

温州市空气质量变化趋势研究

钱仁川^{1,2}, 白洪扬^{1,2*}, 吴倩文³, 柯毓泰³

¹温州市数据管理发展集团有限公司, 浙江 温州

²温州市数据管理发展集团有限公司, 博士创新站, 浙江 温州

³温州大学建筑工程学院, 浙江 温州

收稿日期: 2023年3月11日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年4月20日

摘要

空气污染与人类活动、城市扩张等因素密切相关。本研究中利用中国区域1 km分辨率PM_{2.5}数据, 分析浙江省与温州市2000~2020年PM_{2.5}浓度空间分布特征、年均值分布特征; 应用Mann-Kendall检验法分析PM_{2.5}浓度年均值变化趋势。结果表明, 浙江省与温州市2000~2020年PM_{2.5}浓度均呈现先升高再降低的趋势, 且PM_{2.5}浓度年均值的降低和“十二五”国家规划高度相关; 浙江省与温州市趋势突变点都出现在2017年, 温州市PM_{2.5}浓度年均值的变化趋势显著大于浙江省。该研究有助于了解和掌握我国大气环境质量的演化发展情况, 为区域的空气污染防治、城市发展规划提供参考借鉴。

关键词

温州市, 空气污染, PM_{2.5}, 时空变化, Mann-Kendall检验

Study on the Trend of Air Quality Changes in Wenzhou

Renchuan Qian^{1,2}, Hongyang Bai^{1,2*}, Qianwen Wu³, Yutai Ke³

¹Wenzhou Data Management Development Group Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

²Doctor Innovation Station, Wenzhou Data Management Development Group Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

³College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: Mar. 11th, 2023; accepted: Apr. 13th, 2023; published: Apr. 20th, 2023

Abstract

Air pollution is closely related to human activities, urban expansion and other factors. In this

*通讯作者。

study, the spatial distribution characteristics and annual average distribution characteristics of $PM_{2.5}$ concentration in Zhejiang Province and Wenzhou City from 2000 to 2020 were analyzed using the 1 km resolution $PM_{2.5}$ data in China; Mann-Kendall test was used to analyze the annual average change trend of $PM_{2.5}$ concentration. The results showed that the $PM_{2.5}$ concentration in Zhejiang Province and Wenzhou City increased first and then decreased from 2000 to 2020, and the reduction of the annual mean $PM_{2.5}$ concentration was highly related to the “Twelfth Five Year Plan”. The trend mutation points of Zhejiang Province and Wenzhou City both appeared in 2017, and the change trend of annual average $PM_{2.5}$ concentration in Wenzhou City was significantly greater than that in Zhejiang Province. This study is helpful to understand and master the evolution and development of atmospheric environment quality in China, and provide reference for regional air pollution prevention and urban development planning.

Keywords

Wenzhou City, Air Pollution, $PM_{2.5}$, Temporal and Spatial Changes, Mann-Kendall Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近几十年来,我国工业化和城市化进程加快,特别是某些粗放型、污染型工业的发展,同时也带来了大范围的城市空间扩张,机动车拥有量迅速增加,能源和资源消耗迅速增加,城市植被覆盖率迅速降低,从而造成了一系列的环境问题,其中就包括大气污染。我国是世界上最大的发展中国家,大气污染问题日益突出[1]。

回顾我国大气、雾霾污染的发展历程,尤其是对我国主要发展地区的污染演化特点进行分析可发现大气污染物的不断增长是造成大气颗粒物特别是 $PM_{2.5}$ 的主要因素之一。 $PM_{2.5}$ 是一种对呼吸系统和心脑血管系统有害的污染物,当浓度达到一定程度后,会增加人的患病几率。而 $PM_{2.5}$ 的高浓度会导致能见度的下降,从而对城市的可持续发展产生一定的负面作用。近几年,我国多地发生了严重的大气污染事故,从 2012 年起,在全国 338 个地级及以上城市相继建立了 $PM_{2.5}$ 的地面监测网络,并对其进行了监测。分析显示,我国大部分城市的 $PM_{2.5}$ 浓度经常超过正常值,而且 $PM_{2.5}$ 的污染都比较严重,并且以经济发达地区为主[2]。

根据美国国家航空航天局的大气微粒反演资料,中国 2001~2006 年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与世界卫生组织(World Trade Organization, WHO)建议的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度标准相差 8 倍。基于 2010 年中国疾病负担危险因子排名,中国的室内空气颗粒物污染是第四大健康危险源[3]。为提高全球的空气质量,世界上许多国家和地区都已建立了较为完备的大气环境监控体系[4]。比如,美国早在 1997 年就制定了 $PM_{2.5}$ 监控标准。到 2010 年末,欧美等发达国家已经把 $PM_{2.5}$ 列入大气污染指标,并对其实施了严格的控制。尤其是在某些主要城市,当地政府对 $PM_{2.5}$ 进行监测后,并将其发布到了社会上,让公众监督了解[4]。

目前已有学者对浙江省 2012 年至 2015 年的空气重污染过程统计特征及其预测方法开展了相关研究,但未对温州市空气质量做出针对性的评价[5];同时针对某一研究区内空气质量变化趋势的分析方法大多为线性回归法、Spearman 秩相关系数法[6]。研究中将 Mann-Kendall (MK)检验法应用于 $PM_{2.5}$ 浓度年平均

值变化趋势的分析, 基于该方法的分析结果能更准确地反映研究区变化趋势, 能判断出变化趋势的突变点。基于此, 本文通过对浙江省与温州市 2000~2020 年的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征、年平均值变化趋势以及年均值分布进行分析, 并考虑相关政策的实施对浙江省与温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年均值量变化趋势的影响, 以此了解浙江省与温州市在过去的 21 年内空气质量随时间的变化。

