

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of PM2.5 in Shandong Province in the Past Five Years

Yixin Zhang, Jianping Wang, Xiaohan Zhang, Yuan Zhou, Zhendong Sun

Qufu Normal University, Rizhao Shandong
Email: 17862326021@163.com, 2637826016@qq.com, 17862327580@163.com, 1209231408@qq.com, 2569733091@qq.com

Received: Apr. 16th, 2019; accepted: May 6th, 2019; published: May 13th, 2019

Abstract

Based on the PM2.5 mass concentration data of each city in Shandong province, this paper not only studied the average field, annual average, seasonal average, daily average and hourly concentration data of PM2.5 in Shandong province, but also studied the spatial and temporal distribution characteristics of concentration of PM2.5 in Shandong province in 2014-2018. The results show that in the spatial dimension, PM2.5 generally shows a trend of increasing from coastal to inland, and due to the influence of topography, economy, humanities and other factors. The distribution of concentration shows the characteristics of low concentration in developed areas as well as in high altitude areas. In the time dimension, since 2014, PM2.5 concentration has shown a steady decline year by year, and in the seasonal variation, it showed a regulation of low in summer and high in winter. The daily variation of PM2.5 concentration in the inland areas is double-peak, while the daily changes in coastal areas are more smooth and lower in concentration.

Keywords

Shandong Province, PM2.5 Concentration, Spatial-Temporal Pattern

山东省近5a PM2.5浓度时空分布特征

张艺馨, 王建平, 张潇晗, 周元, 孙振东

曲阜师范大学, 山东日照
Email: 17862326021@163.com, 2637826016@qq.com, 17862327580@163.com, 1209231408@qq.com, 2569733091@qq.com

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年5月6日; 发布日期: 2019年5月13日

文章引用: 张艺馨, 王建平, 张潇晗, 周元, 孙振东. 山东省近 5a PM2.5 浓度时空分布特征[J]. 地理科学研究, 2019, 8(2): 187-196. DOI: 10.12677/gser.2019.82020

摘要

基于山东省2014~2018年各地级市PM_{2.5}质量浓度数据,利用山东省PM_{2.5}浓度的平均场,逐年平均值、季节平均值、日平均值及逐小时浓度数据,分析了近5年山东省PM_{2.5}浓度的时空分布特征。研究结果表明:空间维度上,PM_{2.5}浓度大致呈现由沿海向内陆逐渐升高的趋势,内陆的泰安和济宁PM_{2.5}浓度较低。时间维度上,自2014年至今PM_{2.5}浓度表现为逐年稳定下降的趋势;季节变化上呈现出冬季最高、春秋次之,夏季最低的特点;内陆地区一天中的PM_{2.5}的浓度变化呈双峰分布,而沿海地区日变化较为平缓且浓度较低。

关键词

山东省, PM_{2.5}浓度, 时空分布

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

现今国家逐步调整经济结构,促进经济的高质量发展,过去国家经济的高速发展以及全国范围内城市化进程的加进,全社会的能源消耗急剧增加,导致我国近年来的环境污染问题十分突出,甚至影响公众的日常生活。我国华北、华中、华东等地是重点的煤炭能源消耗地,高浓度的污染物相互作用,形成大气复合污染和霾现象[1] [2]。PM_{2.5}是指大气中空气动力学当量直径小于或等于2.5 μm的颗粒物,又称为可入肺颗粒物,主要是由燃烧过程(如煤炭燃烧、汽车尾气等)或气态污染物在大气中经过气-粒转化(凝聚、吸附、反应等)生成[3]。PM_{2.5}粒径小,富含大量的有毒、有害物质且在大气中的停留时间长、输送距离远,虽然它只是地球大气成分中含量很少的组分,但它对人体危害极大。其比表面积大、易吸附和携带大量有害物质,可直接进入人体肺泡,能引发人体过敏、呼吸系统、心血管及癌症等疾病,威胁人类健康。除此之外,PM_{2.5}能直接降低空气能见度,产生灰霾天气,从长远角度看会对气候带来影响[4] [5] [6] [7]。如今由于PM_{2.5}带来的大气污染问题已经使得PM_{2.5}成为影响我国国家形象的关键问题。

