

刘严萍. 基于快速傅立叶变换的短时水汽变化周期研究[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 60–63, 83. [LIU Yanping. Study on Short-term precipitable water vapor periodic change based on fast fourier transform[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 60–63, 83. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.012.]

基于快速傅立叶变换的短时水汽变化周期研究^{*}

刘严萍

(天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘要: 水汽对于强降水过程形成、PM 微颗粒生成及雾霾形成至关重要, 水汽的短时周期变化可为暴雨预警、雾霾形成机理分析提供参考。该文采用快速傅立叶变换方法开展短时水汽变化周期研究。开展无线电探空水汽的快速傅立叶变换, 分析无线电探空水汽周期; 利用快速傅立叶变换方法开展 GNSS 水汽短时变化周期分析, 并开展与温度、相对湿度、气压的变化周期比较分析。研究发现: 水汽存在日周期、半日周期以及 3 h(接近 3 h) 的周期变化。相对于温度、相对湿度和气压来说, 水汽除了存在相同的日周期、半日周期外, 还存在更短时间的周期变化, 说明水汽对于太阳辐射更为敏感。

关键词: 水汽; GNSS; 无线电探空; 快速傅立叶变换

中图分类号: P642; X43; X915.5 **文献标志码:** A

文章编号: 1000-811X(2020)01-0060-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.012

水汽是大气中最活跃的组分, 虽然含量不高, 但其时空变化对强降水过程、PM_{2.5} 和雾霾天气形成产生较大的影响。获取水汽的传统手段主要有无线电探空、卫星遥感、水汽辐射计, 无线电探空探测水汽具有观测精度高特点, 但其时间分辨率(每日两次)和空间分辨率(站网密度)较低; 卫星遥感具有较好的全球覆盖率和较高的水平分辨率, 但垂直分辨率和时间分辨率较低, 云量较多时影响其观测水汽精度; 水汽辐射计具有观测精度高、时间分辨率高的优势, 但其价格昂贵、强降水期间观测精度受影响; 传统的水汽探测手段存在局限性。利用 GNSS 反演水汽具有时空分辨率高、精度高、不受天气影响的优点, 成为目前水汽探测的重要手段。

GNSS 气象学由 1992 年 Bevis 提出^[1], 是大地测量与气象学的研究热点。GNSS 气象学的研究涉及 GNSS 水汽反演、GNSS 水汽三维层析、GNSS 水汽用于极端天气/气候研究、雾霾变化等方面。多星座全球导航卫星系统观测资料可以提高三维湿折射重建的精度, 多模 GNSS 观测值可弥补单系统观测分布不均的状况, 多模 GNSS 能够明显改善层析效果^[2]。水汽序列可用于气候变化分析, 对于厄尔尼诺-南方涛动的响应, GNSS 水汽可用于指示 ENSO 事件的演变^[3-4]。

水汽是光化学过程、与 PM 微颗粒形成雾霾必不可少的关键要素^[5], 利用 GNSS 可反演高时空分辨率、高精度的水汽序列。GNSS 水汽用于雾霾的

可行性研究由王勇 2014 年首次提出^[6], 并开展了水汽和风速对 PM_{2.5}/PM₁₀ 变化的影响研究^[7], 此后国内多位学者开展了 GPS 水汽(ZTD)变化与雾霾(PM_{2.5})的相关性研究, 研究发现: GPS 水汽与 PM_{2.5} 浓度存在正相关特性, 论证了 GNSS 水汽用于雾霾研究的可行性^[8-11]。将中国大陆地区分区开展 GNSS 对流层延迟与 PM_{2.5} 浓度的相关性比较, 不同区域两者相关性存在差异, 并进行了原因分析^[12]。王笑蕾利用 EMD 和小波分解方法对 GPS 水汽短时间序列分析, 探测出 GPS 测站存在日和半日的周期振荡, 并开展了水汽日变化和半日变化的原因分析^[13]。

水汽对于强降水过程形成、PM 微颗粒生成及雾霾形成至关重要, 研究其变化周期可为暴雨预警、雾霾形成机理分析提供参考。水汽是否存在比日波和半日波更短的周期变化? 该文将依据无线电探空和 GNSS 水汽数据, 利用快速傅立叶变换方法开展短时水汽变化周期研究。

1 研究数据与研究方法

1.1 研究数据

水汽探测的主要方法包括无线电探空和 GNSS, 该文选择此两种水汽数据开展水汽周期性变化分析。

^{*} 收稿日期: 2019-06-18 修回日期: 2019-08-29

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC21600)