2. 数据及处理方法

2.1. 数据介绍

美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在 1999 年将地球观测系统(Earth Observing System, EOS)泰拉(Terra) AM 卫星送入地球轨道, 并于 2002 年将另外一颗地球观测系统水(Aqua) PM 卫星送入太空。这两颗卫星都装备有中分辨率成像光谱(MODIS), 用以研究全球气候和人为活动的影响。该传感器具有 36 个波段, 涵盖可见到红外的范围。每隔 1 至 2 天, 就可获得一次地表观测资料, 目的是为了广泛的采集全球陆、海及大气的资料, 例如云覆盖的变化、地球能量辐射的变化, 以及海洋和陆地表面的基础物理参量等。MODIS 可提供可见光 - 近红外波段的气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)数据, 对应的气溶胶颗粒尺寸在 $0.1\sim 2\ \mu\text{m}$ 之间, 与 $PM_{2.5}$ 的粒度分布基本一致, 且两者之间存在较好的统计关系[7]。

在 MODIS AOD 的基础上, Alexei Lyapustin 等进一步提出了大气校正的多角度实现(Multiangle implementation of atmospheric correction, MAIAC)算法。利用时序分析技术对大气中的气溶胶特征和双向反射系数进行反演, 使 AOD 成像的分辨率提高到 1 公里[8] [9], 为建立高分辨率的 $PM_{2.5}$ 浓度预报模式奠定了基础[10]。然而, 由于卫星资料的不确定性, 导致 $PM_{2.5}$ 浓度预报的精度下降[11] [12], 故采用内插方法对其进行了平滑[13]。但是, 平滑处理会人为地减少 $PM_{2.5}$ 的空间变异。Xiao 等提出了多插补卫星 AOD 数据的多插补(MI)方法, 通过分析大气气溶胶的光学厚度与云量、气象学条件之间的关系以及它们本身的空间和空间分布的连续性, 建立了一种基于 AOD 的线性回归模型[14]。该方法在高精度卫星 $PM_{2.5}$ 模型的建立中得到了很好的应用[14] [15]。

China High $PM_{2.5}$ 是覆盖中国地区的长期、全覆盖、高分辨率、高质量的大气污染物数据之一。该系统采用了 MODIS/Terra + Aqua MAIAC AOD 产品, 并结合其它辅助资料, 如地基测量, 卫星遥感, 大气再分析和模式仿真等, 利用机器学习算法生成连续全覆盖的 $PM_{2.5}$ 数据。

2.2. 数据来源

$PM_{2.5}$ 数据来源为中国北京师范大学博士生韦晶发布中国高分辨率高质量空气污染数据集, 选用中国东部地区 2000~2020 年的 MODIS $PM_{2.5}$ 产品, 空间分辨率为 1 km, $PM_{2.5}$ 浓度数据年估算与地面实测结果具有较高的相关性($R^2 = 0.94$), 均方根误差(RMSE)为 $5.07\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均绝对误差(MAE)为 $6.71\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均值误差(MRE)为 21.37%。

辅助数据包括: 基础 GIS 资料、工业产值情况和人口分布资料。基础 GIS 资料采用中国高清地图; 工业产值数据来源为浙江省以及浙江省内各市的统计局; 人口分布情况数据采用第五、六、七次人口普查数据, 数据来源为国家统计局。

2.3. 数据处理方法

$PM_{2.5}$ 原始数据为 NetCDF 格式, 须首先将其转为 ArcGIS 的栅格数据格式, 以便后续处理分析。NetCDF 格式是遥感领域中常见的一种图像格式, 其文件主要由定义维数(dimensions)、定义变量(variables)、变量(attributes)、数据(data)四部分组成, 文件中的数据以数组形式存储。本文使用的 $PM_{2.5}$

的数据为二维数组。TIFF 格式文件是标签图像文件格式,其文件主要由文件头(IFH)、文件目录(IFD)、目录项(TAG)、图像数据四部分组成,文件中的数据以字节形式存储。NetCDF 格式转 TIFF 格式在 ArcGIS 有直接转换的工具,可以使用模拟器对文件进行批量转换格式。利用重投影工具对 TIFF 格式文件进行投影。将转换后的栅格数据利用掩膜操作分别提取浙江省与温州市(下称研究区)2000~2020 年逐年的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布数据,再采用 ArcGIS 中的栅格计算器分别计算研究区逐年的 $PM_{2.5}$ 统计值(包括专题图的绘制)。

此外,为能够更直观地看出研究区 21 年间 $PM_{2.5}$ 浓度年均值的变化趋势,使用 Mann-Kendall (MK) 检验分析研究区的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值,并绘制了研究区 $PM_{2.5}$ 的变化趋势图。MK 检验可以综合已知全部数据来判断突变年限、检验时间序列的变化趋势,此方法的功能强大,不需要样本遵循一定的分布,即使部分数据缺失也不会影响最终的结果,不受少数异常数值的干扰,在实际使用中的适用性较强[16]。

对于一个时间序列 $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, MK 趋势检验的统计量 S 计算公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(X_k - X_i) \quad (1)$$

由式(1)易知,统计量 S_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值的个数的累计数,且 $S_1 = 0$ 。如果 S_k 是一个正数,那么后一部分的观测值相比之前的观测值会趋向于变大;如果 S_k 是一个负数,那么后一部分的观测值相比之前的观测值会趋向于变小。

其中, sgn 为检验函数:

确定所有 $\frac{n(n-1)}{2}$ 个 $X_k - X_i$ 的差值函数 $\text{sgn}(\theta)$ ($n > k > i \geq 1$)

