



武汉大学学报(信息科学版)  
*Geomatics and Information Science of Wuhan University*  
ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: COVID-19 期间中国区域 AOD 与气象因子时空特征分析  
作者: 赵庆志, 杨鹏飞, 李祖锋, 姚顽强, 姚宜斌  
DOI: 10.13203/j.whugis20210209  
收稿日期: 2021-04-26  
网络首发日期: 2021-09-13  
引用格式: 赵庆志, 杨鹏飞, 李祖锋, 姚顽强, 姚宜斌. COVID-19 期间中国区域 AOD 与气象因子时空特征分析. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210209>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13203/j.whugis20210209

引文格式: ZHAO Qingzhi, YANG Pengfei, LI Zufeng, et al . Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Meteorological Factors in China During the Period of COVID-19 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210209 (赵庆志,杨鹏飞,李祖锋,等.COVID-19 期间中国区域 AOD 与气象因子时空特征分析[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210209)

## COVID-19 期间中国区域 AOD 与气象因子时空特征分析

赵庆志<sup>1</sup> 杨鹏飞<sup>1</sup> 李祖锋<sup>2</sup> 姚顽强<sup>1</sup> 姚宜斌<sup>3</sup>

1 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安, 710054

2 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安, 710065

3 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

**摘要:** 为了探究新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)期间人类活动减少对我国空气质量影响, 分析了气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)、大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)和气温(Temperature, T)的时空异常变化, 揭示了人类活动对空气质量的影响。首先, 与全球自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)提供的 AOD 和无线电探空仪提供的 PWV 和 T 数据对比, 验证使用的 AOD、PWV 和 T 的精度。然后, 分析周末与周内期间 AOD、PWV 和 T 的长时序变化趋势, 发现人类活动对空气质量有一定影响。其次, 研究 COVID-19 期间 AOD、PWV 和 T 的时空变化, 证实人类活动与空气质量有较好的相关性。最后, 选取中国 184 个不同等级的城市进一步分析, 确定人口密度对 AOD、PWV 和 T 的影响程度, 进一步揭示了人类活动与空气质量的具体响应关系。

**关键词:** 新型冠状病毒肺炎, 大气可降水量, 气溶胶光学厚度, 空气质量

中图分类号: P208

文献标识码: A

2019年12月31日中国向世界卫生组织通报了新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)疫情。COVID-19 疫情的暴发对中国经济和社会发展产生了巨大影响。为了阻断COVID-19疫情的蔓延, 中国政府迅速采取了有效防控措施<sup>[1]</sup>。2020 年1月23日起, 对疫情最先暴发的城市湖北省武汉市采取“封城”措施, 随后几天内全国各个城市陆续启动公共卫生事件一级响应并出台相应的防控措施, 如交通严格管制、居民限制外出、禁止聚集活动、停工停业停课等<sup>[2]</sup>。然而, 上述措施对中国工业生产和居民生活都产生了重大改变, 导致空气质量发生显著变化。因此, 研究COVID-19 期间空气质量的时空异常变化对于更好地应对此类突发公共事件具有重要意义。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)主要用于描述气溶胶对光的消减作用, 是表征大气浑浊程度的关键物理量<sup>[3]</sup>。气溶胶是指悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统。它对太阳辐射的吸收和散射会改变地球大气系统的行星反照率, 从而影响大气系统的能量平衡<sup>[4]</sup>。在实际的大气中缺少气溶胶粒子形成的凝结核, 无法形成雾。因此, 雾和霾的背后都与气溶胶粒子有关<sup>[5]</sup>。此外, 气溶胶的变化与空气质量密切相关, 因此, 研究气溶胶的时空变化对于分析空气质量具有重要意义<sup>[6]</sup>。

空气质量不仅与污染源有关, 也受气象条件因素的影响<sup>[7,8]</sup>。当污染源相对稳定时, 气象条件是影响大气污染的重要因素。大气

---

收稿日期: 2021-04-26

项目资助: 国家自然科学基金青年项目(41904036)。

第一作者: 赵庆志, 博士, 副教授, 主要从事GNSS空间环境与气候变化相关研究。zhaoqingzhia@163.com

气溶胶污染是大气污染的重要形式之一，同样也受到气象因素的影响<sup>[3,9]</sup>。温度(Temperature, T)和大气水汽含量是气象条件下重要的两个因素，其中温度是影响全球气候变化的一个重要参量同时也是影响空气质量的一个关键因子<sup>[9]</sup>。大气可降水量(Precipitable Water Vapor, PWV)是有效反映大气水汽含量变化的重要指标，其表示为地表至对流层顶部单位截面积空气柱中包含的总水汽含量转换为降雨时所对应的水汽柱含量<sup>[10]</sup>。因此，研究PWV和T时空异常变化对于深入了解由气象条件导致的空气质量变化及制定有效措施具有重要意义。

COVID-19疫情的出现，导致中国空气质量发生明显变化。Xu et al. (2020)<sup>[11]</sup>发现2020年1月至3月疫情期间，兰州市颗粒物浓度下降50%。Yang et al. (2020)<sup>[12]</sup>发现COVID-19疫情期间减排时间持续越长，全球增温越明显。Yang et al.(2019)<sup>[13]</sup>发现气溶胶排放的变化会通过影响辐射和云，改变区域和全球气候。Le et al. (2020)<sup>[14]</sup>和Huang et al. (2020)<sup>[15]</sup>证实了COVID-19疫情期间气溶胶排放和气象条件变化是区域空气质量具有重要影响因素。Nichol et al. (2020)<sup>[16]</sup>分析了COVID-19期间中国大气污染状况，发现京津冀地区的气溶胶光学厚度与前一个冬季相比明显增加。Filonchyk et al.(2020)<sup>[17]</sup>分析了COVID-19期间华东地区SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO和AOD的变化，发现COVID-19期间大气空气质量有明显改善。上述研究分析了COVID-19期间不同污染物对大气空气质量的影响及其变化，但缺乏人类活动程度、人口密度和气象条件对空气质量影响的系统性研究。此外，多数研究集中在小区域，对于大范围的空气质量时空异常变研究较少。因此，上述研究得到的结论并不能较好地反映COVID-19对中国的整体影响，缺乏代表性。

为了深入研究COVID-19对中国空气质量的影响，本文选取中国区域的AOD、PWV

和T进行分析，系统研究COVID-19疫情对中国气象条件和空气质量的影响。首先，分析周末与周内期间AOD、PWV和T的正负距平变化，证实人类活动对空气质量具有一定的影响。其次，研究COVID-19期间AOD、PWV和T在不同城市的长时序变化及在中国区域的空间变化。最后，分析中国184个不同人口等级的城市中AOD、PWV和T的时序变化趋势，探究人口密度和人类活动剧烈程度对空气质量的影响。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据描述

本文选取全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术获取的PWV、ECMWF提供的PWV和T，MERRA-2提供的AOD数据，分析中国区域62个GNSS站点上在疫情期间人类活动对大气环境环境的响应。图1和表1分别给出本文所选站点分布及所使用数据集的具体信息。

#### (1) GNSS PWV数据

本文选取的1小时分辨率的PWV数据主要利用内华达大地测量实验室(Nevada Geodetic Laboratory, NGL)提供的天顶对流层延迟(Zenith Total Delay, ZTD)和ERA5提供的地面气压数据计算得到。ZTD数据利用GipsyX 1.0软件解算得到，数据的时间长度为1996-2020年，该数据可以通过<http://geodesy.unr.edu/index.php>获得<sup>[18]</sup>。联合Saastamoinen模型和气压数据可计算GNSS站点上的天顶经静力学延迟(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)<sup>[19]</sup>；然后，在ZTD中分离出ZHD，即可得到天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)。通过IGPT2w(Improved Global Pressure and Temperature 2 wet)模型计算大气加权平均温度Tm<sup>[20]</sup>，进而将ZWD数据转换为PWV, GNSS PWV的具体处理流程见2.2节。

#### (2) ECMWFT和PWV

本文所使用的T和PWV来自欧洲中期天气预报(European Centre for Medium-range

Weather Forecasts, ECMWF)中心的第五代再分析数据集 ERA5, 该数据的时空分辨率分别为1小时与 $0.2^{\circ} \times 0^{\circ}$ , 可通过<https://www.ecmwf.int/>下载。为了得到GNSS站点位置上的PWV和T, 首先对ERA5提供的PWV和T在垂直方向上利用经验公式进行高程转换, 其次在水平方向上利用双线性插值得到GNSS站点上相应的T和PWV数据<sup>[21]</sup>, PWV和T的具体插值方法见2.2节。

### (3) AOD数据

本文使用的AOD数据来源于现代研究和应用回顾分析第2版(*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2, MERRA-2*)。MERRA-2 AOD是NASA在2017年发布的新的大气再分析产品, 它来源于AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)的AOD同化值, 时空分辨率为3小时与 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ , 数据可以从<https://disc.gsfc.nasa.gov>获取<sup>[22,23]</sup>。