目前我国大气环境监测的常规手段仍是通过建立地面监测站的方式,我国地域辽阔,现有的地面监测点数量不能满足监测大区域尺度的空气质量状况,国内学者针对小尺度区域研究较多,研究区域主要集中在京津冀、长三角以及珠三角等重点区域,且时间序列较短。根据美国国家航空航天局(NASA)公布的2001~2006年全球尺度范围内的PM_{2.5}均值分布图显示,全球PM_{2.5}的重灾区集中在中国的华北、西南、长江三角洲、珠江三角洲区域以及北非地区[8]。近年来,已有学者对全国31个省会城市的六大主要环境空气污染物的时空变化规律进行了系统研究,已获得各污染物在全国的总体分布情况、主要集中在区域、高峰出现的主要时间点和月份等信息,从而在宏观上对国家制定环境污染防控治理政策提供了重要的参考依据[9] [10] [11]。隋玟萱[12]等对山东省2015年PM_{2.5}年均质量和年超标天数的时空分布的研究发现两者的空间分布均呈现由东部向西部递减的趋势,半岛地区的浓度最低。该结论与本文研究结果基本相符。但本文研究的时间序列更长。

山东省位于我国的华东地区,经济发展水平居全国前列,随着经济的飞速发展,能源消耗迅速增加。近年来山东省环境问题频频发生,成为PM_{2.5}污染的重灾区,环境问题愈加受到人们重视。本文利用

2014~2018年山东省17地市逐日均值数据,分析PM_{2.5}的空间分布特征及时间变化趋势,得到山东省较完整的PM_{2.5}时空分布状况。PM_{2.5}的研究对了解区域环境污染问题具有重要意义,可以为山东省大气污染防治政策的制定提供科学的方向,进而制定有效可行的大气污染防治措施,改善空气质量,减少对人体健康的伤害,加快经济发展。

2. 研究区概况

山东省境域由半岛和内陆两部分组成,位于我国东部沿海,黄河下游,34°22.9'N~38°24.01'N、114°47.5'E~122°42.3'E之间(图1)。山东半岛突出于渤海、黄海之中,同辽东半岛遥相对峙;内陆部分自北向南与河北、河南、安徽、江苏4省接壤。从地势上看,山东省形成以山地丘陵为骨架(泰山雄踞中部,为山东省最高点),平原盆地交错环列其间的地形大势。从地形地貌上看,境内地貌复杂,大体可分为中山、低山、丘陵、台地、盆地、山前平原、黄河冲积扇、黄河平原、黄河三角洲等9个基本地貌类型。从气候类型看,山东省属暖温带季风气候,降水集中,雨热同季。此外,山东省作为中国的经济第三大省,人口第二大省,总面积居全国第九位,省内工农业发达,农业增加值稳居中国各省第一位,工业总产值及工业增加值居中国各省前三位,大型企业较多,号称“群象经济”。