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, \theta > 0 \\ 0, \theta = 0 \\ -1, \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

然后计算 S_k 的方差 Var 并定义统计量 UF , UF 可由式(3)计算得出:

$$UF_k = \begin{cases} \frac{S_k - 1}{\sqrt{\text{Var}}}, S_k > 0 \\ 0, S_k = 0 \\ \frac{S_k + 1}{\sqrt{\text{Var}}}, S_k < 0 \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 $UF_1 = 0$, UF 含义为时间序列 X_t 的顺行变化趋势,且服从标准正态分布,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,则置信区间 $U_\alpha = \pm 1.96$ 。如果 $|UF_k| > |U_\alpha|$,则否定无趋势的零假设,表明序列存在明显的趋势变化。将序列 X_t 反转并再次使用以上方法,则可以得出另一统计量 UB , UB 含义为时间序列 X_t 的逆行变化趋势, UF 与 UB 的交点即为时间序列 X_t 的趋势突变点。

3. 研究区介绍

3.1. 浙江省

浙江省地处中国东南沿海、长江三角洲南翼,属季风性湿润气候,自然条件较优越。地跨北纬 $27^{\circ}02' \sim 31^{\circ}11'$,东经 $118^{\circ}01' \sim 123^{\circ}10'$ 。东临东海,南接福建,西与江西、安徽相连,北与上海、江苏接壤。浙江东西和南北的直线距离均为 450 公里左右,陆域面积 10.55 万平方公里,是中国面积较小的省份之一。其地理位置、工业产值情况、人口分布情况如图 1 所示。

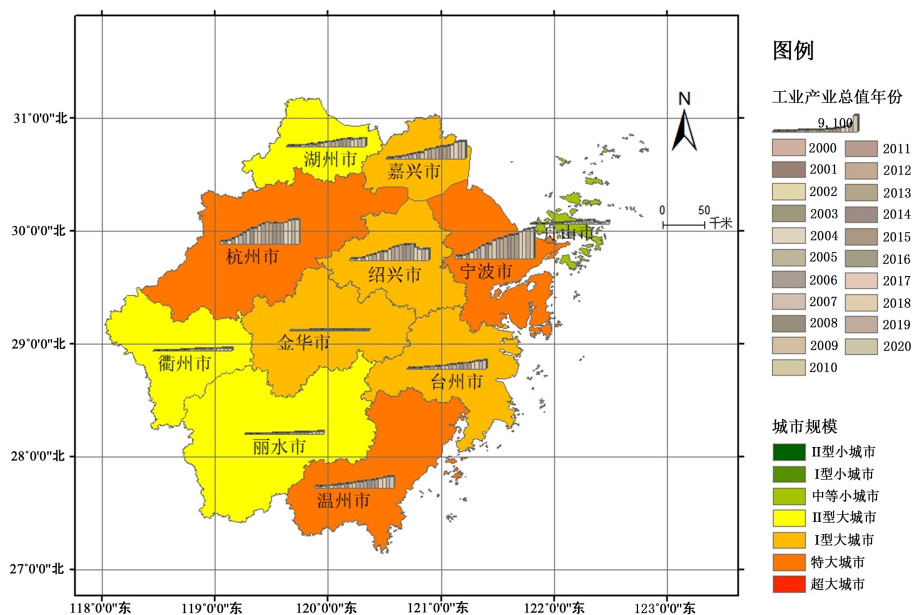


Figure.1. Overview of geographical location, industrial output value and population distribution of Zhejiang Province
图 1. 浙江省地理位置、工业产值、人口分布概况

3.2. 温州市

温州市位于浙江省东南部，东濒东海，南与福建省宁德地区的福鼎、柘荣、寿宁三县毗邻，西和丽水地区的缙云、青田、景宁畲族自治县相接，北和东北与台州地区的仙居、黄岩、温岭、玉环四县为界。全境介于北纬 27°03'~28°36'，东经 119°37'~121°18'之间，属中亚热带季风气候区，冬夏季风交替显著，温度适中，四季分明，雨量充沛。其地理位置、工业产值情况、人口分布情况如图 2 所示。

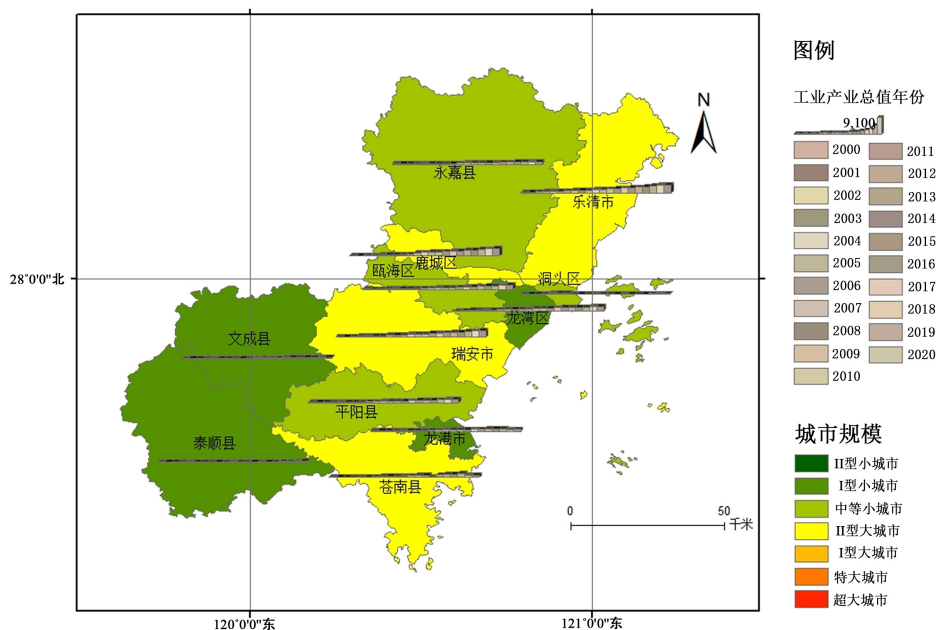


Figure.2. Overview of geographical location, industrial output value and population distribution of Wenzhou
图 2. 温州市地理位置、工业产值、人口分布概况