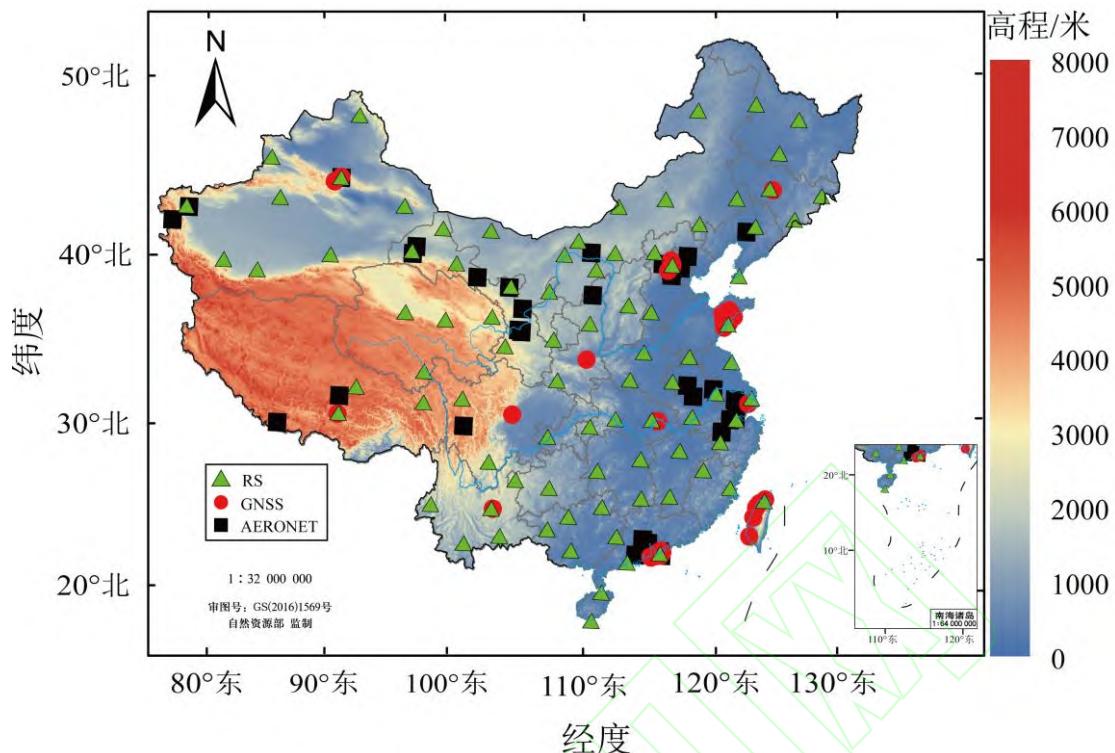
在获取AOD的众多方法中, 太阳光度计精度最高, 能够提供地面实测数据<sup>[24]</sup>。AERONET(Aerosol Robotic Network)是由NASA(National Aeronautics and Space Administration)在全球范围布设的太阳光度计并与其它气溶胶观测网络和科研机构联盟而形成的地基气溶胶监测网。该监测网提

供三个等级的AOD数据, 其中Level 1.0等级的数据未进行云检测, Level 1.5等级的数据进行云去除, Level 2.0等级的数据进行了云去除和质量检测<sup>[25]</sup>。本文选择Level 2.0的AOD数据对MERRA-2 AOD进行验证, 中国区域内AERONET站点分布如图1所示。

### (4) 其他数据

无线电探空站(Radiosonde, RS) PWV和T来自全球无线电探空仪存档版本2(IGRA2)数据集。IGRA2是由美国国家气候数据中心于2016年生成, 相比IGRA1数据集, IGRA2包含更多的无线电探空站, 数据集包括气压、气温、相对湿度和其他参数, 其数据的时间分辨率为一天2次或4次, 数据可从<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra>获取<sup>[26]</sup>。

2020年中国人口密度数据来自世界人口计划数据集(Worldpop), 其空间分辨率为1km。WorldPop成立于2013年10月, 旨在结合非洲、亚洲和美国的人口地图项目。WorldPop提供的有关人类人口分布的高分辨率、开放和当代数据, 使人们能够在国家和地区范围内准确测量当地人口分布、组成、特征、增长和动态, 该数据集可从<https://www.worldpop.org/>获取<sup>[27]</sup>。



注：本图基于审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作，底图无修改

图 1 中国区域 GNSS、RS 及 AERONET 站点的地理分布

Fig.1 Geographical distribution of GNSS, RS and AERONET stations in China

表 1 选取数据的时空分布等具体信息

Tab.1 Select the spatial and temporal distribution of data and other specific information

数据集	时空分辨率	时间覆盖度/年	数据来源
NGL ZTD	station	5 minutes	1996—2020 <a href="http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages">http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages</a>
ERA5T and PWV	0.25 °×0.25 °	hourly	1979—2020 <a href="https://www.ecmwf.int">https://www.ecmwf.int</a>
AERONET AOD	station	hourly	2001—2017 <a href="http://aeronet.gsfc.nasa.gov">http://aeronet.gsfc.nasa.gov</a>
MERRA-2 AOD	0.5 °×0.625 °	3 hours	1980—2020 <a href="https://disc.gsfc.nasa.gov">https://disc.gsfc.nasa.gov</a>
RS T and PWV	station	12 hours	1957—2016 <a href="ftp://ftp.ncdc.noaa.gov">ftp://ftp.ncdc.noaa.gov</a>
Population Density	1 km	/	2020 <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a>

## 1.2 方法

### (1) GNSS PWV计算

为了获取GNSS测站上的地表气压，利用ERA5提供的气压进行插值。在垂直方向上，对ERA5提供的GNSS测站附近的4个网格点上的气压进行转换，得到GNSS测站对应高度上的气压，如下式<sup>[28]</sup>：

$$P = P_0 (1 - 0.0000226(h - h_0))^{5.2} \quad (1)$$

式中， $P$  和  $P_0$  分别代表 GNSS 站点和 ERA5 网格点对应高度的气压值， $h$  和  $h_0$  分别为 GNSS 站点高和 ERA5 网格点高。在水平方向上，利用双线性插值将网格点气压数据插值到 GNSS 站点上。然后，根据经验公式计

算GNSS站点上的ZHD:

$$ZHD = \frac{0.002277 \cdot P}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot H} \quad (2)$$

式中,  $P$ 代表GNSS站点气压;  $\varphi$ 和 $H$ 分别代表GNSS站点纬度(rad)与站点高(km)。最后,在ZTD中分离出ZHD,得到ZWD并利用下式将ZWD转换为PWV<sup>[29]</sup>:

$$PWV = \frac{10^6}{(K_2 + K_3 / T_m) \cdot R_v \cdot \rho} \cdot ZWD \quad (3)$$

式中 $K_2$ ,  $K_3$ 和 $R_v$ 是常数,它们的值分别为 $16.48 \text{ K hPa}^{-1}$ ,  $(3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ 和 $461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\rho$ 是水汽密度。 $T_m$ 为大气加权平均温度,可依据Huang et al. (2019)提出的IGPT2w模型计算<sup>[20]</sup>。

## (2) 四分位间距法

由于多种因素导致选取的PWV、T和AOD长时序中存在异常值,本文使用四分位间距法(Inter Quartile Range, IQR)来消除时间序列中的粗差<sup>[30,31]</sup>。IQR方法的具体步骤如下:首先,依据式(4)建立各测站PWV、T或AOD的周期模型,并通过周期模型获得各测站的模型初值。其次,依据各测站的模型初值与实际值计算PWV、T或AOD残差序列。最后,对残差偏离给定异常值探测区间外的数据进行剔除,并将所对应的异常值替换为模型值,保证时间序列的完整性<sup>[32]</sup>。

$$\begin{aligned} data = & a_0 + A_1 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 2\pi\right) \\ & + A_2 \cos\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{doy}{365.25} 4\pi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $a_0$ 为PWV、T或AOD的均值,  $doy$ 为年积日,  $A_1, A_2, B_1, B_2$ 为待估参数。

IQR是假设数据符合正态分布,然后对数据进行从小到大排列,选择第一四分位数的值为下分位数Q1,第三四分位数的值为上分位数Q3,四分位距IQR表示为<sup>[33]</sup>:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (5)$$

依据IQR法的异常值探测区间为:

$$[Q_1 - 1.5 \cdot IQR, Q_3 + 1.5 \cdot IQR] \quad (6)$$

## (3) 距平分析

为了分析选取参数在疫情期间的异常变化,引入距平百分率量化疫情期间人类活动及人口分布密度对空气质量的影响。其中,气温距平百分率( $Ta$ )是指某时段的气温与常年同期温度相比的百分率,计算方法如下<sup>[34]</sup>:

$$Ta = \frac{T - \bar{T}}{\bar{T}} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $T$ 为某时段的气温,  $\bar{T}$ 为同时段的多年平均气温。依据上述计算方式也可计算多年AOD和PWV的异常变化。

## 2 结果分析

### 2.1 数据精度评估

#### (1) MERRA-2 AOD精度评估

利用AERONET实测AOD对MERRA-2 AOD进行评估。图2给出2010-2017年Beijing和Xianghe两个站点上MERRA-2 AOD和AERONET AOD的散点密度图。由图可以看出, MERRA-2 AOD与AERONET AOD具有较好的一致性,且不存在系统偏差。统计结果表明,两个站上MERRA-2 AOD的RMS和Bias分别为0.27/0.23与0.12/0.08,表明选取用于实验的AOD产品精度相对较高。