作者简介: 刘严萍(1979-), 女, 汉族, 河南汝南人, 博士, 讲师, 主要从事城市管理与公共安全研究。E-mail: liuxiawy@126.com

(1) 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。该文无线电探空站点选择河北省的邢台和张家口两个站点开展相关分析。

(2) GNSS 水汽

河北省平山地貌为山地类型, 三河地处平原地区, 该文选择此两个站点开展 GNSS 水汽变化周期分析研究。GNSS 水汽由河北省 GNSS 连续观测数据反演获得, GNSS 数据时间为 2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日, 其解算方案如下: 解算软件为高精度 GNSS 定位定轨软件 GAMIT 10.6, 星历为精密星历, 解算方式为松弛解模式, 卫星高度角设为 10° , 为获得绝对量的天顶对流层延迟, 与国内多个 IGS 站点 (BJFS、LHAZ、SHAO、WUHN、URUM) 的 GNSS 数据联合解算, 以天为单位进行解算, 每小时估算一个 ZTD 值 (ZTD, Zenith Tropospheric Delay), 结合测站气象观测数据可计算获得河北省平山和三河测站时值水汽^[14], GNSS 水汽的单位为 mm。

1.2 快速傅立叶变换

傅立叶变换是一种信号分析方法, 其可分析信号成分, 也可用这些成分合成信号。许多波形可作为信号的成分, 比如正弦波、方波、锯齿波等, 傅立叶变换用正弦波作为信号的成分, 将时域上的波形分解成正弦波的过程就是傅立叶变换, 傅立叶正变换可以将波形分解, 投影到频域上。离散傅里叶变换 (DFT) 是傅里叶变换在离散系统中的表示形式。但是 DFT 的计算量非常大, FFT 就是 DFT 的一种快速算法。基于傅里叶 (Fourier) 变换的信号频域表示, 揭示了时间函数和频谱函数之间的内在联系, 傅立叶变换适合周期性的数据。

2 短时水汽变化周期分析

2.1 无线电探空水汽周期变化

气象领域水汽探测最常用的方法为无线电探空法, 由于成本较高, 无线电探空常规观测为 1 d 两次观测 (北京时间 08:00 和 20:00)。根据快速傅立叶变换原理, 采用 1 d 两次观测的无线电探空水汽数据, 仅能分析出水汽的日变化周期。因 2008 年北京夏季奥运会, 河北省在 2006 年 8 月 - 9 月开展了无线电探空 1 d 四次的水汽探测, 通过收集该时间段水汽数据, 利用快速傅立叶变换方法研究无线电探空水汽的日波和半日波变化。探空数据时间为 2006 年 8 月 5 日 20 时 ~ 2006 年 9 月 13 日 14 时 (1 d 四次观测, 每日的 2 时, 8 时, 14 时和 20 时 (北京时间)), 无线电探空站点为邢台和张家口。图 1 为邢台、张家口两个站点的无线电探空水汽序列。

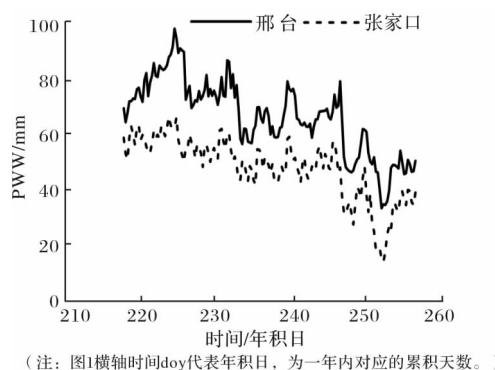


图 1 无线电探空水汽时间序列

利用快速傅立叶变换方法处理邢台、张家口两个站点的无线电探空水汽序列, 获得无线电探空水汽快速傅立叶变换结果 (图 2)。图 2 中横轴代表频率, 1 cpd 对应为 1 d 的周期, 2 cpd 对应了 0.5 d 的周期。

