于夏季水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的相关性,将选择无降水过程时段进行比较。根据天气网(<http://lishi.tianqi.com>)提供的北京历史天气查询,2013 年 6~8 月北京发生的降水日数分别为 15 天、16 天和 11 天,选择该时段持续时间 3 日或以上的时间段进行 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化和 GPS PWV 变化的比较(图 1 为其中 3 个时段两者变化的比较),统计了夏季 5 个时段的 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的相关性(表 1)。

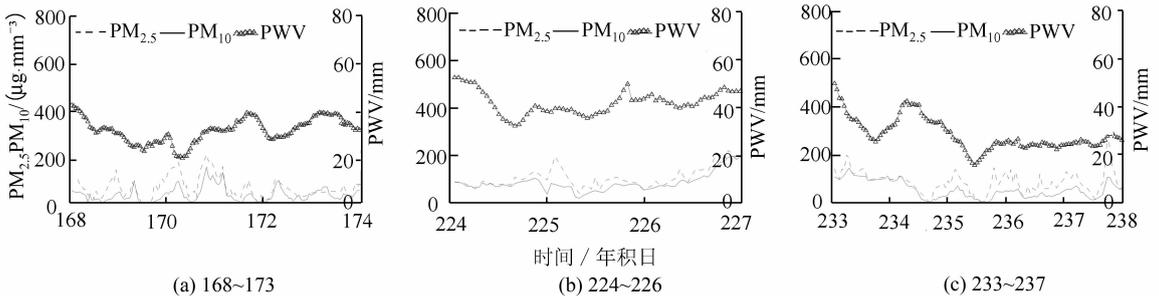


图 1 夏季 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较

Fig. 1 Comparison Between GPS PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ in Summer

表 1 夏季 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的相关性

Tab. 1 Correlation Between GPS PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ in Summer

时间	PM _{2.5} & GPS PWV	PM ₁₀ & GPS PWV
161~165	0.228	0.298
168~173	0.057	-0.043
224~226	0.392	0.275
229~231	-0.054	-0.325
233~237	0.612	0.339

通过图 1 中 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的变化比较,结合表 1 的相关性统计结果,可以看出, GPS PWV 变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化在夏季没有

明显相关性。相比其他季节,夏季雾霾发生的频率低一些,这是因为夏季经常有强对流天气发生,降水对大气中的雾霾能起到清除和冲刷作用。降水过程有助于 PM_{2.5}/PM₁₀ 的质量浓度下降。强对流天气创造了大气污染物扩散的有利条件,一般不易形成大范围的雾霾天气。

2.2 秋、冬、春季节 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较

图 2(a)~2(c)为秋、冬、春季节北京 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较,表 2 对期间多个时段两者的相关性进行了统计分析。

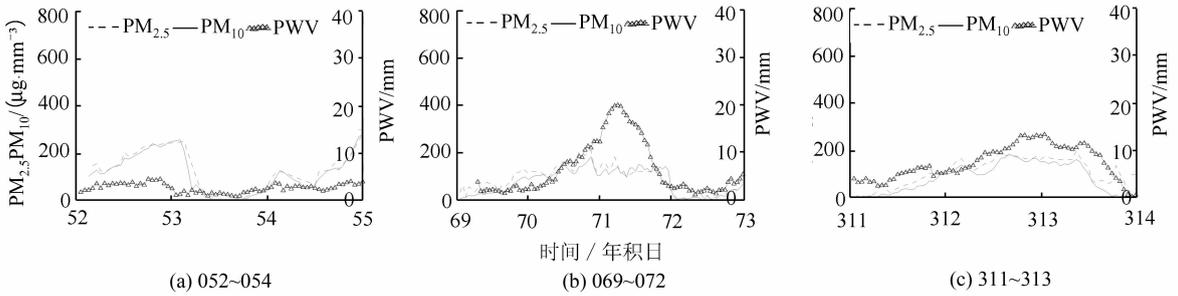


图2 秋、冬、春季节 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较

Fig. 2 Comparison Between GPS PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ Among Autumn, Winter and Spring

表2 秋、冬、春季节 GPS PWV 与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的相关性

Tab. 2 Correlation Between GPS PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ Among Autumn, Winter and Spring