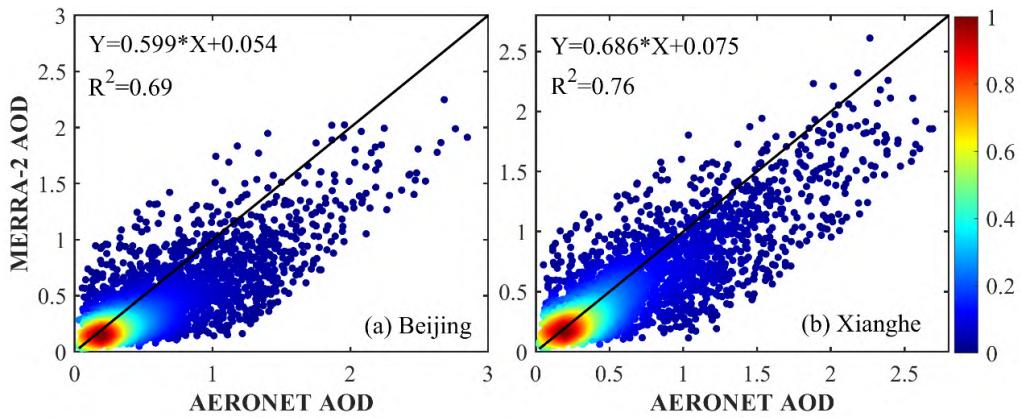


图2 2010—2017年AERONET AOD与MERRA-2 AOD对比散点密度图, 颜色代表点的密度

Fig.2 Scatter density map of AERONET AOD and MERRA-2 AOD from 2010 to 2017. The color represents the density of the dots.

### (2) GNSS PWV 精度评估

选取RS计算的PWV对GNSS PWV进行验证, 首先利用经验公式对PWV高程进行改正。图3给出两个RS和GNSS并址站在2015—2017年的PWV散点密度对比图。由图可以

看出, GNSS PWV与RS PWV数据具有很好的一致性, 且不存在系统偏差。统计结果表示, 在两个测站上, GNSS PWV的RMS和Bias分别为2.27/2.80mm与-0.40/1.72mm, 具有较高的精度。

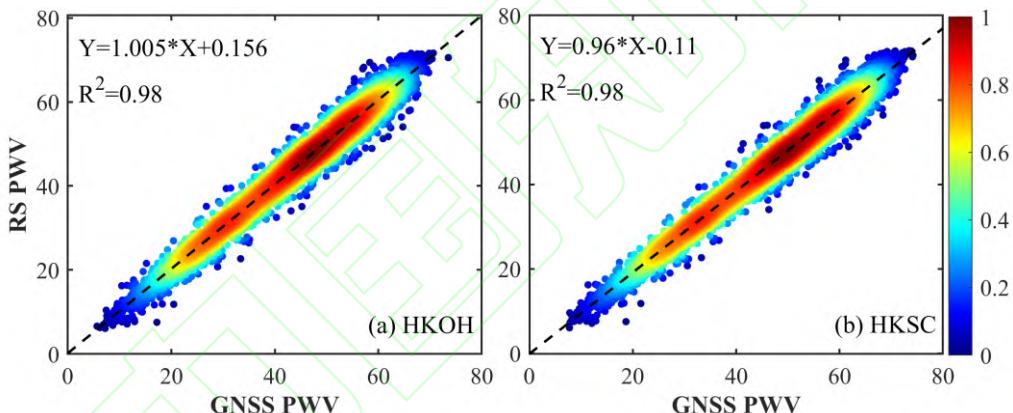


图3 2005—2017年GNSS PWV与RS PWV对比散点密度图, 颜色代表点的密度

Fig.3 Scatter density map of GNSS PWV and RS PWV from 2005 to 2017. The color represents the density of the dots

### (3) ERA5 PWV和T 精度评估

由于本文选取的GNSS站点在中国只有62个, 因此, 利用ERA5提供的PWV和T分析中国区域的气象条件变化。首先利用RS PWV对ERA5 PWV进行精度评估。图4给出了CHM53与CHM57两个站点上2005—2017年ERA5和RS的PWV和T的对比图。由图4

可以看出, ERA5提供的PWV和T与RS的数据具有较好的一致性, 且不存在系统偏差。统计结果发现, 在两个站点上, ERA5 PWV的RMS和Bias分别为1.86/2.0mm与0.27/0.41mm; ERA5 T的RMS和Bias分别为1.81/2.04°C与-0.29/0.5°C; 这表明ERA5提供的PWV和T具有较高的精度。

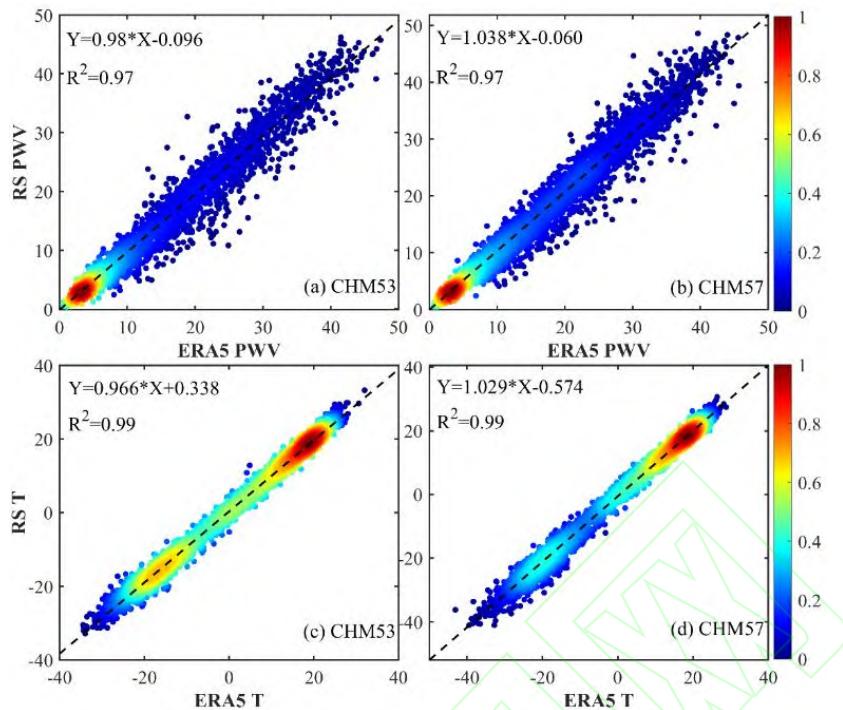


图4 2005—2017年ERA5 PWV/T与RS PWV/T对比散点密度图，颜色代表点的密度

Fig.4 Scatter density map of ERA5 PWV / T and RS PWV / T from 2005 to 2017. The color represents the density of the dots.

## 2.2 AOD、PWV和T的周末效应

本节首先探讨包含2020年疫情期间的多年周末与周内期间AOD、PWV和T的时空变化情况。通过距平分析法得到2010-2020年62个GNSS站点上AOD、PWV和T的整体变化趋势。图5给出2010—2020年周末与周内期间AOD、PWV和T在每个站点的平均距平值。由图可以看出，62个站点上AOD、PWV和T在周末与周内期间均呈现出明显相反的变化趋势，且在周内整体为正距平、周末整体为负距平。统计发现，有63%，77%和81%的GNSS站点上的AOD、PWV和T在周内为正距平。

此外，分析了不同季节周末效应对

AOD、PWV和T的影响，图6给出2010-2020年62个站点上在四个季节的周末与周内期间AOD、PWV和T的平均异常值。从图中可以明显看出，不同季节AOD、PWV和T的周末效应不同，且在秋季周内AOD、PWV和T的正异常值较为明显。统计结果表示，AOD、PWV和T在秋季周内的平均正异常值最大(0.04, 2.67mm和0.28°C)，秋季周末的平均负异常值最小(-0.014, -1.19mm和-0.11°C)。上述结果表明，人类活动会产生一定的周末效应，且在不同季节周末效应程度不同，秋季最为明显。因此周末与周内人类活动的程度和季节变化对AOD、PWV和T有一定影响且此类人类活动主要表现为交通活动的变化。

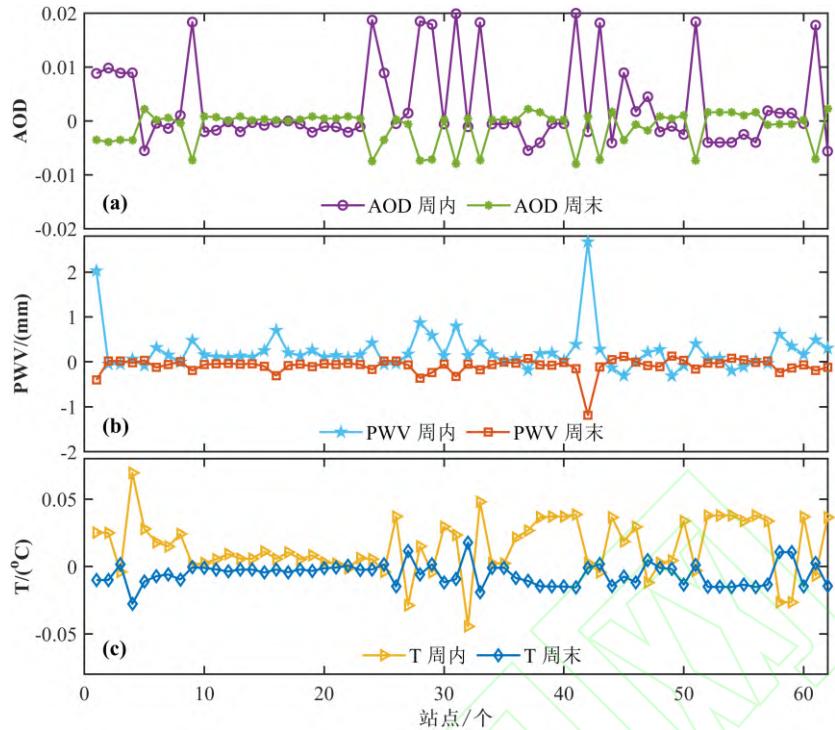


图5 2010—2020年AOD、PWV和T在周末与周内期间的距平变化分析

Fig.5 Analysis on the anomaly changes of AOD, PWV and T during the weekend and the weekday from 2010 to 2020