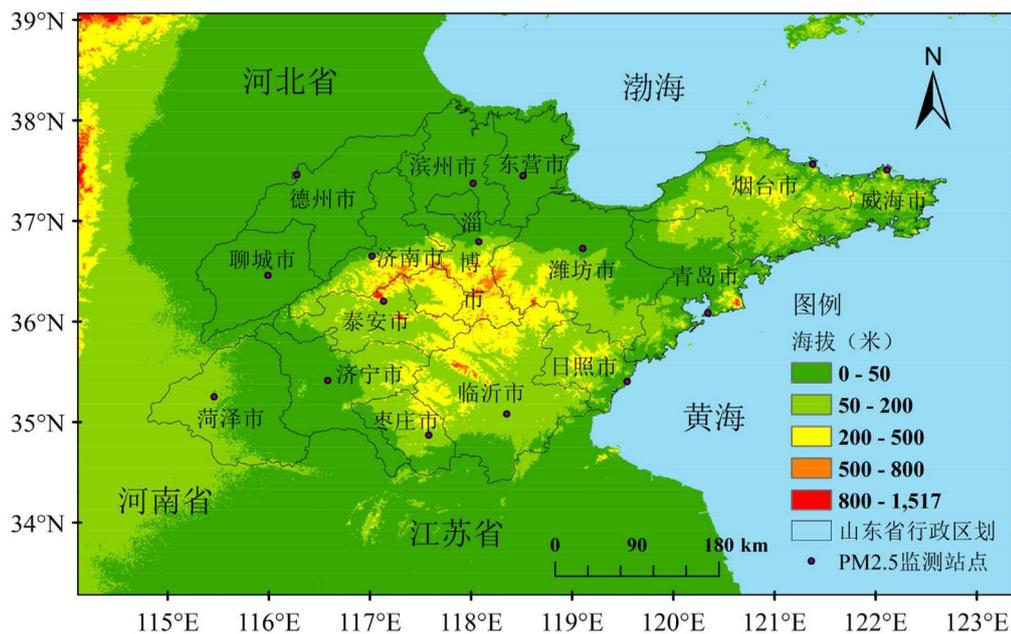


Figure 1. Location of study area and terrain

图1. 研究区域地理位置及地形

3. 数据来源与研究方法

3.1. 数据来源

本文的PM_{2.5}质量浓度数据来源于真气网(<https://www.zq12369.com/>),通过数据计算山东省17个地级市的日均以及每年(2014年1月至2018年12月)4月15日、7月15日、10月15日、1月15日逐小时PM_{2.5}浓度数据。以此数据为基础,进行统计处理后得到各市PM_{2.5}年平均数据、季节平均数据及日平均数据。根据GB3095-2012《环境空气质量标准》对环境空气功能区的分类,将山东省17地市均按照二类功能区进行统计,规定其年、日均限值分别35 μg/m³和75 μg/m³。

3.2. 研究方法

3.2.1. 空间变化特征

基于山东省 2014~2018 年各市 PM_{2.5} 日均值, 利用 ArcGIS 中的空间分析模块获取山东省近五年 PM_{2.5} 日平均质量浓度的空间分布, 分层设色得到 2014~2018 年山东省 PM_{2.5} 日平均空间分布图, 通过图像分析近五年山东省 PM_{2.5} 的空间分布特征。

3.2.2. 时间变化特征

以 2018 年 17 地市日数据作为分析 PM_{2.5} 区域性规律的样本, 在 SPSS 中对这些数据进行直接聚类分析, 先把各个城市单独视为一类, 然后根据距离最小的原则, 依次选出一对分类对象, 并成新类。如果其中一个分类对象已归于一类, 则把另一个也归入该类; 如果一对分类对象正好属于已归的两类, 则把这两类并未一类。每一次归并, 都划去该对象所在的列及与列序相同的行。那么经过 16 次就可以把 17 个地级市归为一类, 如图 2。可将聚类分析的结果分为四大类, 在每一类中选取一个城市来代表该类区域 PM_{2.5} 时间变化的总体状况, 进而反映全省 PM_{2.5} 时间变化的总体状况; 在研究区域内选择了济南、聊城、青岛和临沂四个典型城市。这样既避免了因数据量巨大带来的分析不便又保证了分析具有科学性。以 17 地市逐日数据的平均值作为全省逐年平均值, 得到线性函数方程式及判定系数, 并做出四个典型城市的 PM_{2.5} 年平均值折线图与全省比较, 进行年际变化特征分析; 在分析季节变化特征中, 选取代表月份 4 月、7 月、10 月及 1 月分别表示春夏秋冬四季, 求取代表月份的 PM_{2.5} 浓度均值作为各季节平均值,