季节	年积日	PM _{2.5} & GPS PWV	PM ₁₀ & GPS PWV
春季	058~063	0.739	0.417
	069~072	0.663	0.619
	122~125	0.501	0.536
	295~297	0.512	—
	300~305	0.739	0.794
秋季	307~310	0.646	0.639
	311~313	0.890	0.796
	326~331	0.601	0.604
	339~343	0.711	0.799
	冬季	022~026	0.663
046~048		0.642	0.614
052~054		0.639	0.811

由图2和表2可看出,在秋、冬、春季节,GPS PWV变化与PM_{2.5}/PM₁₀变化的相关系数大于0.5。水汽的上升对应了PM_{2.5}/PM₁₀质量浓度的上升,原因分析如下。

- 1) 水汽的增加能促进二氧化硫、氮氧化物被氧化成二次污染物颗粒,使PM_{2.5}/PM₁₀浓度提高;
- 2) 当水汽上升时,臭氧与有机物发生化学反应生成大量的微颗粒,而该微颗粒属于PM_{2.5}/PM₁₀;
- 3) 北京PM_{2.5}/PM₁₀污染源的组成中,煤燃烧所占比重最大,尤其是到了冬季,燃煤供暖,煤燃烧占的比重会更大。燃煤PM_{2.5}/PM₁₀微粒大多为难溶于水且吸湿性较差的球形硅铝质矿物颗粒,润湿性较差,因而PM_{2.5}/PM₁₀颗粒不因水汽的增加而减少。

3 秋、冬、春季节无线电探空水汽变化与PM_{2.5}/PM₁₀变化的比较

由§2的研究可知,秋、冬、春季节GPS PWV(整层水汽含量)与PM_{2.5}/PM₁₀的变化的相关系数大于0.5。本节将开展无线电探空分层水汽变化与PM_{2.5}/PM₁₀变化的比较研究。

利用无线电探空仪探测的各分界层的气压和温度观测数据可用于反演各层的水汽和整层水汽值。各分界层以气压为标准进行划分(高度为平均值),共11层:第一层PWV(1),范围为地面~1000 hPa(约0~250 m);第二层PWV(2),范围为1000~925 hPa(约250~850 m);第三层PWV(3),范围为925~850 hPa(约850~1500 m);第四层PWV(4),范围为850~700 hPa(约1500~3000 m);第五层PWV(5),范围为700~500 hPa(约3000~5500 m);第六层PWV(6),范围为500~400 hPa(约5500~7000 m);第七层PWV(7),范围为400~300 hPa(约7000~9000 m);第八层PWV(8),范围为300~250 hPa(约9000~10200 m);第九层PWV(9),范围为250~200 hPa(约10200~11500 m);第十层PWV(10),范围为200~150 hPa(约11500~13500 m);第十一层PWV(11),范围为150~100 hPa(约13500~16000 m)。

本文进行了北京市2013年的无线电探空整层水汽和分层水汽的计算,获得了全年的无线电探空水汽序列。按照季节绘制无线电探空分层水汽的垂直廓线图(图3),并计算各季节分层水汽占整层水汽的比重(表3)。

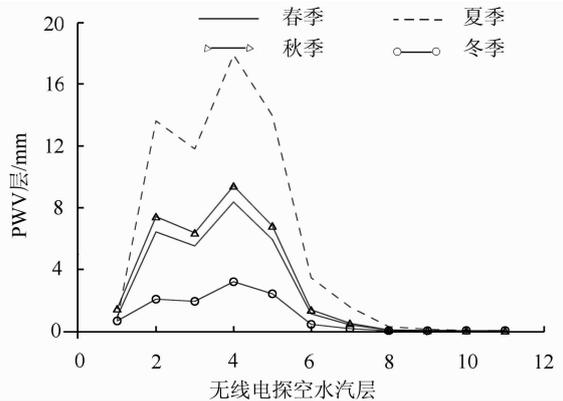


图3 不同季节水汽的垂直廓线

Fig. 3 PWV Vertical Profile in Different Seasons

表 3 不同季节水汽的垂直廓线

Tab. 3 Percent of per Layer PWV in Different Seasons

无线电探空分层	春季	夏季	秋季	冬季
1	0.033	0.011	0.043	0.060
2	0.222	0.215	0.221	0.187
3	0.192	0.185	0.191	0.174
4	0.290	0.281	0.281	0.290
5	0.205	0.220	0.203	0.220
6	0.039	0.054	0.041	0.040
7	0.014	0.025	0.015	0.015
8	0.002	0.005	0.002	0.003
9	0.001	0.002	0.001	0.003
10	0.001	0.001	0.001	0.004
11	0.001	0.001	0.001	0.004