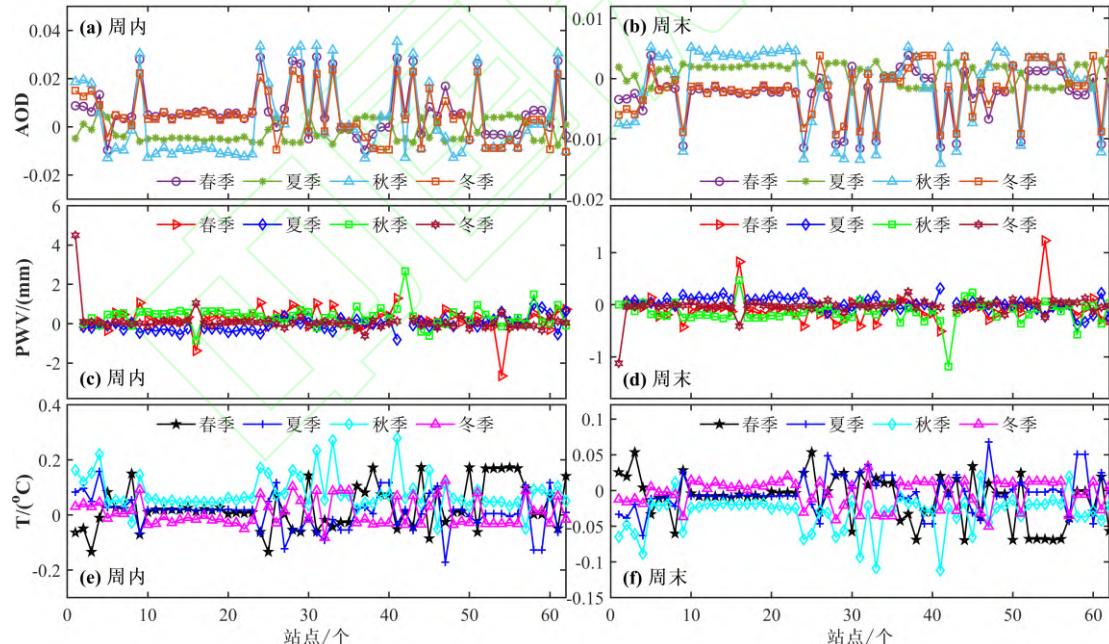


图6 2010—2020年 AOD、PWV 和 T 在不同季节周末与周内期间的距平变化

Fig.6 Anomalous changes of AOD, PWV and T in different seasonal weekend and weekday periods from 2010 to 2020

### 2.3 COVID-19期间AOD、PWV和T的时序异常分析

为探讨COVID-19期间空气质量的异常

变化，对62个GNSS站点的AOD、PWV和T的时变趋势进行分析。将武汉“封城”时间（2020.1.23—2020.4.18）作为COVID-19封锁期间，其它年份的同期时间作为非封锁期

间，对比AOD、PWV和T的时空变化情况。图7给出了2010—2020年AOD、PWV和T在封锁和非封锁情况下的距平变化情况。由图可以发现，COVID-19封锁期间多数GNSS站点上的AOD、PWV和T的平均距平值均呈现较大波动，且AOD整体呈现距平值负波动，PWV和T整体呈现距平值正波动。统计发现，封锁期间有82%的GNSS测站上AOD的距平均值呈减小状态，82%和95%的GNSS

测站上PWV和T的距平均值呈增加状态。此外，对2020年1—7月的AOD、PWV和T的时变距平进行分析。图8给出了2020年1—7月AOD、PWV和T在62个GNSS站点上的平均距平变化箱线统计图。由图可知，完整的COVID-19期间(2—3月)，AOD整体处于负距平，PWV和T整体呈现正距平。上述结果发现，COVID-19期间AOD整体为减少的趋势，而PWV和T为增长的趋势。

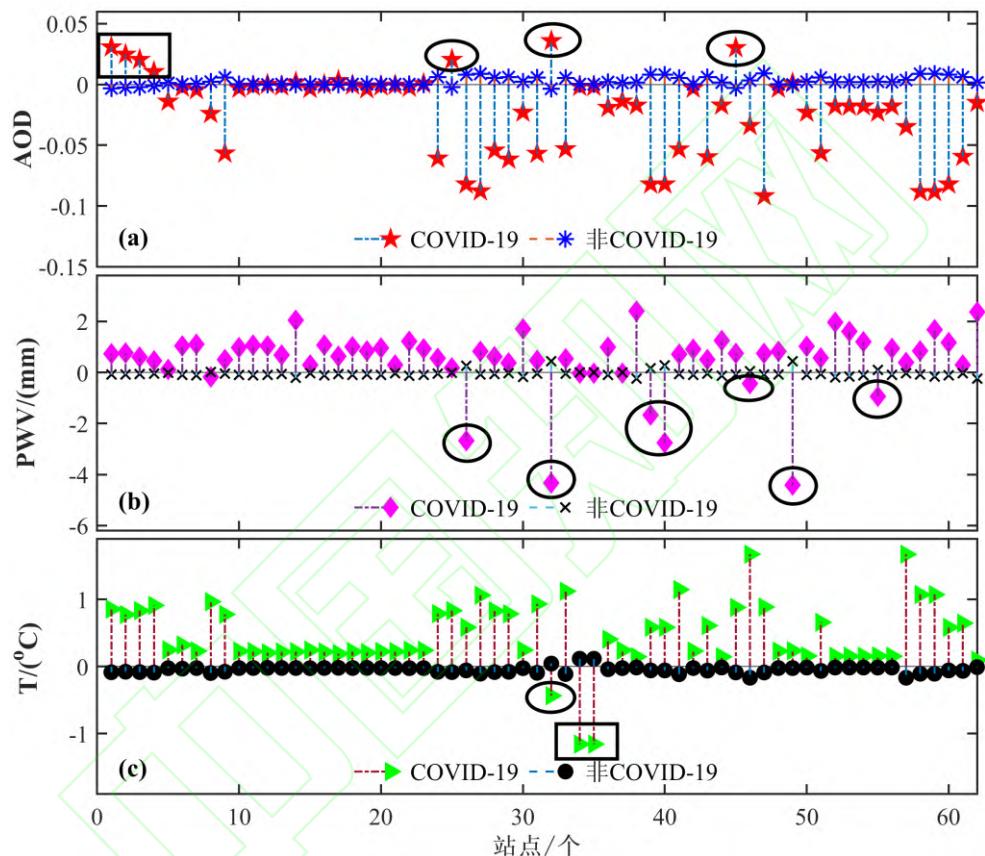


图 7 2010—2020 期间 AOD、PWV 和 T 在封锁与非封锁期间的距平变化

Fig.7 Anomaly changes of AOD, PWV and T in blockade and non blockade period from 2010 to 2020

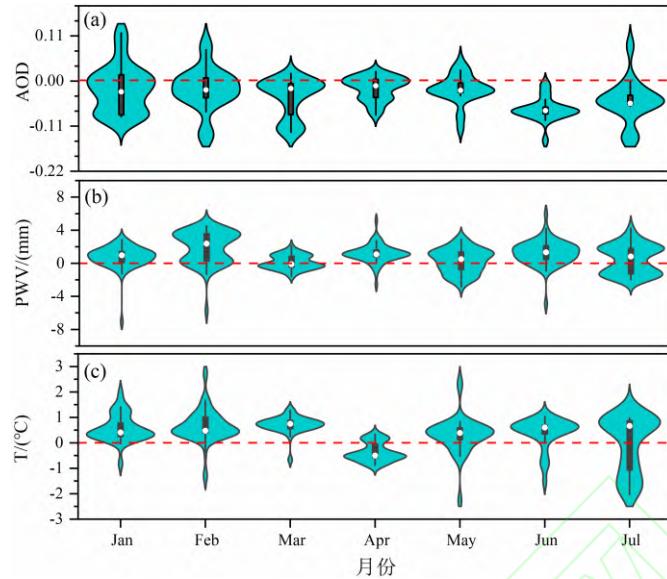


图 8 2020 年 1—7 月 AOD、PWV 和 T 的平均距平变化统计图

■ 代表 25%~75%，○代表均值

Fig.8 Statistical chart of average anomaly changes of AOD, PWV and T from January to July 2020

