

王勇, 郝振航, 任栋, 等. 中国大陆地区 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性研究[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 6-10.
[WANG Yong, HAO Zhenhang, REN Dong, et al. Correlation Analysis of GNSS ZTD and $PM_{2.5}$ Concentration in China[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 6-10. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.002.]

中国大陆地区 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性研究^{*}

王 勇¹, 郝振航¹, 任 栋¹, 占 伟²

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘 要: 鉴于 GNSS 对流层延迟与水汽之间的高度相关, 以中国大陆构造环境监测网络(CMONOC)为例, 开展 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性比较研究。通过 2015 年 12 月至 2016 年 2 月的 58 组 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性比较分析, 研究发现: 中国大陆的东北、华北、华中、部分西北地区以及部分西南地区地区的 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性为正相关, 而华东、华南、部分西北地区、部分西南地区两者的相关性为负相关。通过同期降水与风速数据的分析, 降水与风速对 GNSS 对流层延迟与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性有显著影响。

关键词: GNSS; 对流层延迟; $PM_{2.5}$; 相关性; 中国大陆

中图分类号: X43; P426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0006-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.002

伴随着社会经济的发展、城市化进程的加快, 大气污染环境问题越发严重, 其中 $PM_{2.5}$ 已成为影响我国大气环境质量的主要污染物之一^[1]。雾霾天气过程前后 GNSS 对流层延迟的变化存在一个较为明显的上升和下降过程, 该变化不同于对流层延迟的日变化^[2]。水汽是影响天气变化的重要因素之一, 利用高精度解算软件 GAMIT 获得 GNSS 测站对流层延迟结果的基础上, 去除测站静力学延迟获得对流层湿延迟, 通过模型转换获得可降水量(水汽)^[3]。针对多次雾霾天气过程, 王勇等分别以北京、河北省为例进行了 GPS 水汽与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性比较研究, 发现两者存在正相关性特性^[4-5]。其他学者以西安等地区为例开展了雾霾与 GPS 水汽的相关性分析^[6-8]。

中国大陆的其他地区的水汽变化是否与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化也存在正相关性? 其结论对于大气污染防治可产生一定的指导作用。中国大陆构造环境监测网络目前有 260 个 GNSS 连续观测站点, 通过高精度解算软件 GAMIT 可以反演测站对流层延迟(Zenith Tropospheric Delay, ZTD), GNSS ZTD 与水汽之间存在高度正相关特性^[3], 因此, 本文将利用中国大陆构造环境监测网络(CMONOC)反演的 GNSS 测站对流层延迟, 开展其与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性分析, 探讨中国大陆地区哪些地区 GNSS ZTD 与 $PM_{2.5}$ 浓度存在正相关特性。该结果可为中国区域的霾灾害天气治理提供一定的参考。

1 实验数据与方法

研究数据主要包含 GNSS ZTD 数据和 $PM_{2.5}$ 浓度数据。

由于降水对大气微颗粒物有明显的湿沉降作用^[9]。我国大陆地区冬季降水量较少, 且冬季为霾污染天气高发季节, 因此本文选择冬季进行 GNSS ZTD 和 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性比较, 研究数据时间为 2015 年 12 月 1 日到 2016 年 2 月 29 日。

GNSS ZTD 为 CMONOC 网络的 GNSS 数据解算获得的站点 ZTD 结果, 该结果由中国地震局第一监测中心计算提供。ZTD 数据为每 2 h 一次, 单位为 mm。

$PM_{2.5}$ 浓度数据由天气后报(<http://www.tianqihoubao.com/weather/city.aspx>)提供, 为日值数据, 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。为方便进行对比研究, 选点要求均含有两类数据的站点, 并对 ZTD 数据求日均值。

2 GNSS ZTD 与 $PM_{2.5}$ 浓度比较

CMONOC 网络 GNSS 站点与 $PM_{2.5}$ 浓度观测同城市的站点共有 65 个, 由于山东省 GNSS 站点数据缺失严重, 故不对山东省的站点进行相关性分析研究, 论文最终满足相关性比较的 GNSS 站点为 58 个。