由图 3 和表 3 可知,无线电探空第 2~5 层的

水汽占整层水汽的比重最大,由于篇幅的限制,图 4~6 仅绘制了无线电探空整层水汽、第 3 层水汽和第 4 层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较结果。由于无线电探空第 8~11 层水汽占整层水汽的比重不到 1%,因此在本研究中不予考虑。表 4 对 5 个时间段的无线电探空水汽(整层水汽、分层水汽)与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的相关性进行了统计分析。

由图 4~6 和表 4 看出,在秋、冬、春季节,无线电探空总水汽变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的相关性大于 0.5。分层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 比较中,第 3、4 层水汽变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化最为吻合,此两层水汽的上升或者下降,对应了 PM_{2.5}/PM₁₀ 观测值的上升或者下降。

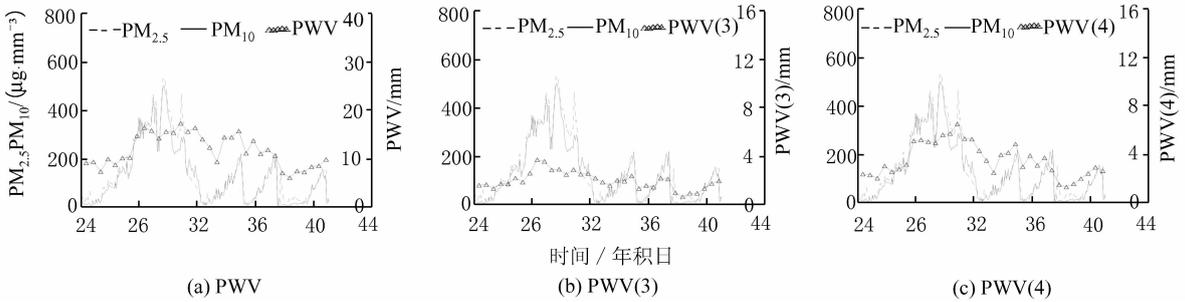


图 4 无线电探空整层/分层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较(年积日 024~040 日)

Fig. 4 Comparison Between Radiosonde Total/per Layer PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ from Doy 024 to 040

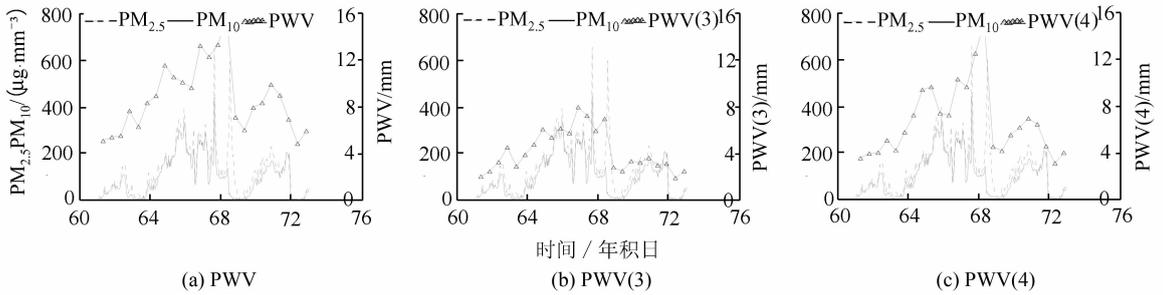


图 5 无线电探空整层/分层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较(年积日 061~072 日)

Fig. 5 Comparison Between Radiosonde Total/per Layer PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ from Doy 061 to 072