■ represent 25%-75%, ○ represent average

选取疫情期间人口密集的北京、上海、武汉、西安四个城市中的测站(BJNM、SHAO、WUH 和 XIAN)为例, 进一步研究各个月份 AOD、PWV 和 T 的异常变化情况(图 9)。由于 2020 年 2 月与 3 月整月均处于封锁期间, 因此选取这俩个月分析 AOD、PWV 和 T 的距平异常变化情况。由图可知, 选取四个站点上 AOD 均呈现不同程度的减少距平, PWV 和 T 均呈现不同程度的增长距平。

统计发现, AOD 距平值在 2 月份 XIAN 站上出现最小负距平值(-0.14), PWV 在 2 月份 SHAO 站出现最大正距平值(3.96mm), T 在 2 月份 WUH2 站出现最大正距平值(1.65 °C)。上述结果表明, 空气质量受人类活动影响, 且由于交通活动、工业活动、大型室外聚集活动等受限导致的人类活动减少对 AOD 的增长有抑制作用, 对 PWV 和 T 的增长有促进作用。

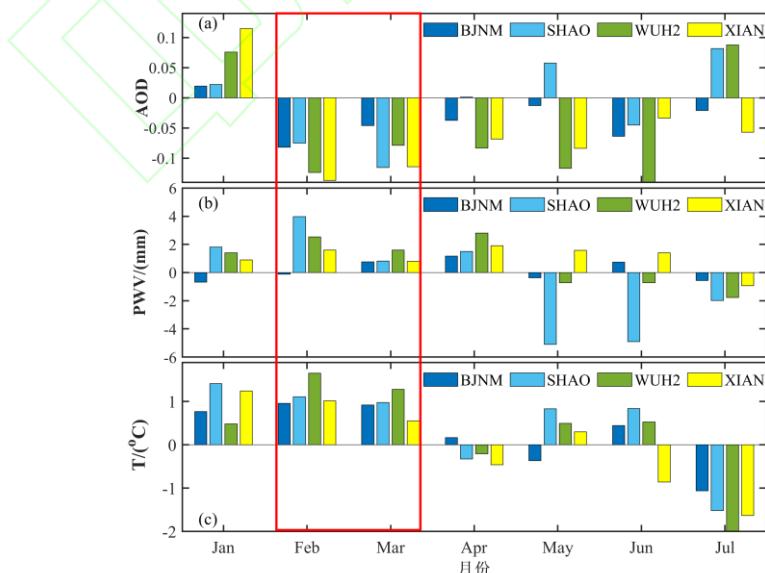


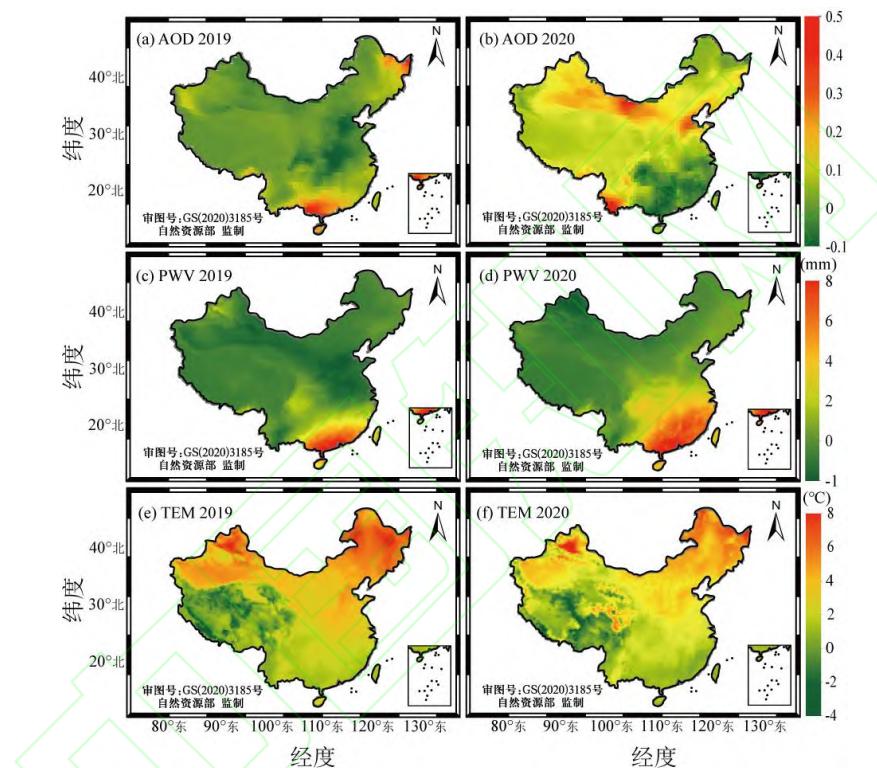
图 9 BJNM、SHAO、WUH2、XIAN 四个站点在 2020 年 1—7 月的变化趋势图

Fig.9 Change trend chart of BJNM, SHAO, WUH2 and XIAN stations from January to July 2020

## 2.4 COVID-19期间AOD、PWV和T的空间异常变化

为了分析COVID-19期间整个中国区域空气质量的空间异常变化，对2019—2020年2月和3月的AOD、PWV和T的月均值数据进行处理。图10分别给出了2019—2020年AOD、PWV和T的距平异常空间变化分布。由图可看出，相对于非疫情期间，疫情期间AOD在我国东南部明显降低，

PWV和T在东南部明显增长。统计发现，2019和2020年选取期间AOD、PWV和T的平均距平值分别为0.07/0.03, 1.01/1.93mm和3.20/3.68°C。由此可知，疫情期间，AOD在整个中国区域整体减小，PWV和T整体上升。上述结果进一步表明，COVID-19期间人类活动限制导致相关污染物排放降低，AOD整体减小，PWV和T上升。



注：本图基于审图号为GS(2020)3185号的标准地图制作，底图无修改

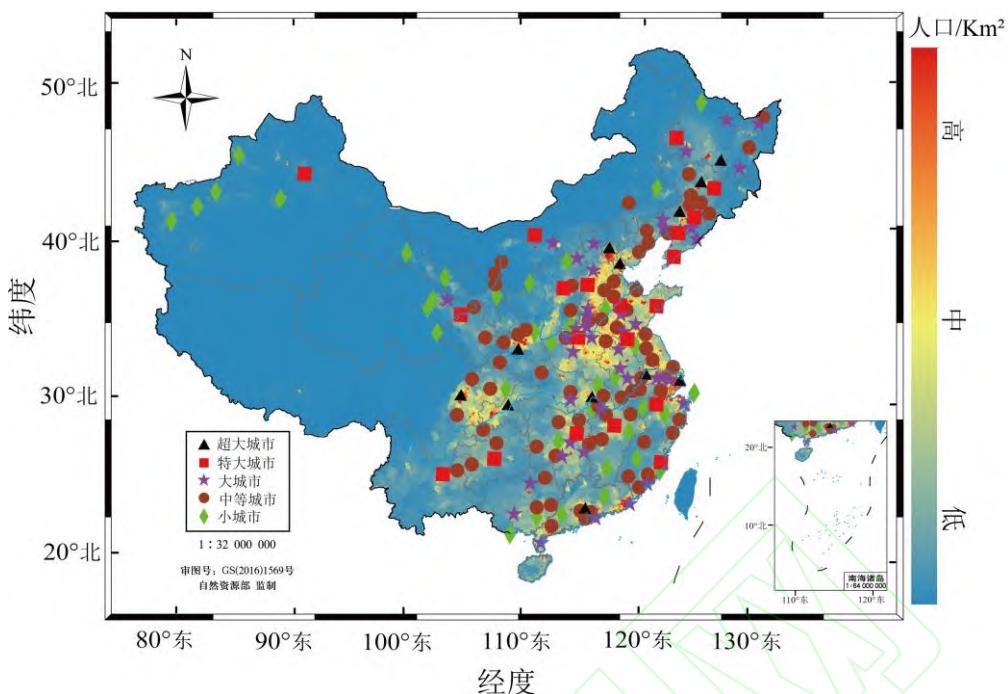
图10 2019—2020年AOD、PWV和T的距平异常空间变化分布，颜色代表数据的距平值。

Fig.10 Spatial variation distribution of AOD, PWV and T anomalies from 2019 to 2020. The color represents anomaly value of data.