4. 研究区 PM_{2.5} 时空分布特征

4.1. 研究区 PM_{2.5} 浓度空间分布特征

利用 2000~2020 年浙江省逐年的 PM_{2.5} 浓度数据得到该地区 21 年的 PM_{2.5} 浓度累计平均值分级分布图, 如图 3 所示。结果显示, 浙江省 21 年的 PM_{2.5} 浓度位于优(24 小时 PM_{2.5} 平均浓度为 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3\sim 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和轻度污染(24 小时 PM_{2.5} 平均浓度为 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3\sim 115 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 之间, PM_{2.5} 浓度总平均为良。高值区主要分布在湖州市北部以及嘉兴市东部。浙江省南部地区(包括丽水市、温州市西部及北部、台州市西部及北部、金华市东部及西南部) PM_{2.5} 平均浓度较低。PM_{2.5} 浓度最大值出现在嘉兴市海盐县东部, PM_{2.5} 浓度平均值为 115.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

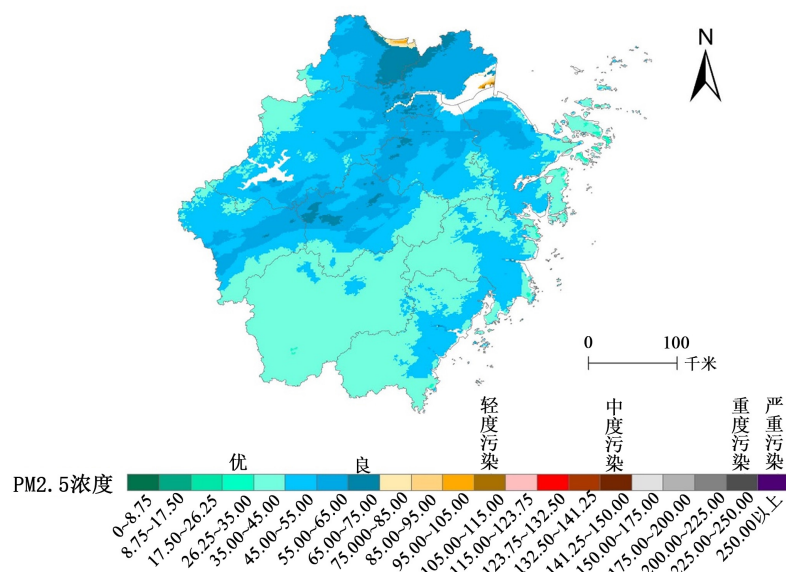


Figure 3. Grading distribution of cumulative mean PM_{2.5} concentration in Zhejiang Province in 21 years

图 3. 浙江省 21 年的 PM_{2.5} 浓度累计平均值分级分布

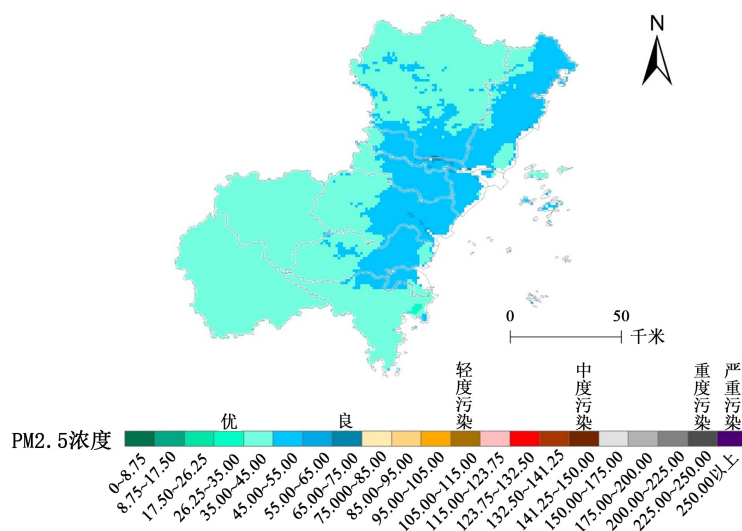


Figure 4. Grading distribution of cumulative mean PM_{2.5} concentration in Wenzhou in 21 years

图 4. 温州市 21 年的 PM_{2.5} 浓度累计平均值分级分布

利用2000~2020年温州市逐年的PM_{2.5}浓度数据得到该地区21年的PM_{2.5}浓度累计平均值分级分布图,如图4所示。结果显示,温州市21年的PM_{2.5}浓度位于优(24小时PM_{2.5}平均浓度为0 μg/m³~35 μg/m³)和良(24小时PM_{2.5}平均浓度为35 μg/m³~75 μg/m³)之间,PM_{2.5}浓度总平均为良。高值区主要分布在温州市东部及东北部地区(包括乐清市、鹿城区、瓯海区、瑞安市与平阳县的东部),市内其他地区PM_{2.5}平均浓度较低。PM_{2.5}浓度最大值出现在瑞安市东部,PM_{2.5}浓度平均值为71.53 μg/m³。