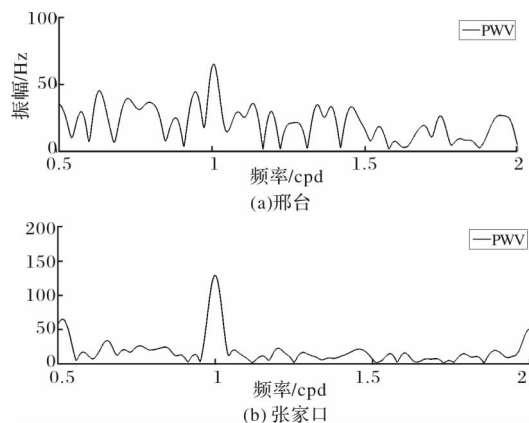


图 2 无线电探空水汽快速傅立叶变换结果

由图 2 可知, 通过快速傅立叶变换分析, 可看出利用无线电探空探测的水汽存在日波和半日波的变化。

2.2 GNSS 水汽周期变化

利用快速傅立叶方法处理 2014 年三河、平山两个站点的 GNSS 水汽序列, 获得 GNSS 水汽快速傅立叶变换结果 (图 3)。

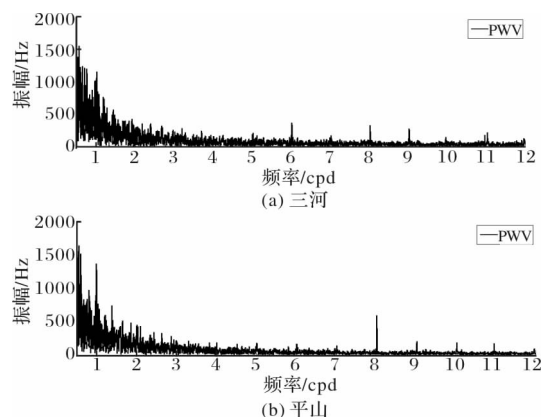


图 3 GNSS 水汽快速傅立叶变换结果

由图 3 可知, GNSS 水汽不仅存在 1 cpd、2 cpd 频率的变化, 还存在 4、6、8 等 cpd 的周期变化。水汽变化存在季节差异, 不同季节的水汽是否存在不同的周期变化? 图 4 为平山站点不同季节的水汽快速傅立叶变换结果, 图 5~图 8 为三河站点不同季节的水汽、温度、相对湿度、气压的快速傅立叶变换结果。

由图 4~图 8 可知, 水汽在春、夏、秋、冬四个季节均存在 1 cpd~12 cpd 的周期变化, 其中 1 cpd、2 cpd、8 cpd 和 9 cpd 频率对应的振幅最为明

显, 说明水汽存在日周期、半日周期以及 3 h(接近 3 h)的周期变化。通过水汽与温度、相对湿度、气压的快速傅立叶变换结果比较, 温度存在日变化和半日变化, 其他周期变化不明显; 相对湿度和气压的周期变化与温度的周期类似, 也是以日变化和半日变化为主, 其他时间段内的周期变化不明显。水汽的变化除了存在日变化和半日变化, 还存在明显的 3 h 的周期变化, 这说明, 水汽对太阳辐射更为敏感, 不同季节太阳辐射存在差异, 不同季节水汽的变化也存在振幅的差异。

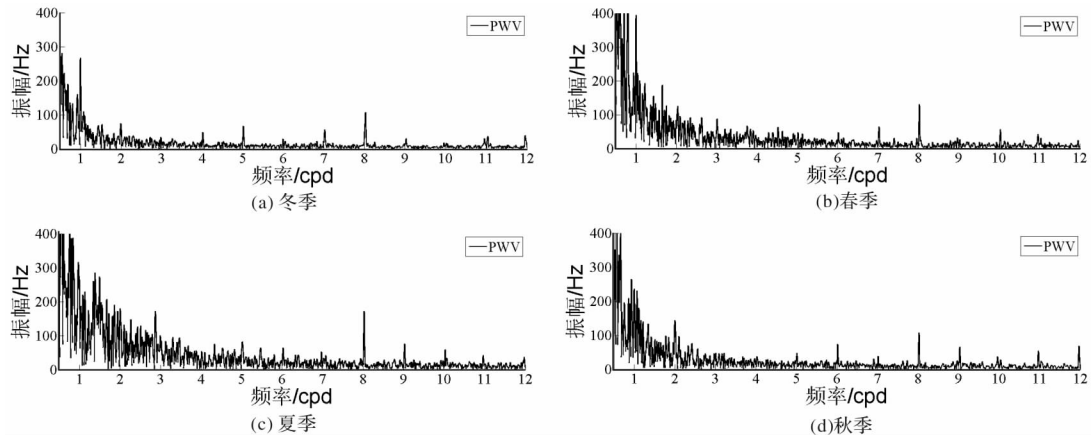


图 4 不同季节水汽快速傅立叶变换结果(平山)