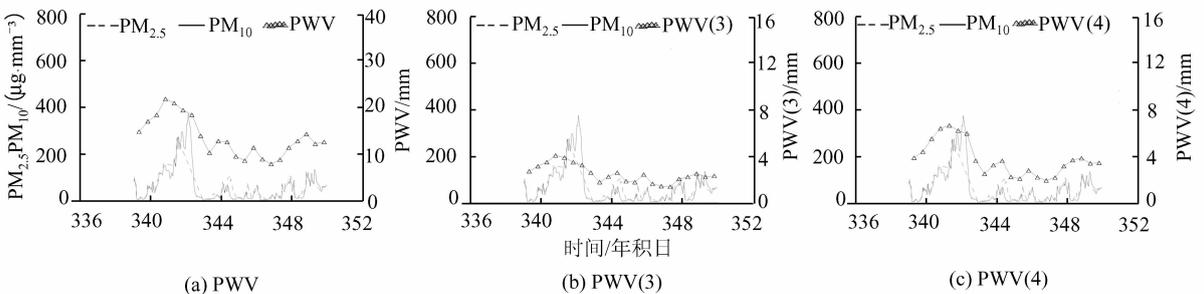


图 6 无线电探空整层/分层水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较(年积日 339~349 日)

Fig. 6 Comparison Between Radiosonde Total/per Layer PWV and PM_{2.5}/PM₁₀ from Doy 339 to 349

表4 无线电探空整层/分层水汽与PM_{2.5}/PM₁₀的相关性统计Tab. 4 Correlation Between Radiosonde Total/per Layer PWV and PM_{2.5}/PM₁₀

探空水汽	024~040		043~059		061~072		319~334		339~349	
	PM _{2.5}	PM ₁₀								
PWV	0.703 0	0.751 5	0.626 7	0.612 7	0.602 3	0.699 6	0.551 0	0.539 3	0.592 1	0.720 3
PWV(1)	-0.199 3	-0.155 8	-0.285 4	-0.238 4	-0.528 7	-0.582 7	0.407 7	0.124 8	0.033 5	0.263 5
PWV(2)	0.534 4	0.468 2	0.413 8	0.402 3	0.638 5	0.693 3	0.357 8	0.356 2	0.356 0	0.461 9
PWV(3)	0.868 2	0.843 7	0.603 6	0.599 9	0.649 0	0.723 9	0.485 9	0.516 1	0.570 1	0.608 4
PWV(4)	0.773 7	0.829 9	0.700 0	0.683 6	0.534 1	0.614 9	0.582 7	0.585 4	0.576 8	0.721 9
PWV(5)	0.405 6	0.514 5	0.564 9	0.549 6	0.359 4	0.466 4	0.608 7	0.584 5	0.671 0	0.801 8
PWV(6)	0.030 5	0.031 3	0.302 2	0.259 5	0.287 0	0.394 9	0.585 1	0.561 7	0.622 4	0.672 6
PWV(7)	-0.217 6	-0.233 9	0.006 8	-0.035 2	0.265 7	0.358 6	0.685 2	0.651 5	0.396 9	0.488 2

4 结 语

本文利用 GPS PWV、无线电探空水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 观测资料,进行了北京地表 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化与大气水汽变化的相关性研究,研究表明,夏季 GPS PWV 变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化没有明显的相关性规律;在秋、冬、春季节, GPS PWV 变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的相关系数大于 0.5;秋、冬、春季节无线电探空整层(分层)水汽与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的比较中,整层水汽变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的相关系数大于 0.5,第 3,4 层水汽变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的相关性最佳。

本文研究结果表明,在秋、冬、春季节水汽变化与 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的相关性超过 0.5,因而可以将水汽资料用于雾霾高发季节的大气微颗粒污染浓度变化的监测。