4.2. 研究区 PM_{2.5} 浓度年均值分布

由图5可知浙江省2000~2020年的PM_{2.5}浓度年均值分布。2000年,PM_{2.5}浓度高值区主要为浙江省北部以及东南部。2001年PM_{2.5}浓度高值区向南部扩散。2002年浙江省西南部PM_{2.5}浓度对比上一年有所减少。2003~2012年,浙江省内PM_{2.5}浓度总体上升,嘉兴市、湖州市的大部分地区PM_{2.5}浓度长期位于良与轻度污染之间,其中湖州市北部、嘉兴市东部的PM_{2.5}浓度位于中度污染。2013年,浙江省南部地区的PM_{2.5}浓度相较于2012年有所降低,但嘉兴市、湖州市的大部分地区PM_{2.5}浓度依旧位于轻度污染。2014~2020年,浙江省内PM_{2.5}浓度逐年下降,2020年浙江省的大部分地区PM_{2.5}浓度位于优。

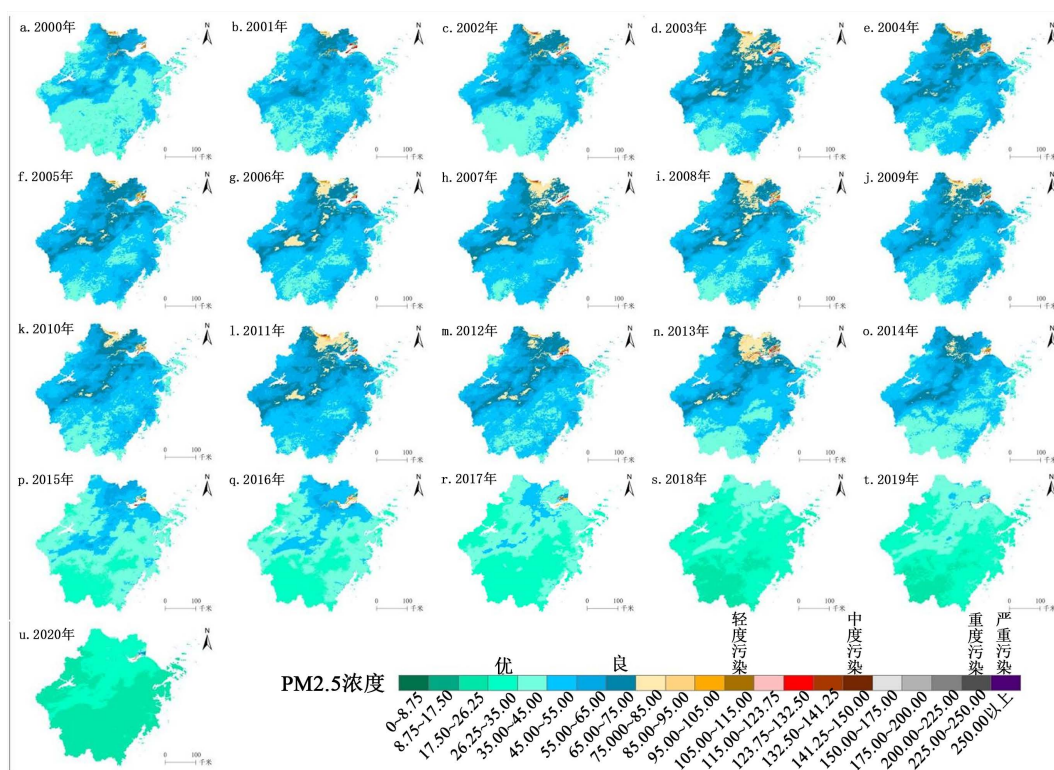


Figure.5. Graded distribution of annual mean PM_{2.5} concentration in Zhejiang Province from 2000 to 2020
图5. 浙江省2000~2020年PM_{2.5}浓度年均值分级分布

由图6可知温州市2000~2020年的PM_{2.5}浓度年均值分布。2000年,温州市PM_{2.5}浓度总体位于优,乐清市以及鹿城区、瓯海区、瑞安市、平阳县PM_{2.5}浓度位于良。2001年温州市PM_{2.5}浓度总体位于良,与上一年相比,PM_{2.5}浓度上升。2002年除乐清市以及鹿城区、瓯海区、瑞安市、平阳县以外,其余地区PM_{2.5}浓度对比上一年有所减少。2003~2012年,温州市内PM_{2.5}浓度总体上升,泰顺县、文成县、平阳县的部分地区PM_{2.5}浓度位于优,其余地区PM_{2.5}浓度长期位于良。2013~2020年,温州市PM_{2.5}浓度逐年下降,2020年温州市的全部地区PM_{2.5}浓度位于优。