^{*} 收稿日期: 2017-02-23 修回日期: 2017-04-07

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYJC21600); 河北省自然科学基金(D2015209024)

第一作者简介: 王勇(1978-), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 主要从事 GPS 气象学研究。E-mail: wangyongjz@126.com

对拥有 GNSS 观测数据和 PM_{2.5} 浓度观测的 58 个城市分别开展 GNSS ZTD 和 PM_{2.5} 浓度的相关性分析, 统计两者的相关性及其样本数和显著性检验值, 统计结果见表 1。

表 1 中国大陆地区 GNSS ZTD 与 PM_{2.5} 浓度的相关性比较

地区	省份	城市	相关性值	样本数	显著性值
东北	黑龙江	哈尔滨	0.178	86	0.101
		鹤岗	0.274	86	0.011
	辽宁	沈阳	0.293	51	0.037
		丹东	0.410	51	0.003
华北	河北	张家口	0.205	86	0.058
		承德	0.413	86	0.000
		唐山	0.309	86	0.004
	山西	太原	0.416	86	0.000
		临汾	0.266	82	0.016
	内蒙古	包头	0.058	86	0.598
		乌海	-0.179	86	0.098
	华东	上海	上海	-0.262	86
江苏		连云港	-0.036	82	0.747
		南通	-0.092	86	0.398
		盐城	-0.119	86	0.276
安徽		安庆	-0.005	86	0.965
		蚌埠	0.117	84	0.288
浙江		温州	-0.001	68	0.994
		舟山	-0.245	86	0.023
福建		厦门	0.101	81	0.368
华中		河南	郑州	0.383	82
	鹤壁		0.401	86	0.000
	湖北	武汉	0.043	80	0.706
		荆门	0.402	77	0.000
华南	广东	汕头	0.004	86	0.968
		韶关	0.098	85	0.370
		珠海	0.068	86	0.532
	广西	南宁	-0.167	77	0.147
		北海	-0.162	73	0.171
	河池	-0.182	84	0.462	
	海南	三亚	-0.414	86	0.000
西北	宁夏	银川	-0.023	86	0.832
		中卫	-0.184	84	0.868
	甘肃	兰州	-0.373	64	0.002
		定西	-0.044	84	0.694
		嘉峪关	0.160	84	0.146
		平凉	0.005	86	0.961
	陕西	西安	0.443	84	0.000
		延安	0.346	84	0.000
		安康	0.135	86	0.214
	青海	西宁	-0.258	86	0.016
		玉树	0.087	85	0.431
	新疆	和田	0.207	84	0.059
		库尔勒	-0.092	86	0.402
		克拉玛依	-0.167	85	0.128
		石河子	-0.416	76	0.000

续表 1

地区	省份	城市	相关性值	样本数	显著性值
西南	四川	攀枝花	-0.174	86	0.109
		泸州	-0.175	84	0.110
		遂宁	-0.176	86	0.105
	云南	昆明	0.106	86	0.332
		临沧	0.181	61	0.163
		丽江	0.363	82	0.001
		文山	0.301	80	0.007
		楚雄	0.174	86	0.109
	贵州	贵阳	-0.237	82	0.032
	西藏	拉萨	-0.238	82	0.031
		昌都	0.206	51	0.147
		日喀则	-0.111	78	0.335

由表 1 可以看出, 在中国大陆地区的部分地区 GNSS ZTD 与 PM_{2.5} 浓度存在正相关特性, 部分地区存在负相关特性, 部分地区则显著性检验值较差。本文假定显著性值低于 0.05 的数据为通过检验。由于数据为日值数据, 数据量少, 部分站点的显著性检验值没有通过检验。假定显著性值低于 0.05 的数据为通过相关性检验, 满足条件的数据为 22 个(表 2), 图 1 为部分通过显著性检验的站点的 GNSS ZTD 与 PM_{2.5} 浓度的比较。