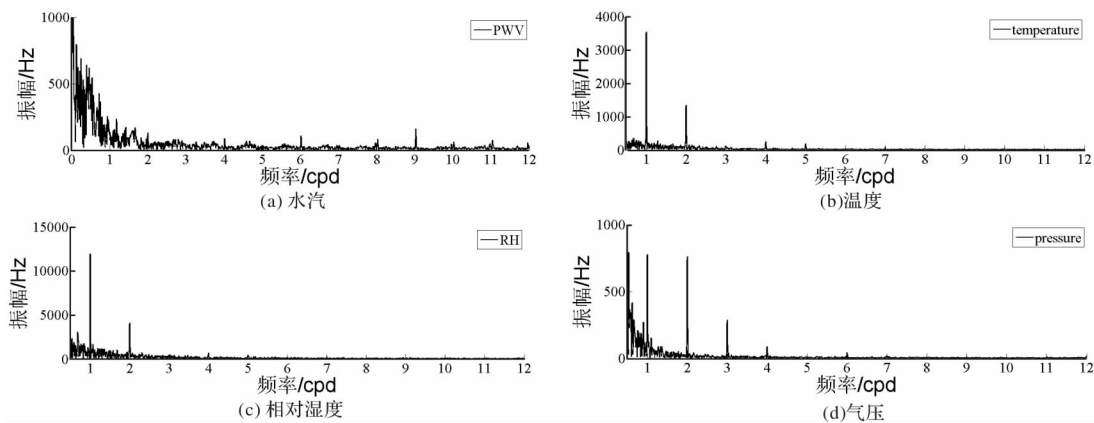


图 5 冬季快速傅立叶变换结果(三河)

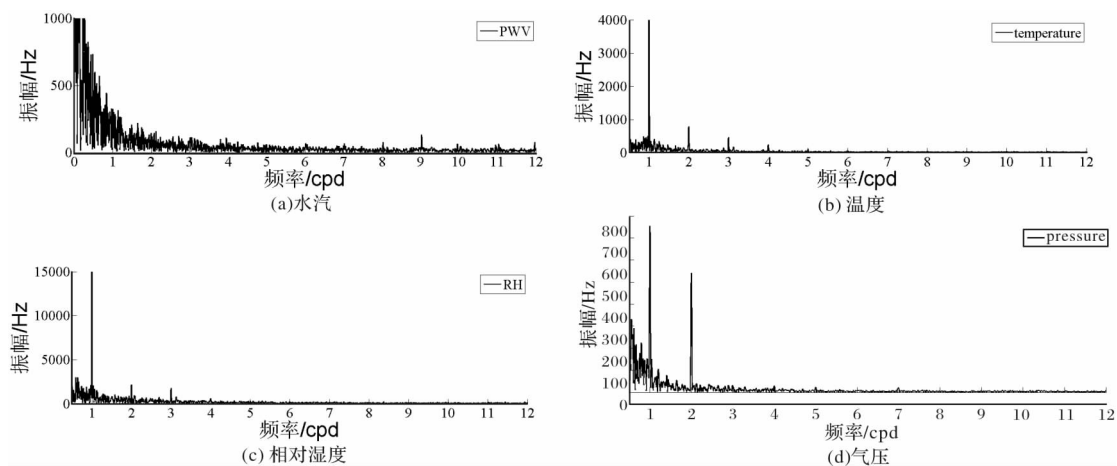


图 6 春季快速傅立叶变换结果(三河)