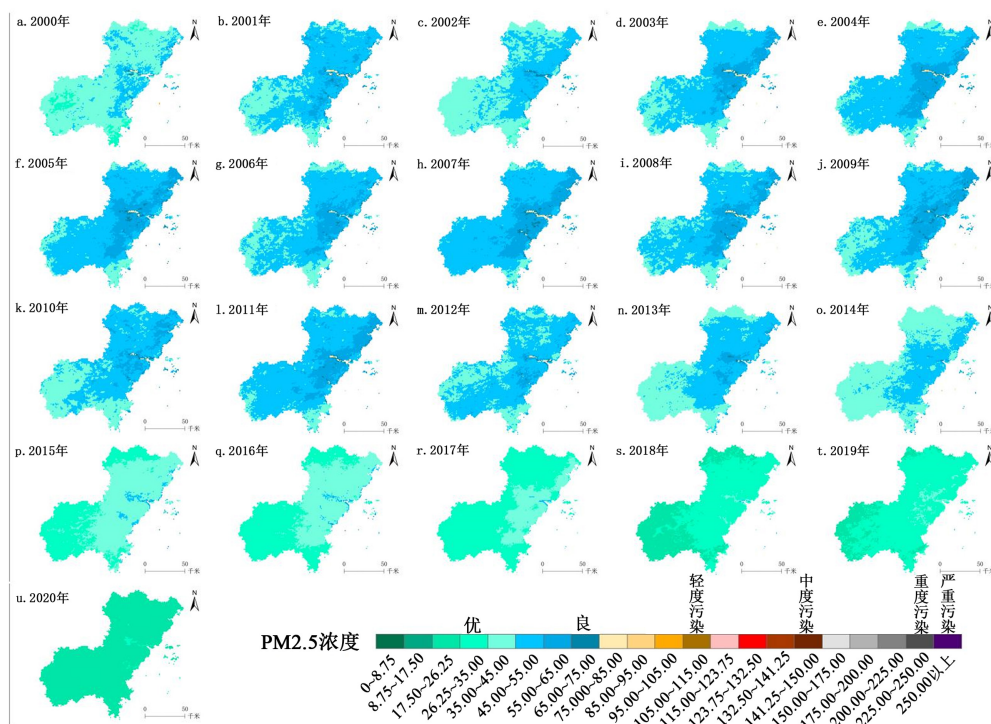


Figure.6. Grading distribution of annual mean PM_{2.5} concentration in Wenzhou from 2000 to 2020
 图 6. 温州市 2000~2020 年 PM_{2.5} 浓度年均值分级分布

4.3. 研究区 PM_{2.5} 浓度年均值时间分布特征

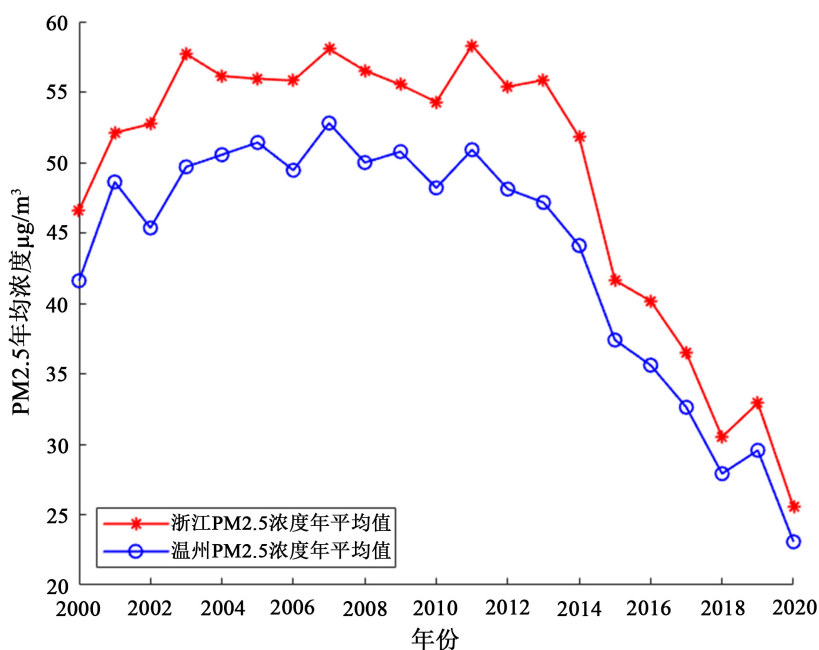


Figure.7. Annual mean change of PM_{2.5} concentration in Zhejiang Province and Wenzhou City from 2000 to 2020
 图 7. 浙江省与温州市 2000~2020 年 PM_{2.5} 浓度年均值变化

由图 7 可知, 浙江省 PM_{2.5} 浓度年均值介于 25.54 µg/m³~58.31 µg/m³, 整体上呈现出先上升后下降

的趋势。2000~2003年 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值都高于上一年,在2003年达到第一个高峰值($57.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2004~2006年, $PM_{2.5}$ 浓度年平均值逐年下降并于2006年达到第一个低峰值($55.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2007年陡然上升($58.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2007~2010年 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值逐年下降并于2010年达到第二个低峰值($54.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2011年陡然上升($58.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2012~2020年 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值逐年下降(2019年除外),从2018年开始浙江省 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值位于优;2020年达到 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值最低值($25.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值介于 $23.07 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 52.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$,整体上呈现出先上升后下降的趋势。2000~2005年 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值逐年上升(2002年除外),2002年出现第一个低峰值($45.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$);2006~2011年,温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值在 $48.19 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 52.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围内变动;2012~2020年 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值逐年下降(2019年除外),从2017年开始温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值位于优;2020年达到 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值最低值($23.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

4.4. 研究区 $PM_{2.5}$ 浓度年均值变化趋势

由MK检验(图8)可知,浙江省 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值整体均呈现出先升高,再逐渐降低的趋势,在2000~2013年呈现上升趋势,2014~2020年呈现下降趋势,其变化趋势突变点位于2017年。其中2003、2007、2008年浙江省的 UF 分别达到2.03、1.97、2.08,可以将这几年浙江省的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值变化趋势判定显著提升;2018年浙江省的 UF 为-1.96,且在此之后浙江省每年的 UF 逐年降低,则可以将浙江省2018年及以后的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值变化趋势判定为显著下降。