表 2 通过显著性检验的 GNSS 站点 ZTD 与 PM_{2.5} 浓度的相关性统计

地区	省份	城市	相关性值	样本数	显著性值
东北	黑龙江	鹤岗	0.274	86	0.011
	辽宁	沈阳	0.293	51	0.037
		丹东	0.410	51	0.003
华北	河北	承德	0.413	86	0.000
		唐山	0.309	86	0.004
	山西	太原	0.416	86	0.000
		临汾	0.266	82	0.016
华东	上海	上海	-0.262	86	0.015
	浙江	舟山	-0.245	86	0.023
华中	河南	郑州	0.383	82	0.000
		鹤壁	0.401	86	0.000
	湖北	荆门	0.402	77	0.000
华南	海南	三亚	-0.414	86	0.000
西北	陕西	西安	0.443	84	0.000
		延安	0.346	84	0.000
	甘肃	兰州	-0.373	64	0.002
	青海	西宁	-0.258	86	0.016
	新疆	石河子	-0.416	76	0.000
西南	云南	丽江	0.363	82	0.001
		文山	0.301	80	0.007
	贵州	贵阳	-0.237	82	0.032
	西藏	拉萨	-0.238	82	0.031

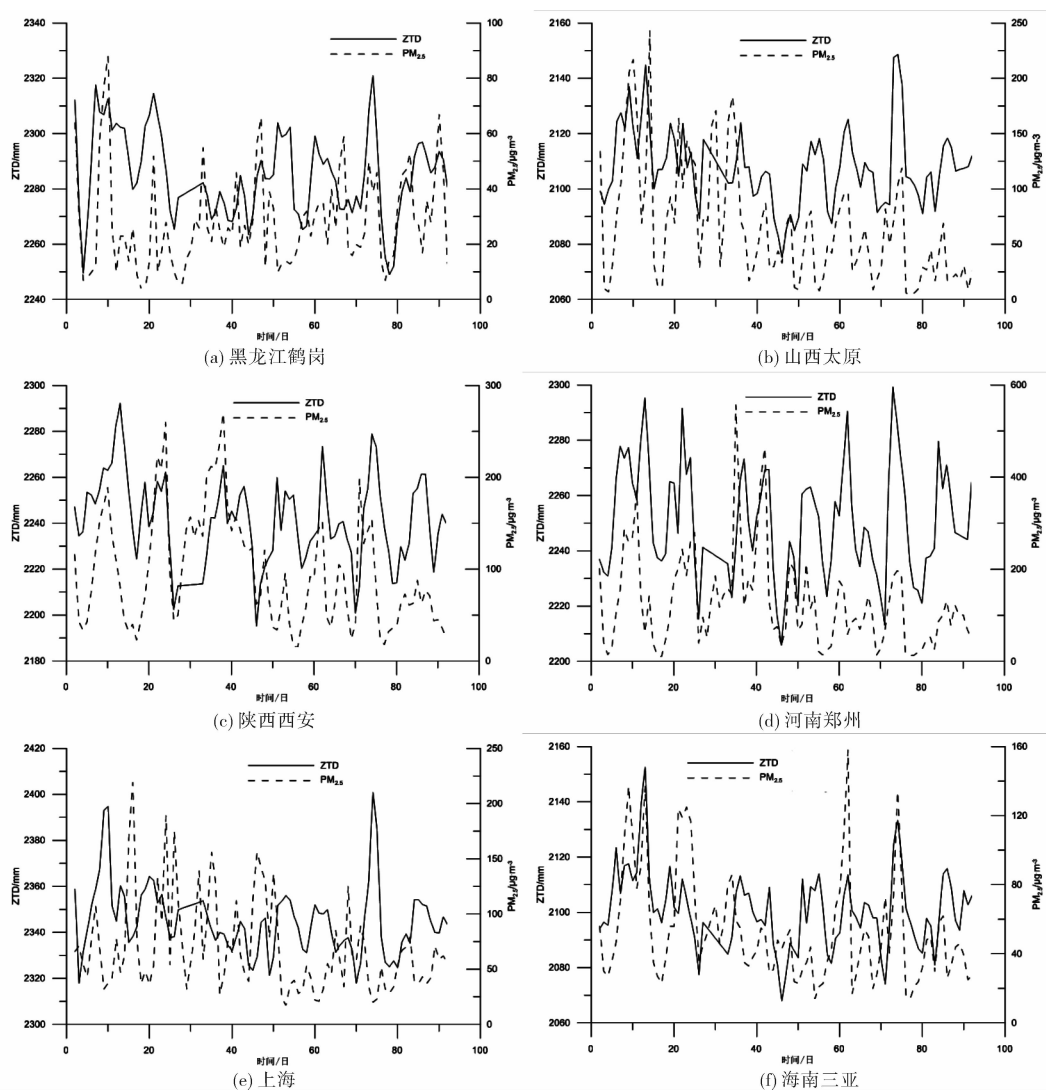


图1 GNSS ZTD 与 $PM_{2.5}$ 浓度的比较

由表1、表2和图1中国大陆地区的GNSS ZTD与 $PM_{2.5}$ 浓度的比较可看出,东北、华中、华北地区与部分西北地区以及部分西南地区GNSS ZTD与 $PM_{2.5}$ 浓度之间呈现正相关特性,而华东、华南、部分西北地区和部分西南地区GNSS ZTD与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现负相关特性。南部地区和西部地区相关性比较未通过显著性检验,与当地天气情况(主要是风速、降水)存在一定关系。风速的变化与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现负相关特性^[10]。降水对大气颗粒物不同组分的去除效果虽略有不同,但总体上对颗粒物的去除作用显著^[11]。在南部、西部冬季仍有明显降水过程和大风天气。表3和表4分别统计了2015年12月至2016年2月GNSS站点所在城市的降水天数和风速大于3级的天数。

由表3、表4的GNSS站点城市的降水天数和风速情况可以看出,由于受明显降水和风力影响,