## 2.5 不同人口等级城市AOD、PWV和T变化

依据中华人民共和国国务院2014年发布的关于城市规模划分标准的通知([http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content\\_9225.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm))，按照人口密度等级将城市划分为5类：超大城市、特大城市、大

城市、中等城市、小城市。依据中国统计年鉴中的常住人口，均匀挑选出12个超大城市、20个特大城市、42个大城市、74个中等城市、36个小城市共184个城市，分析疫情期间AOD、PWV和T的异常变化情况。图11给出了中国2020年人口密度分布及所挑选184个城市的地理位置。



注：本图基于审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作，底图无修改

图 11 人口密度图与城市规模划分图

Fig.11 Population density map and city scale map

选取 2020 年疫情封锁期间和 2010—2019 对应时段作为研究时段，计算 184 个站点上 AOD、PWV 和 T 的距平值，并得到不同人口等级城市的变化率(图 12)。由图可以看出，疫情封锁期间 AOD 在 5 类城市中均为负距平，PWV 和 T 为正距平；非封锁期间 5 类城市中 PWV 和 T 均为负距平，AOD 为正距平。随着城市等级的增加，AOD、

PWV 及 T 的变化率也在增加，其中在封锁期间与非封锁期间 AOD、PWV 和 T 均在超大城市、特大城市等人口密度大的城市变化较为明显，在小城市的变化相对较小。据统计在疫情封锁期间 AOD、PWV 及 T 的平均变化率分别为 -4.42%，7.82%，11.32%；在非封锁期间 AOD、PWV 和 T 的平均变化率分别为 0.44%，-0.78%，-2.34%。

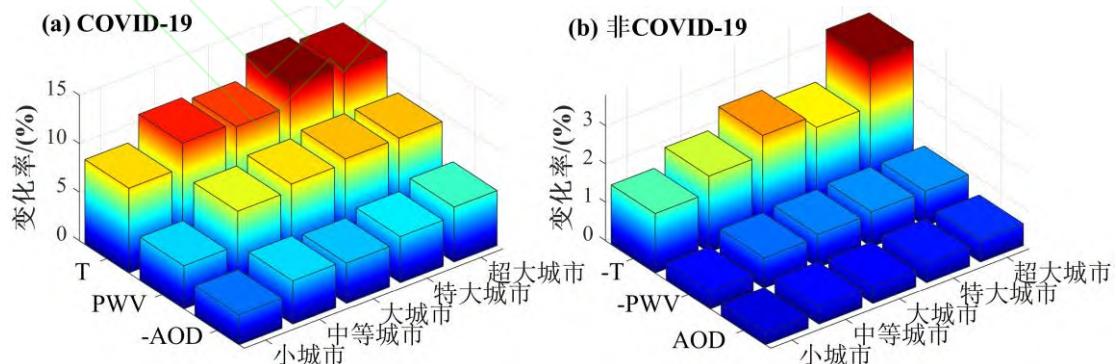


图 12 AOD、PWV 和温度在不同城市规模下的距平变化分析图

Fig.12 Analysis chart of AOD, PWV and temperature anomaly changes in different city sizes

### 3 讨论

#### 3.1 周末效应

由 3.2 可知，周末效应导致 AOD、PWV 和 T 在周内整体呈现增长趋势，周末呈减小趋势。该现象的主要原因可能是由于人类交

通活动的剧烈程度所导致<sup>[35]</sup>。周内人们上班，人口流动大，采用私家车出行的方式也相对较为广泛，而周末出行人数相对较少，人口流动频度也相对较低。因此，AOD、PWV 和 T 在周末呈现负距平趋势<sup>[36,37]</sup>。

本文进一步讨论不同季节周末效应对 AOD、PWV 和 T 的影响，发现不同季节的周末与非周末的整体变化趋势具有一致性，但不同季节的变化率不同(如表 2 所示)。周内期间的 AOD 在春冬季表现为明显的增长趋势，分别增加 1.28% 与 1.23%，这与当地的气候环境、供暖措施、人类活动均有关系，由于冬季会采取相应的供暖方案，春季扬沙和浮尘等问题较为严重，因此会导致当地污染程度有所增加<sup>[38,39]</sup>。周内期间的 PWV 和

T 在秋季变化最为明显，分别增加 0.87% 与 0.37%，但是随着近年来全球气候变暖的影响，温度整体升高，PWV 含量整体有所下降<sup>[40]</sup>。周末的 AOD 在春季、秋季和冬季均有所减少，其中在春冬季减少最多分别为 -0.51% 与 -0.5%，这可能与人类活动的减少有直接联系<sup>[41]</sup>。PWV 同样在春季、秋季及冬季期间有所减少，但是在秋季减少最多为 -0.34% 而温度在四个季节整体呈现为相对较少的减少趋势，在秋季减少最多为 -0.15%。由于秋季天气逐渐凉爽，气候由热转寒，因此人类的交通出行及室外聚集活动等更为频繁，进而导致秋季的周末效应最为明显。

表 2 不同季节的周末与周内期间 AOD、PWV 及 T 的变化率

Tab.2 The change rate of AOD, PWV and T during the weekend and weekday in different seasons

季节	周内			周末		
	AOD	PWV	TEM	AOD	PWV	TEM
春季	1.28	0.51	0.14	-0.51	-0.18	-0.06
夏季	-0.52	-0.07	0.03	0.21	0.03	-0.01
秋季	0.55	0.87	0.37	-0.22	-0.34	-0.15
冬季	1.23	0.39	0.09	-0.50	-0.12	-0.03

### 3.2 COVID-19期间AOD、PWV和T的变化

由 3.3 可知，COVID-19 期间 AOD 呈减小状态，PWV 和 T 呈增加状态。这主要是由于封锁期间工厂停工、人类活动大大减少，大气中相应的污染因素也有所减少<sup>[16]</sup>。PWV 和 T 在一定程度上受到大气污染物的影响，随着大气污染物的减少，PWV 和 T 有一定增长趋势<sup>[29]</sup>。但是在封锁期间 BI01(北京海淀)、BJFS(北京房山)、BJNM(北京昌平)、CHAN(吉林长春)、IMEJ(北京昌平)、KUNM(云南昆明)、SA34(北京海淀)这七个站点处的 AOD 处于增长趋势(图 7)，其中 5 个站点位于北京、1 个站点位于云南、1 个站点位于吉林，它们之间的一个共同特征就是在城市周围有山脉，因此出现这一现象可能原因是由于当地的环境、地形及山谷风等局地环流的影响导致<sup>[42,43]</sup>。由于 PWV

和温度受多种不确定因素的影响，因此在封锁期间部分站点出现减少的状态可能是由于多种因素共同作用的结果。

通过对 2019—2020 年 2—3 月 AOD、PWV 和 T 均值分析，发现疫情封锁期间 AOD 呈减少的状态，PWV 和 T 为增长的状态。其中 AOD 在中国东南部有明显的减少状态，PWV 和 T 在中国东南部有明显增长状态。为进一步探究 AOD、PWV 和 T 在东南部变化较大的原因，选取中国首次“封城”的武汉市进行分析。图 13 分别统计了 WUH2 站 2016—2020 年 AOD、PWV 和 T 的变化率和平均含量。由 13 (a)可知，2020 年的 AOD 相比于 2019 年有明显减少的趋势而 PWV 和 T 明显增加。由 13 (b)可知，2020 年 AOD 的平均含量明显低于 2016—2019 年的平均含量，而 PWV 和 T 的平均含量明显高于 2016—2019 年。表 3 给出了 2016—

2020年AOD、PWV和T变化量的统计结果，可以发现AOD在2020年减少量最大为-0.13，PWV和T在2020年的增加量最大分别为0.85mm与1.07℃。因此依据武汉站的变化统计可以进一步解释2020年AOD东南部出现明显减少的状态、PWV和T出现明

显增长的状态，这一现象的主要原因可能是由于在COVID-19封锁期间人类活动减少及其他污染源的减少共同作用导致。上述发现与Yang等人(2020)<sup>[12]</sup>和Ma等人(2020)<sup>[44]</sup>的研究结果具有一致性。

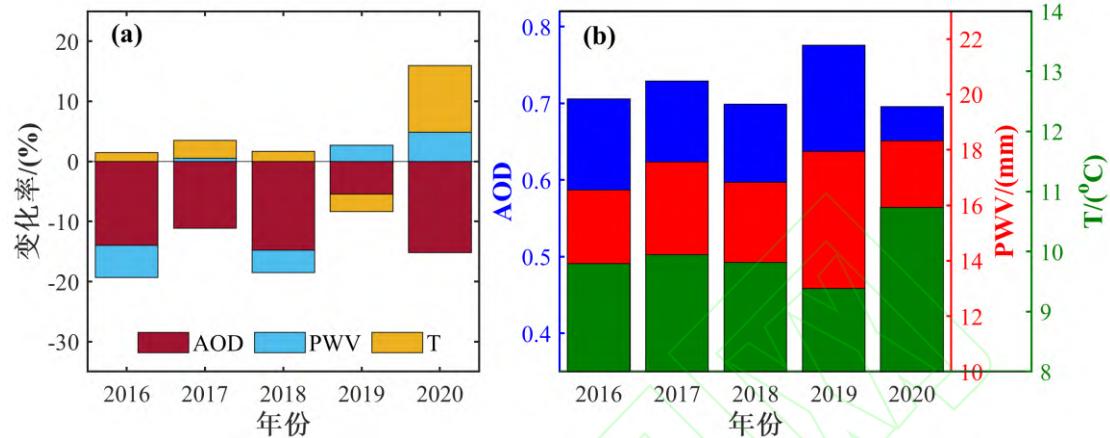


图 13 (a) AOD、PWV 和 T 在 2016—2020 年的变化率（利用距平值的平均值/整体平均值 × 100）(b) AOD、PWV 和 T 在 2016—2020 年的平均含量（每一年含量的平均值）

Fig.13 (a) The change rate of AOD, PWV and T in 2016-2020 (using the average value of anomaly / overall average × 100) (b) the average content of AOD, PWV and T in 2016-2020 (the average content of each year)

表 3 AOD、PWV 和 T 在 2016—2020 年的平均变化量

Tab.3 Average changes of AOD, PWV and T in 2016-2020

年份	AOD	PWV (mm)	T (°C)
2016	-0.11	-0.93	0.14
2017	-0.09	-0.08	0.29
2018	-0.12	-0.64	0.16
2019	-0.04	0.47	-0.28
2020	-0.13	0.85	1.07