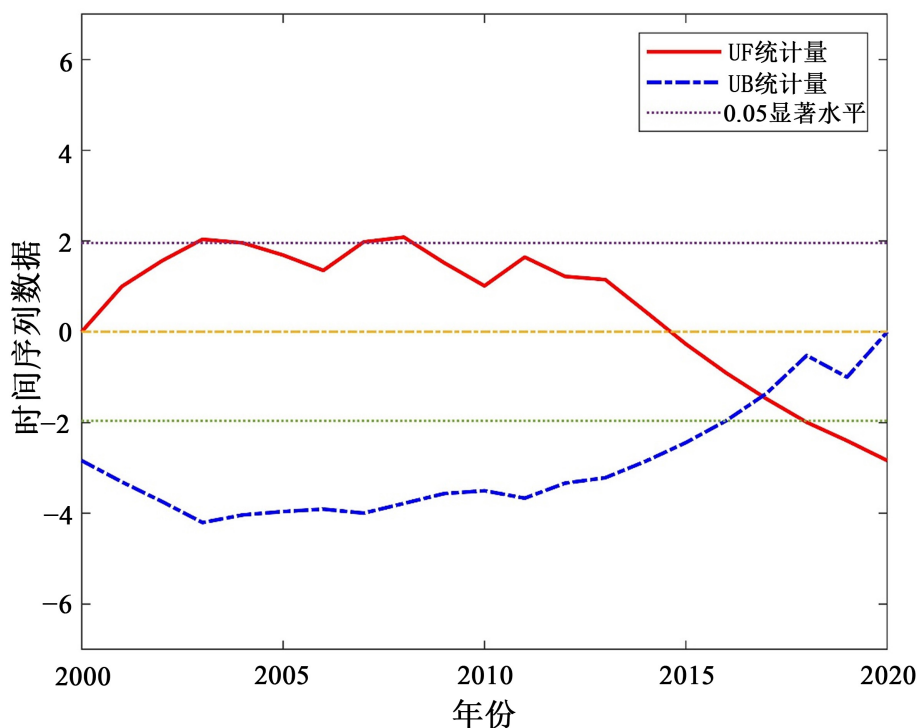


Figure.8. Analysis chart of annual mean MK of $PM_{2.5}$ concentration in Zhejiang Province
图8. 浙江省 $PM_{2.5}$ 浓度年均值 MK 趋势分析图

由MK检验(图9)可知,温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年平均值变化趋势与浙江省的类似,整体均呈现出先升高,再逐渐降低的趋势,在2000~2013年呈现上升趋势,2014~2020年呈现下降趋势,其变化趋势突变点位于2016~2017年之间。温州市在2004~2009年这六年间的 UF 均大于1.96,可以判定温州市在这六年间的 $PM_{2.5}$

浓度年平均变化趋势为显著上升；2018年温州市的 UF 为 -2.34 ，且在此之后温州市每年的 UF 逐年降低，则可以将温州市2018年及以后的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均变化趋势判定为显著下降。

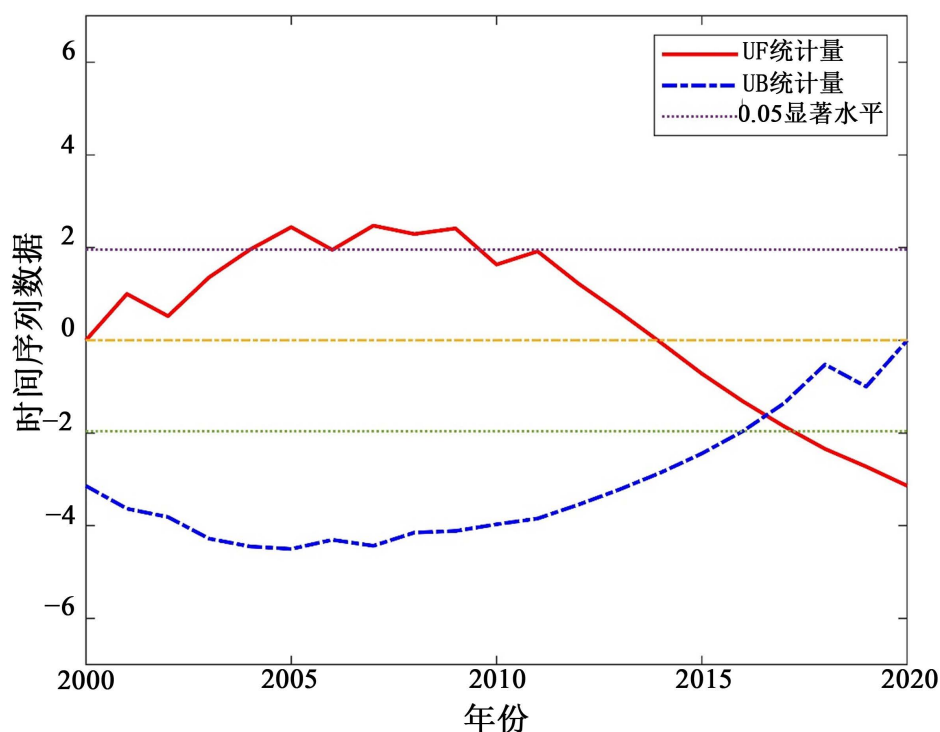


Figure 9. Analysis chart of annual mean value MK of $PM_{2.5}$ Concentration in Wenzhou City

图9. 温州市 $PM_{2.5}$ 浓度年均值 MK 趋势分析图

5. 结论

本文利用2000~2020年的年均 $PM_{2.5}$ 数据分析了浙江省与温州市21年间的 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布特征变化情况，得出如下主要结论：

1) 浙江省的 $PM_{2.5}$ 浓度最大值出现在嘉兴市海盐县南部，温州市的 $PM_{2.5}$ 浓度最大值出现在瑞安市东部。浙江省与温州市的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均变化趋势都呈现先上升、然后快速下降的趋势。在2000~2014年间呈现上升趋势；在2014~2020年间呈现快速下降趋势。