参 考 文 献

- [1] Dai Shugui. Advances in Environmental Chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005 (戴树桂. 环境化学进展 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005)
- [2] Fang Y, Fiore A M, Jean-Francois L, et al. Using Synthetic Tracers as a Proxy for Summertime PM_{2.5} Air Quality over the Northeastern United States in Physical Climate Models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 755-760
- [3] Boynard A, Clerbaux C, Clarisse L, et al. First Simultaneous Space Measurements of Atmospheric Pollutants in the Boundary Layer from IASI: A Case Study in the North China Plain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 645-651
- [4] Wang Jingli, Liu Xulin. The Discuss on Relationship Between Visibility and Mass Concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2006, 64(2): 221-227 (王京丽, 刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探 [J]. 气象学报, 2006, 64(2): 221-227)
- [5] Wu Dui, Bi Xueyan, Zheng Xuejiao, et al. Effect of Atmospheric Haze on the Deterioration of Visibility over the Pearl River Delta [J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2006, 64(4): 510-517 (吴兑, 毕雪岩, 郑雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517)
- [6] Gu Jinxia, Wu Liping, Huo Guangyao, et al. Pollution Character and Source of Water - Soluble Inorganic Ions in PM_{2.5} over Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(3): 30-34 (谷金霞, 吴丽萍, 霍光耀, 等. 天津市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征及来源分析 [J]. 中国环境监测, 2013, 29(3): 30-34)
- [7] Huang Xiaofeng, Yun Hui, Gong Zhaocheng, et al. Source Apportionment and Secondary Organic Aerosol Estimation of PM_{2.5} in an Urban Atmosphere in China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(4): 723-734 (黄晓锋, 云慧, 宫照恒, 等. 深圳大气 PM_{2.5} 来源解析与二次有机气溶胶估算 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 723-734)
- [8] Zhao Xiujuan, Pu Weiwei, Meng Wei, et al. PM_{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 416-423 (赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 [J]. 环境科学, 2013, 34(2): 416-423)
- [9] Zhu Qianru, Liu Yonghong, Xu Weijia, et al. Analysis on the Pollution Characteristics and Influence Factors of PM_{2.5} in Guangzhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(2): 15-21 (朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析 [J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 15-21)
- [10] Yan Ziping, Li Zhenhong. Comparison of Atmospheric Water Vapor Correction Models for InSAR

- Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(7): 723-726(鄢子平, 李振洪. InSAR 大气水汽改正模型的比较应用研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(7): 723-726)
- [11] Li Guoping, Chen Jiaona, Huang Dingfa, et al. Real-time Monitoring System of Precipitable Water Vapor Derived from Ground-based GPS and Its Applications in Meteorology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1 328-1 331(李国平, 陈娇娜, 黄丁发, 等. 地基 GPS 水汽实时监测系统及其气象业务应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1 328-1 331)
- [12] 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]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2): 120-123)
- [13] Li Guoping. The Remote Sensing of Precipitable Water Vapor Using Ground-based GPS Technique and Applications in Meteorology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (李国平. 地基 GPS 遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007)

The Correlation Between the Variation of $PM_{2.5}/PM_{10}$ and Precipitable Water Vapor Based on GPS and Radiosonde

WANG Yong^{1,2} LIU Yanping³ LI Jiangbo⁴ LIU Lintao⁵

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

2 Hebei Researching Center of Earthquake Engineering, Tangshan 063009, China

3 School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

4 Hebei Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050022, China

5 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: Based on the observation data of ground $PM_{2.5}/PM_{10}$, GPS Precipitable Water Vapor (PWV) and Radiosonde PWV in Beijing in 2013, the change among $PM_{2.5}/PM_{10}$, GPS PWV and Radiosonde PWV per layer of PWV was compared. We found that there is significantly positive correlation between ground $PM_{2.5}/PM_{10}$ variation and ground GPS PWV change during autumn, winter, and spring. Such a correlation does not exist in the rainy summer months. According to the comparisons between ground $PM_{2.5}/PM_{10}$ observations and aerial PWV Radiosonde observations made in autumn, winter, and spring, the correlation between ground $PM_{2.5}/PM_{10}$ variation and total aerial PWV change is also significantly positively related. The correlation between $PM_{2.5}/PM_{10}$ variation and the 3th/4th water vapor layer (850-3 000 m) PWV change is the most significantly positively related value.

Key words: precipitable water vapor; GPS; radiosonde; $PM_{2.5}$; PM_{10}

First author: WANG Yong, PhD, professor, specializes in GPS Meteorology. E-mail: wangyongjz@126.com

Corresponding author: LIU Lintao, PhD, professor. E-mail: llt@asch.whigg.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41021003; the Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, No. SKLGED2013-5-5-E; the Natural Science Foundation of Hebei Province, No. D2015209024.