注：统计结果为 2016—2020 年的平均增长量或减少量

通过3.2和3.3发现，周末效应和疫情封锁期间AOD、PWV和T的变化趋势具有一定差异性。疫情封锁期间AOD表现为负距平变化而PWV和T为正距平变化，在非封锁期间的变化趋势与疫情封锁期间完全相反，表明人类活动剧烈时AOD处于增长的状态而PWV和T为减少状态。但在周末效应分析中，发现人类活动剧烈的周内期间AOD、PWV和T均处于正距平状态，而在人类活动相对较少的周末AOD、PWV和T均为负距平的变化状态。这一现象与封锁期

间的AOD、PWV和T变化现象有一定差异性。由于周末与周内期间的正负距平变化趋势的计算是通过将2010—2020年所有数据按照周末与周内划分，分别计算各个站点与周末与周内期间整体的正负距平变化趋势。疫情封锁期间与非封锁期间的正负距平变化趋势的计算是通过将2020.1.23—2020.4.18作为疫情封锁期间，2010—2019年的同期时间作为非封锁期间，然后分别计算各个站点在封锁与非封锁期间的正负距平值。因此疫情封锁与非封锁期间和周末与

周内期间的距平计算过程中所选用的数据量及计算方法不同。此外，在周内与周末期间工厂、机动车辆等多种外界因素相差较小而在疫情期间这些外界因素均被限制。所以在疫情封锁期间 PWV 和 T 受到外界因素影响相对较少而呈现为增长状态，但是在周末期间受到工厂持续运转、机动车辆未被限制出行等多种外界因素的共同影响进而导致 PWV 和 T 呈现出减少状态。

### 3.3 人口密度对 AOD、PWV 和 T 的影响

由 3.5 可知，COVID-19 期间不同人口密度等级城市的 AOD、PWV 和 T 变化不同，封锁期间 AOD 在超大城市中减少最多，小城市中减少最小；PWV 和 T 在超大城市中增加最多，小城市中增加最少。Filonchyk 等人(2020)发现，疫情期间空气污染物、AOD 含量在城市封锁期间明显下降并指出这一现象与国家防控政策导致的人类活动的减少有很大关系<sup>[17]</sup>。Fan 等人(2020)发现人口密度的增加会导致空气污染增加<sup>[45]</sup>，进一步验证本文得出结论的正确性。此外，本文分析了不同人口密度等级城市的 PWV 在疫情与非疫情期间的变化状态，发现人口密度越大的城市在封锁期间 PWV 与温度的变化率越大，因此，人口密度对 PWV 和 T 具有一定的影响力，但 PWV 和 T 变化受多种

因素影响，尚无定量研究人口密度对 PWV 和 T 影响程度的相关结论。

为定量分析人口密度对 AOD、PWV 和 T 的影响，根据四大地理分区将整个中国区域分为西北地区、青藏地区、北方地区和南方地区四部分。图 14 给出了各个区域在 COVID-19 期间 AOD、PWV 和 T 的变化率，从图中可以明显的看出疫情封锁期间各个地区的 AOD 均处于减少的状态。其中北方地区与南方地区减少相对较多，分别为 -7.76% 与 -6.64%；非封锁期间北方地区与南方地区增加的相对较多，分别为 0.78% 与 0.66%，进一步验证了人口密度大的城市，污染程度也相对严重。封锁期间 PWV 和 T 在青藏地区与南方地区增加相对较多，其中 PWV 在两个地区分别增加了 10.33% 与 6.77%，温度在两个地区分别增加了 25.99% 与 14.89%。非封锁期间 PWV 在青藏地区与南方地区减少最多，分别为 -1.03% 与 -0.68%；温度在青藏地区与西北地区减少最多，分别为 -4.81% 与 -1.96%。这可能与当地的地理位置及气候条件有一定关系。南方地区常年降雨量相对较大，因此，PWV 含量也相对较大，变化相对较大；青藏地区属于高原和高山气候带，冬寒夏凉，日温差变化大，因此温度的变化趋势相对较大。

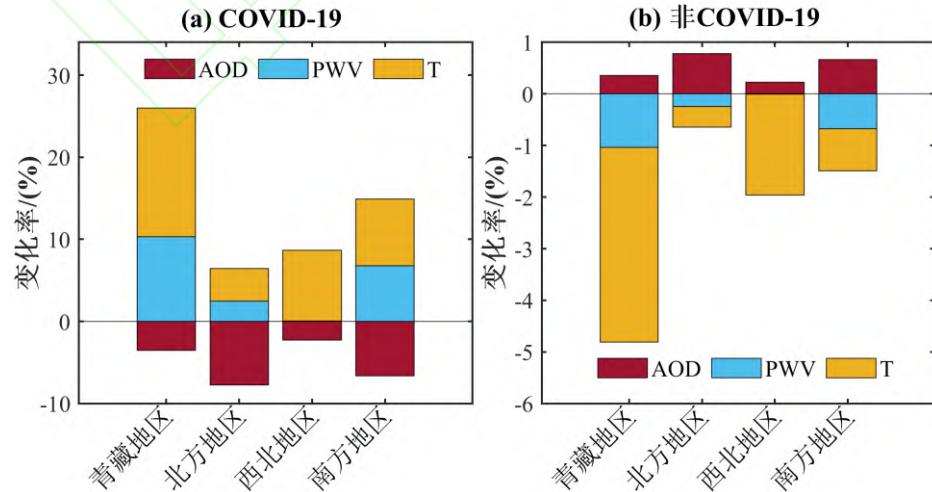


图 14 不同地理分区的 AOD、PWV 和 T 在疫情封锁与非封锁期间的变化率

Fig.14 The change rates of AOD, PWV and T in different geographical regions during blockade and non blockade periods

## 4 结论

本文选取AOD、PWV和T为例，分析COVID-19期间人类活动对空气质量的影响。首先，对选取数据的精度进行验证，证明利用的AOD、PWV和T精度能够满足分析的要求；其次，探讨周末效应对AOD、PWV和T的影响，证明人类活动对大气空气质量有一定影响；然后，研究COVID-19期间62个GNSS站点的AOD、PWV和T的异常变化，并选择BJNM、SHAO、WUH2、XIAN四个站点进行具体分析；最后，按照人口密度等级均匀选取中国148个城市，分析COVID-19期间由于人类活动减少对大气空气质量造成的影响。

实验分析表明，(1) 选取的62个GNSS站点中，AOD、PWV和T在周末与周内及不同季节的变化不同，周内期间分别有63%、77%和81%的站点的AOD、PWV和T为正距平，而周末的变化状态完全相反；(2) COVID-19封锁期间，选取站点中，82%的站点上的AOD呈整体减小状态，82%和95%的站点上PWV和T呈增加状态；(3) 对不同人口密度等级城市的大气空气质量分析，发现AOD在大城市减小最多，可达-5.67%，而PWV和T增加最大，分别为9.08%和12.59%，进一步证明人类活动剧烈程度会对大气空气质量造成一定影响。本文主要针对COVID-19封锁期间AOD、PWV和T的变化进行分析，探究人口密度及活动程度对大气空气质量的影响，并对上述现象的可能原因进行分析。但空气质量受多种因素的影响，本文并为对影响空气质量的其他因素进行深入研究，这将是我们下一步的研究重点。

**致谢：**感谢NASA提供的MERRA-2再分析气溶胶产品资料与AERONET地面实测AOD数据。感谢ECMWF、IGRA提供的气象参数及NGL提供的ZTD数据。同时感谢

WorldPop提供的中国区域的人口密度数据。本研究由国家自然科学基金项目(41904036)项目支持。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang K, de Leeuw G, Yang Z, et al. The Impacts of the COVID-19 Lockdown on Air Quality in the Guanzhong Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3042.
- [2] Yue Xu, Lei Yadong., Zhou Hao, Changes of Anthropogenic Carbon Emissions and Air Pollutants During the COVID-19 Epidemic in China[J].*Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020,43(2):265-274. (乐旭,雷亚栋,周浩等.新冠肺炎疫情期间中国人为碳排放和大气污染物的变化[J].*大气科学学报*, 2020, 43 (2): 265-274 .)
- [3] Guo J P, Xia F, Zhang Y, et al. Impact of Diurnal Variability and Meteorological Factors on the PM2.5-AOD Relationship: Implications for PM2.5 Remote sensing[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 94-104.
- [4] Zheng Y, Che H Z, Xia X G, et al. Five-year Observation of Aerosol Optical Properties and its Radiative Effects to Planetary Boundary Layer During Air Pollution Episodes in North China: Intercomparison of a Plain Site and a Mountainous Site in Beijing[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 674: 140-158.
- [5] Sarangi C, Tripathi S N, Kanawade V P, et al. Investigation of the Aerosol-Cloud-Rainfall Association Over the Indian Summer Monsoon Region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(8): 5185-5204.
- [6] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. Aerosol and Boundary-layer Interactions and Impact on Air Quality[J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 810-833.
- [7] Von Schneidemesser E, Monks P S, Allan J D, et al. Chemistry and the Linkages Between Air Quality and Climate Change[J]. *Chemical reviews*, 2015, 115(10): 3856-3897.
- [8] Kong L, Tang X, Zhu J, et al. A 6-Year-Long