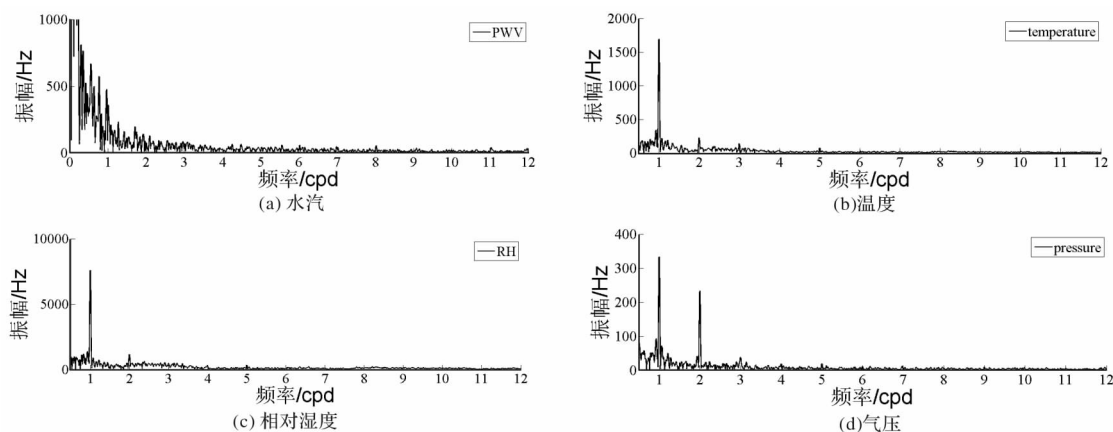


图7 夏季快速傅立叶变换结果(三河)

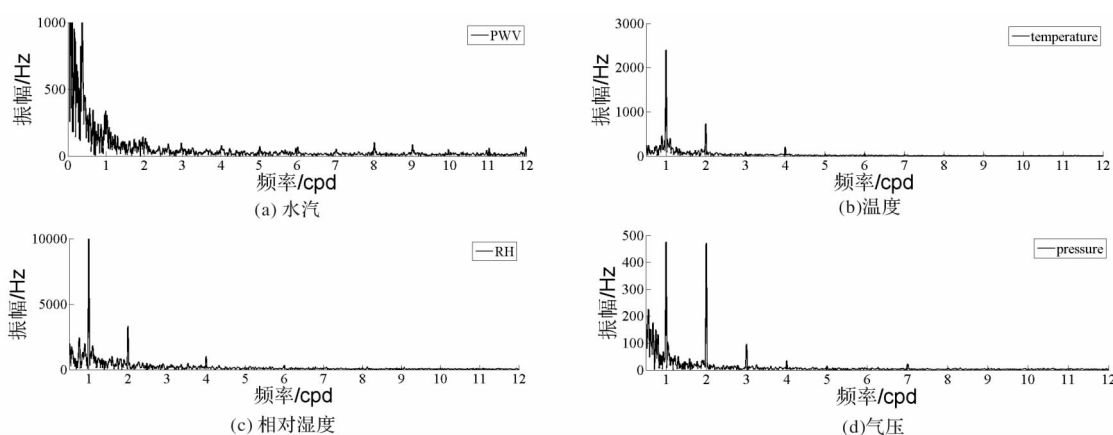


图8 秋季快速傅立叶变换结果(三河)

3 结论

水汽对于强降水过程形成、PM 微颗粒生成及雾霾形成至关重要, 该文通过快速傅立叶变换方法分别对无线电探空水汽和 GNSS 水汽开展水汽周期性分析, 获得以下结论:

(1) 无线电探空水汽的快速傅立叶变换结果显示, 水汽存在明显的日变化和半日变化, 对于更短时间的周期变化, 由于采样率的限制, 无法显示。

(2) GNSS 水汽的快速傅立叶变换结果显示, 水汽存在日周期、半日周期以及 3 h(接近 3 h) 的周期变化。相对于温度、相对湿度和气压来说, 水汽除了存在相同的日周期、半日周期外, 还存在更短时间的周期变化, 说明水汽对于太阳辐射更为敏感。

参考文献:

[1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research, 1992,

97: 15787–15807.

- [2] 王维, 宋淑丽, 王解先, 等. 长三角地区多模 GNSS 斜路径观测分布及水汽仿真层析[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 164–169, 177.
- [3] WANG Xiaoming, ZHANG Kefei, WU Suqin, et al. The Correlation between GNSS-derived Precipitable Water Vapor and Sea Surface Temperature and its Responses to El Niño-Southern Oscillation [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 1–12.
- [4] ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, YAO Wanqiang, et al. Near-global GPS-derived PWV and its Analysis in the El Niño Event of 2014–2016 [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, 179: 69–80.
- [5] 程春英, 尹学博. 雾霾之 PM_{2.5} 的来源、成分、形成及危害[J]. 大学化学, 2014, 29(5): 1–6.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 魏二虎, 杨志鑫, 刘学习, 等. 雾霾对 GPS 天顶对流层延迟与精密单点定位影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(11): 1146–1149.
- [9] 张双成, 李振宇, 戴凯阳, 等. 北京地区 GPS 水汽变化与雾霾的相关性 [J]. 测绘科学, 2016, 41(8): 43–47.
- [10] 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.

(下转第 83 页)