2) 在2000~2020年间，温州市每年的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值都小于浙江省。但由MK检验可知，在2004~2009年这6年间温州市的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值呈现显著上升趋势，而浙江省在同期的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值虽然也处于上升趋势，但其上升趋势小于温州市的上升趋势。由MK检验可知，在2018~2020年间浙江省与温州市的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均变化趋势都呈现显著下降趋势，但温州市在这几年间的 UF 均小于浙江省，说明在这几年间温州市的 $PM_{2.5}$ 浓度年平均下降趋势要比浙江省的更加明显。

3) 2000~2004年，浙江省的 $PM_{2.5}$ 浓度高值区由北部向中部蔓延；2005~2011年， $PM_{2.5}$ 浓度随着年份的变化产生一定幅度的波动，但 $PM_{2.5}$ 浓度高值区依旧位于浙江省北部及中部；2012~2020年，浙江省的 $PM_{2.5}$ 浓度高值区面积呈现明显的缩小趋势，除2013年的 $PM_{2.5}$ 浓度高值区面积较大，其余年份的 $PM_{2.5}$ 浓度高值区面积都相较于上一年有所缩小。

4) 温州市2001年的 $PM_{2.5}$ 浓度高值区由温州市中部向四周蔓延；2002年相较于上一年，其 $PM_{2.5}$ 浓度高值区面积有所缩小；2003、2004年 $PM_{2.5}$ 浓度高值区又从温州市中部向四周蔓延；2005~2011年，温

州市 PM_{2.5} 浓度高值区面积呈现较为平缓的变化趋势; 2012~2020 年, 温州市 PM_{2.5} 浓度高值区面积呈现明显的缩小趋势, PM_{2.5} 浓度高值区逐年从四周向温州市中心收缩。

5) 现有研究表明, 在“十二五”国家规划之后, 中国多个城市的空气质量显著提升[17]。

浙江省与温州市的 PM_{2.5} 浓度年均值从 2011 年开始逐年减小(仅有 2019 年除外), 这与“十二五”国家规划在时间上高度吻合, 则可以说明研究区 PM_{2.5} 浓度年均值的下降和“十二五”国家规划高度相关。

基金项目

温州市基础性科研项目(S20210012)。

参考文献

- [1] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆. 近 20 年来中国 PM_{2.5} 污染演变的时空过程[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 1-13.
- [2] 酃嘉诚, 高庆先, 李亮, 等. 对首要污染物所揭示的京津冀环境空气质量状况的认识启迪与对策建议[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1651-1661.
- [3] 穆泉, 张世秋. 中国 2001-2013 年 PM_{2.5} 重污染的历史变化与健康影响的经济损失评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 694-706.
- [4] 尚勇. 全球问题的中外关联——以大气污染为例[J]. 改革与开放, 2015(15): 46+51.
- [5] 李怀川. 浙江省空气重污染过程统计特征及浙南重污染预报方法的探讨[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [6] 赵燕, 李大伟, 翟宇虹, 方晓丹. 2014 年-2021 年珠海市环境空气质量变化趋势及污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(12): 144-149.
- [7] Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., et al. (2005) The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **62**, 947-973. <https://doi.org/10.1175/JAS3385.1>
- [8] Lyapustin, A., Wang, Y., Laszlo, I., et al. (2011) Multiangle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC): 2. Aerosol Algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**, Article No. D03211. <https://doi.org/10.1029/2010JD014986>
- [9] Lyapustin, A., Wang, Y., Laszlo, I., et al. (2012) Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric Correction. *Remote Sensing of Environment*, **127**, 385-393. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.002>
- [10] Zheng, Y., Zhang, Q., Liu, Y., Geng, G. and He, K. (2016) Estimating Ground-Level PM_{2.5} Concentrations over Three Megalopolises in China Using Satellite-Derived Aerosol Optical Depth Measurements. *Atmospheric Environment*, **124**, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.06.046>
- [11] van Donkelaar, A., Martin, R.V., Levy, R.C., et al. (2011) Satellite-Based Estimates of Ground-Level Fine Particulate Matter during Extreme Events: A Case Study of the Moscow Fires in 2010. *Atmospheric Environment*, **45**, 6225-6232. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.068>
- [12] Lv, B., Hu, Y., Chang, H.H., et al. (2017) Daily Estimation of Ground-Level PM_{2.5} Concentrations at 4 km Resolution Over Beijing-Tianjin-Hebei by Fusing MODIS AOD and Ground Observations. *Science of the Total Environment*, **580**, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.049>
- [13] Just, A.C., Wright, R.O., Schwartz, J., et al. (2015) Using High-Resolution Satellite Aerosol Optical Depth to Estimate Daily PM_{2.5} Geographical Distribution in Mexico City. *Environmental Science & Technology*, **49**, 8576-8584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00859>
- [14] Xiao, Q., Wang, Y., Chang, H.H., et al. (2017) Full-Coverage High-Resolution Daily PM_{2.5} Estimation Using MAIAC AOD in the Yangtze River Delta of China. *Remote Sensing of Environment*, **199**, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.023>
- [15] Huang, K., Xiao, Q., Meng, X., et al. (2018) Predicting Monthly High-Resolution PM_{2.5} Concentrations with Random Forest Model in the North China Plain. *Environmental Pollution*, **242**, 675-683. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.016>
- [16] 晨澄, 杨友健, 白直旭. 瓯江流域感潮河段潮位变化趋势分析[J]. 陕西水利, 2022(7): 1-5+11.
- [17] 刘亦文. 碳减排约束政策对中国城市空气质量的影响研究[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022, 36(2): 73-81.