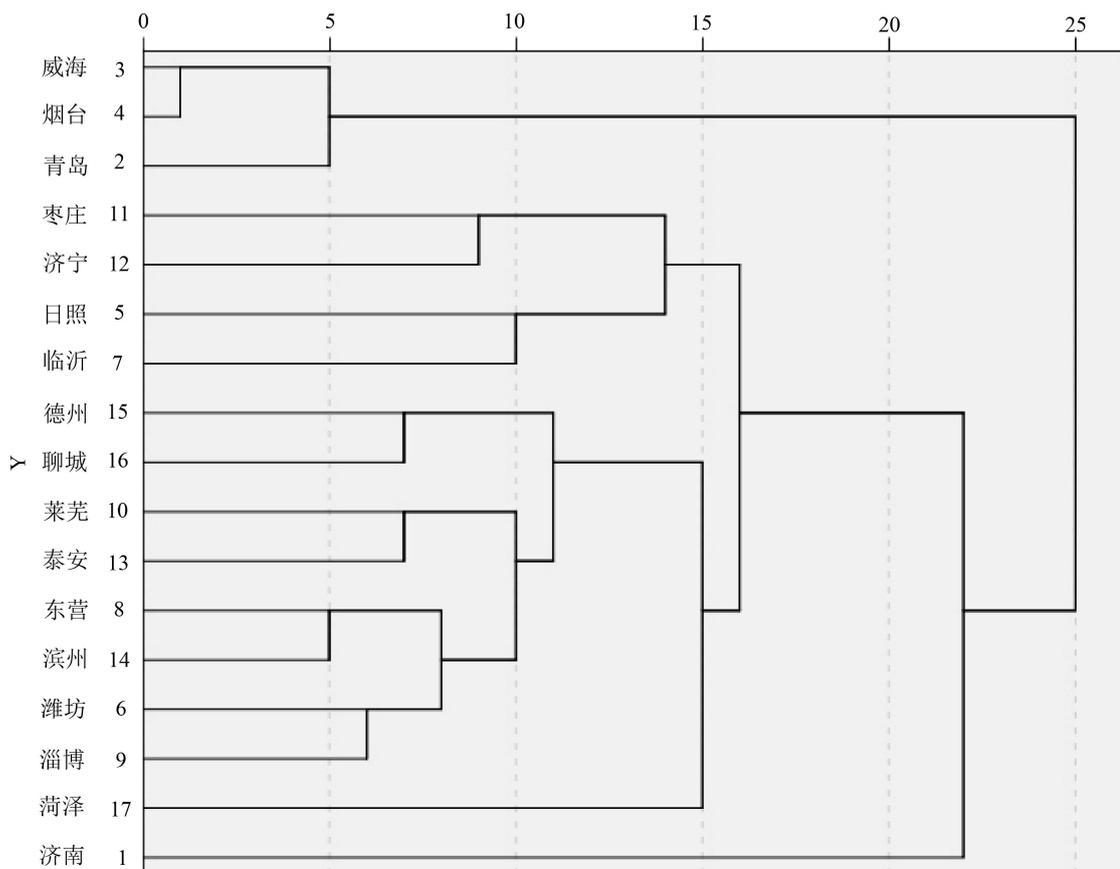


Figure 2. Cluster analysis results based on PM_{2.5} data in 17 cities in 2018

图 2. 2018 年 17 地市基于 PM_{2.5} 数据的聚类分析结果

制作出典型城市四季的浓度变化柱形图, 通过对比分析得到山东省 PM_{2.5} 浓度的季节变化规律; 求取全省 2014~2018 年各月份平均值, 作为月变化数据来源, 做出四个典型城市近五年来的月均值浓度折线图, 在此基础上总结分析山东省 PM_{2.5} 浓度最高月份、最低月份以及 PM_{2.5} 浓度月变化趋势; 每年选取 4 月 15 日、7 月 15 日、10 月 15 日、1 月 15 日作为样本, 计算均值得到四个典型城市的逐小时变化趋势图, 对四个城市进行整体分析得到山东省 PM_{2.5} 浓度逐小时变化规律, 作为分析全省逐小时尺度上 PM_{2.5} 浓度时间变化的依据。

4. 结果与分析

4.1. PM_{2.5} 的空间分布特征

根据 2014~2018 年山东省 17 地市的日平均 PM_{2.5} 浓度值求得五年的日平均值, 利用 ArcGIS 对每个地级市进行赋值得到图 3, 直观表现 2014~2018 年 PM_{2.5} 浓度值的空间分布状况。全省 PM_{2.5} 浓度值大致呈现由西向东递减的趋势, 各地级市 PM_{2.5} 年均浓度值在 33.43~83.16 之间, 全省平均 PM_{2.5} 浓度值为 66.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除了威海市以外均超过了我国环保部所规定的 PM_{2.5} 年平均浓度的二级标准年限值(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。分区来看, 鲁西北地区 PM_{2.5} 浓度值为全省 PM_{2.5} 高值区, 达到了 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 其中泰安地区相对于周边城市的 PM_{2.5} 浓度值较低, 这与其平均海拔高有很大关系; 半岛地区 PM_{2.5} 低于全省平均水平, 大部分地区在 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (二级标准日限值) 以下。全省污染最严重的城市为聊城市和菏泽市, 年均值分别为 83.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 81.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 污染最轻的为威海市, 年均值为 33.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