- (2013–2018) High-resolution Air Quality Reanalysis Dataset in China Based on the Assimilation of Surface Observations from CNEMC[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(2): 529-570.
- [9] Che H., Gui K., Xia X., et al. Large Contribution of Meteorological Factors to Inter-decadal Changes in Regional Aerosol Optical Depth[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(16): 10497-10523.
- [10] 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: Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [11] Xu J, Ge X, Zhang X, et al. COVID-19 Impact on the Concentration and Composition of Submicron Particulate Matter in a Typical City of Northwest China[J]. *Geophysical research letters*, 2020, 47(19): e2020GL089035.
- [12] Yang Y, Ren L, Li H, et al. Fast Climate Responses to Aerosol Emission Reductions During the COVID-19 Pandemic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19): e2020GL089788.
- [13] Yang Y, Smith S J, Wang H, et al. Variability, Timescales, and Nonlinearity in Climate Responses to Black Carbon Emissions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(4): 2405-2420.
- [14] Le T, Wang Y, Liu L, et al. Unexpected Air Pollution With Marked Emission Reductions During the COVID-19 Outbreak in China[J]. *Science*, 2020, 369(6504): 702-706.
- [15] Huang X, Ding A, Gao J, et al. Enhanced Secondary Pollution Offset Reduction of Primary Emissions During COVID-19 Lockdown in China[J]. *National Science Review*, 2020, 8(2): nwaa137.
- [16] Nichol J E, Bilal M, Ali M, et al. Air Pollution Scenario Over China During COVID-19[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(13): 2100.
- [17] Filonchyk M, Hurynovich V, Yan H, et al. Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO and AOD over East China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, 20(7): 1530-1540.
- [18] Ding J S, Chen J P. Assessment of Empirical Troposphere Model GPT3 Based on NGL's Global Troposphere Products[J]. *Sensors*, 2020, 20(13): 3631.
- [19] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites[J]. *The use of artificial satellites for geodesy*, 1972, 15: 247-251.
- [20] Huang L, Liu L, Chen H, et al. An Improved Atmospheric Weighted Mean Temperature Model and its Impact on GNSS Precipitable Water Vapor Estimates for China[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 51.
- [21] Yang Pengfei, Zhao Qingzhi, Su Jing, et al. Analysis of Influencing Factors and Accuracy Evaluation of PWV in Loess Plateau [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200390(杨鹏飞,赵庆志,苏静,等. 黄土高原地区PWV影响因素分析及精度评定[J].武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200390)
- [22] Pang Shuting, Lin Yingjing, Tang Chenguang, et al. Spatial Distribution and Trend of Global and Dust AOD Based on MERRA2 Reanalysis Data[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(1):54-62. (庞舒婷, 林莹晶, 汤晨光等. 基于MERRA2再分析资料的全球AOD和沙尘AOD空间分布及趋势[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 54-62.)
- [23] Sun E, Xu X, Che H, et al. Variation in MERRA-2 Aerosol Optical Depth and Absorption Aerosol Optical Depth over China from 1980 to 2017[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, 186: 8-19.
- [24] Green M, Kondragunta S, Ciren P, et al. Comparison of GOES and MODIS Aerosol Optical Depth (AOD) to Aerosol Robotic

- Network (AERONET) AOD and IMPROVE PM2.5 Mass at Bondville, Illinois[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(9): 1082-1091.
- [25] Ukhov A, Mostamandi S, da Silva A, et al. Assessment of Natural and Anthropogenic Aerosol Pollution in the Middle East Using MERRA-2, CAMS Data Assimilation Products, and High-Resolution WRF-Chem model Simulations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(15): 9281-9310.
- [26] Zhang Q, Ye J, Zhang S, et al. Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-based GNSS, Radio Occultation, Radiosonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data[J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018.
- [27] Tatem A J. WorldPop, Open Data for Spatial Demography[J]. *Scientific data*, 2017, 4(1): 1-4.
- [28] Jiang C, Xu T, Wang S, et al. Evaluation of Zenith Tropospheric Delay Derived from ERA5 Data over China Using GNSS Observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 663.
- [29] Aliyu Y A, Botai J O. Appraising the Effects of Atmospheric Aerosols and Ground Particulates Concentrations on GPS-derived PWV Estimates[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 193: 24-32.
- [30] Klos A, Hunegnaw A, Teferle F N, et al. Statistical Significance of Trends in Zenith Wet Delay from re-processed GPS solutions[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 51.
- [31] Zhao Q, Ma X, Yao W, et al. A Drought Monitoring Method Based on Precipitable Water Vapor and Precipitation[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(24): 10727-10741.
- [32] Nikolaidis R. Observation of Geodetic and Seismic Deformation With the Global Positioning System[M]. University of California, San Diego, 2002.
- [33] Wu Shuguang. Characteristics of Coordinate Time Series from Regional CORS Stations (in Chinese). Master Dissertation. *Hu Bei: Wuhan University*, 2017 (武曙光. 区域 CORS 站坐标时间序列特征分析. 硕士学位论文. 湖北: 武汉大学, 2017).
- [34] Wu Yingjie, Li Wei, Wang Wenjun, et al. Drought Characteristics in Inner Mongolia Based on Precipitation Anomaly Percentage[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 943-952. (吴英杰, 李玮, 王文君等. 基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 943-952.)
- [35] Xia XG, Eck T F, Holben B N, et al. Analysis of the Weekly Cycle of Aerosol Optical Depth Using AERONET and MODIS Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D14).
- [36] Lu X. Effectiveness of Government Enforcement in Driving restrictions: A Case in Beijing, China[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2016, 18(1): 63-92.
- [37] Chen J, Wang B, Huang S, et al. The Influence of Increased Population Density in China on Air Pollution[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 735: 139456.
- [38] Xiao Q, Ma Z, Li S, et al. The Impact of Winter Heating on Air Pollution in China[J]. *PloS one*, 2015, 10(1): e0117311.
- [39] Chen X, Lv Y, Zhang W, et al. Comparison Between Dust and Haze Aerosol Properties of the 2015 Spring in Beijing Using ground-based Sun Photometer and Lidar[C]//AOPC 2015: Optical and Optoelectronic Sensing and Imaging Technology. *International Society for Optics and Photonics*, 2015, 9674: 96740O.
- [40] Mishra A K. Quantifying the Impact of Global Warming on Precipitation Patterns in India[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 26(1): 153-160.
- [41] Xu J, Li C, Shi H, et al. Analysis on the Impact of Aerosol Optical Depth on Surface Solar Radiation in the Shanghai Megacity, China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*,

2011, 11(1).11

- [42] Miao Y, Liu S, Zheng Y, et al. Modeling the Feedback Between Aerosol and Boundary Layer Processes: A Case Study in Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4): 3342-3357.
- [43] Miao Y, Guo J, Liu S, et al. Classification of Summertime Synoptic Patterns in Beijing and their Associations with Boundary Layer Structure Affecting Aerosol Pollution[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 3097-3110.
- [44] Ma Y, Zhao Y, Liu J, et al. Effects of Temperature Variation and Humidity on the Death of COVID-19 in Wuhan, China[J]. *Science of the total environment*, 2020, 724: 138226.
- [45] Fan C, Li Y, Guang J, et al. The Impact of the Control Measures During the COVID-19 Outbreak on Air Pollution in China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1613.

## Spatial and temporal characteristics of AOD and meteorological factors in China during the period of COVID-19

ZHAO Qingzhi<sup>1</sup> YANG Pengfei<sup>1</sup> LI Zufeng<sup>2</sup> YAO Wanqiang<sup>1</sup> YAO Yibin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

<sup>2</sup> Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China

<sup>3</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Objectives: In order to explore the impact of the decrease of human activities on the air quality in China during the period of the Corona Virus Disease 2019 (COVID-19), the temporal and spatial abnormal changes of Aerosol Optical Depth (AOD), Precipitable Water Vapor (PWV) and Temperature (T) were analyzed, and the impact of human activities on the air quality was revealed. Methods: Firstly, the accuracy of AOD, PWV and T is verified by comparing with AOD provided by AERONET and PWV and T provided by radiosonde. Then, we analyze the long-term trends of AOD, PWV and T during the weekend and the week, and find that human activities have a certain impact on the air quality. Secondly, the temporal and spatial changes of AOD, PWV and T during the period of COVID-19 were studied, which confirmed that there was a good correlation between human activities and air quality. Finally, 184 cities of different grades in China are selected for further analysis to determine the impact of population density on AOD, PWV and T, and further reveal the specific response relationship between human activities and air quality. Results: Through the verification of the accuracy of the data used in this paper, it is found that the data selected in this paper have high accuracy, which can be used in this experimental study. By analyzing the COVID-19 PWV, AOD and T changes, we found that PWV, AOD and T were all affected by the epidemic. Conclusions: Due to the influence of COVID-19, AOD, PWV and T show different trends. At the same time, it is found that the main reason for this phenomenon is the influence of the intensity of human activities.

**Keywords:** Corona Virus Disease 2019; Precipitable Water Vapor; Aerosol Optical Depth; Air quality

**First Author:** ZHAO Qingzhi, Ph D, associate professor, Research on GNSS space environment change. E-mail: zhaoqingzhia@163.com

**\*Corresponding author:** ZHAO Qingzhi, Ph D, associate professor. E-mail: zhaoqingzhia@163.com

**Foundation Support:** This paper is supported by National Natural Science Foundation of China (41904036).