$PM_{2.5}$ 浓度降低,ZTD数据与 $PM_{2.5}$ 质量浓度无明显相关性,甚至呈现负相关特性。新疆西藏地区由于地广人稀,没有太多的重工业, $PM_{2.5}$ 浓度变化不明显,该区域 $PM_{2.5}$ 浓度与GNSS ZTD不存在正相关特性。

3 结论

本文以中国大陆构造环境监测网络的GNSS ZTD数据与所在城市的 $PM_{2.5}$ 浓度数据开展相关性研究,获得以下结论。

(1)中国大陆地区的东北、华中、华北、部分西北地区以及部分西南地区GNSS ZTD数据与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现明显正相关特性。由于该地区霾污染天气频发,GNSS ZTD变化与 $PM_{2.5}$ 浓度均出现显著上升过程。

表 3 GNSS 站点城市降水天数统计

地区	省份	城市	2015 年 12 月/d	2016 年 1 月/d	2016 年 2 月/d
东北	黑龙江	鹤岗	8	7	7
	辽宁	沈阳	7	1	4
		丹东	7	2	4
华北	河北	承德	3	3	2
		唐山	3	3	2
	山西	太原	2	3	3
		临汾	2	3	3
华东	上海	上海	11	17	7
	浙江	舟山	9	16	8
华中	河南	郑州	5	5	3
		鹤壁	0	4	2
	湖北	荆门	8	10	4
华南	海南	三亚	2	14	2
西北	陕西	西安	3	8	3
		延安	3	3	2
	甘肃	兰州	3	5	2
	青海	西宁	2	5	4
	新疆	石河子	4	4	3
西南	云南	丽江	4	5	9
		文山	22	16	20
	贵州	贵阳	23	28	13
	西藏	拉萨	0	0	1

注: 降水次数包含了降雨次数、降雪次数以及雨夹雪次数情况。

表 4 GNSS 站点城市风力统计(风速大于 3 级)

地区	省份	城市	2015 年 12 月/d	2016 年 1 月/d	2016 年 2 月/d
东北	黑龙江	鹤岗	30	27	27
	辽宁	沈阳	15	7	10
		丹东	11	16	12
华北	河北	承德	9	15	14
		唐山	10	21	15
	山西	太原	7	16	16
		临汾	9	12	12
华东	上海	上海	7	10	8
	浙江	舟山	15	18	16
华中	河南	郑州	11	10	14
		鹤壁	3	18	21
	湖北	荆门	12	17	19
华南	海南	三亚	30	31	29
西北	陕西	西安	0	1	0
		延安	0	0	0
	甘肃	兰州	1	5	4
	青海	西宁	0	1	0
	新疆	石河子	4	3	1
西南	云南	丽江	0	0	6
		文山	0	0	0
	贵州	贵阳	0	0	1
	西藏	拉萨	3	2	16

(2) 华东、华南、部分西北地区和部分西南地区 GNSS ZTD 数据与 PM_{2.5} 浓度呈现负相关特性, 原因为受降水冲刷和风力影响, PM_{2.5} 浓度降低。

(3) 未通过检验的其他地区因数据缺失严重, 今后可以采用更长时序数据进行相关性分析。

参考文献:

- [1] 王佳. 郑州市 PM_{2.5} 污染特性及其源解析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [2] 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.
- [3] 王勇, 刘严萍. 地基 GPS 气象学原理与应用研究[M]. 北京: 中国测绘出版社, 2012.
- [4] 王勇, 刘严萍, 李江波. 不同季节的北京市 GPS 可降水量与 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(3): 365–367.
- [5] 王勇, 刘严萍, 李江波. 河北省 GPS 水汽与 PM_{2.5} 质量浓度的比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(1): 40–42.
- [6] 张双成, 张鹏飞, 范朋飞. GPS 对流层改正模型的最新进展及对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 91–95.
- [7] 吕旭阳. GPS 技术用于雾霾天气监测的探索研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [8] 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.
- [9] 韩燕, 徐虹, 毕晓辉, 等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 193–200.
- [10] 王勇, 刘严萍, 李江波, 等. 水汽和风速对雾霾中 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的影响[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 5–7.
- [11] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. 中国科学, 2005, 35(2): 169–176.

Correlation Analysis of GNSS ZTD and PM_{2.5} Concentration in China

WANG Yong¹, HAO Zhenhang¹, REN Dong¹ and ZHAN Wei²

(1. *Tianjin Chengjian University School of Geology and Geomatics, Tianjin 300384, China;*

2. *First Crustal Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

Abstract: According to the high correlation between GNSS zenith tropospheric delay (ZTD) and precipitable water vapor (PWV), the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) is taken as an example to study the correlation between GNSS ZTD and PM_{2.5} concentration in China. Based on the comparisons of GNSS ZTD and PM_{2.5} concentrations from December 2015 to February 2016, it is found that there are positive correlations between GNSS ZTD and PM_{2.5} concentration in Northeast China, North China, Central China, part of Northwest China and part of Southwest China. While there are negative correlations in east China and south China, part of northwest China and southwest China. According to the analysis of precipitation and wind velocity during the same period, it was found that precipitation and wind velocity are shown significant influence on the correlation between GNSS ZTD and PM_{2.5} concentration. In the regions of positive correlation of GNSS ZTD and PM_{2.5} concentration, the change of GNSS ZTD is positively corresponding to the change of PM_{2.5} concentration.

Key words: GNSS; ZTD; PM_{2.5}; correlation; China mainland

(上接第 5 页)

Structure Survivability Evolution Analysis of Long Distance Water Conveyance Network under Sequential Attack

ZHENG Xiazhong^{1,2}, WANG Fei², CHEN Shu^{1,2} and HE Junmei^{1,2}

(1. *Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges*

University, Yichang 443002, China; 2 *College of Hydraulic & Environmental Engineering,*

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To explore survivability evolution law of long distance water conveyance system under the deliberate attack, the evolution simulation model is constructed based on the graph theory and the theory of complex network. The long distance water delivery network is established according to its composition, the sequential attack way is determined by analyzing the characteristics of the node and edge attacked; the node clustering coefficient is calculated and the node betweenness centrality is insured to describe the destruction of the node, and use it as the selection criteria of Sequential attack target node. The survivability and key node degree of water network are defined on the basis of water conveyance system efficiency of node attack; Finally, a simulation example is given and the results are as follows: Sequential attack path from the center to the edge of the network, the network survivability is gradually reduced until the network paralysis under the deliberate attack; The whole water conveyance network key nodes is 65, 39, 50, 38 which has greatest impact on system survivability and should focus on monitoring and optimization. This method can provide theoretical guidance for the analysis of the long distance water resources protection and emergency surveillance system

Key words: survivability; sequential attack; complex network; water conveyance structure; long distance water conveyance system