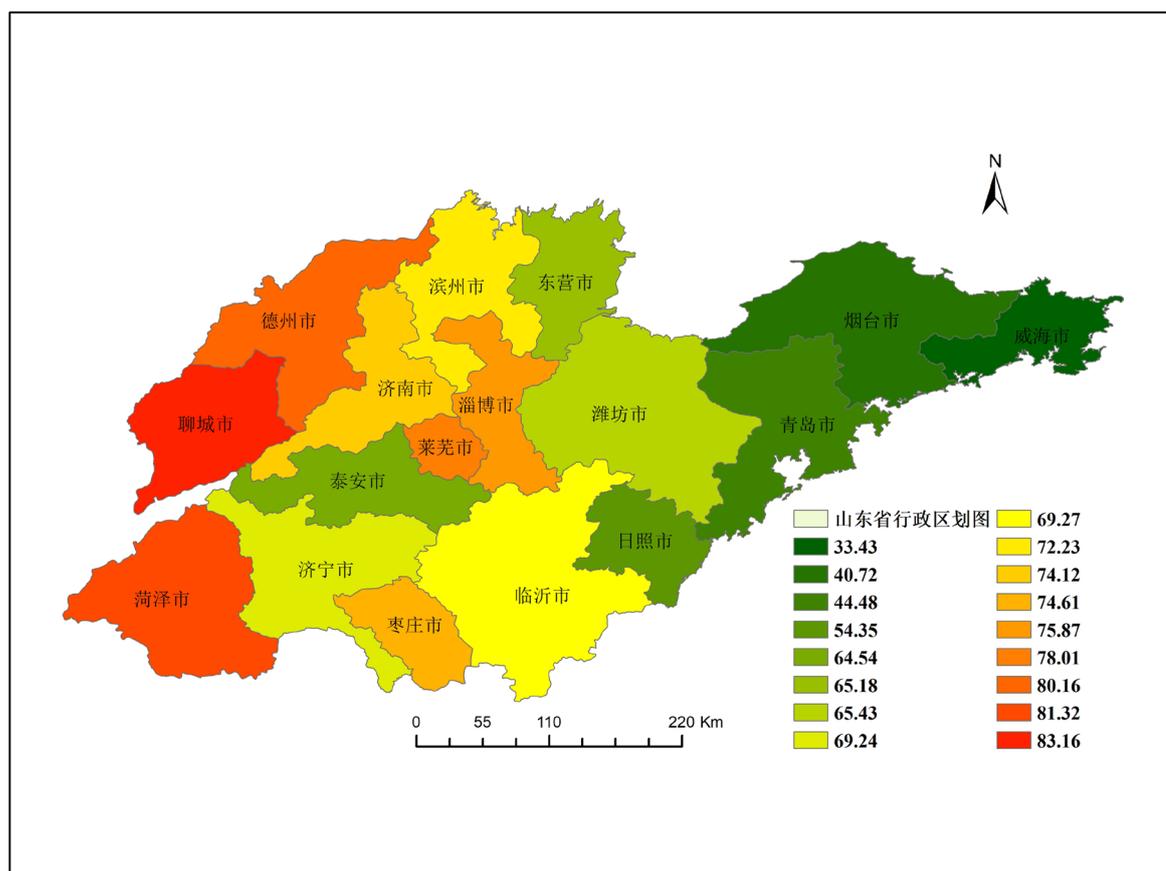


Figure 3. Spatial distribution of multi-year mean value of PM_{2.5} in Shandong province in 2014-2018
图 3. 2014~2018 年山东省 PM_{2.5} 多年均值的空间分布

4.2. PM2.5 时间变化特征

4.2.1. PM2.5 的年度变化特征分析

求得 2014~2018 年 PM2.5 年均值, 并求取聊城、济南、青岛和临沂四个典型城市的 PM2.5 年均值得到图 4。2014~2018 年山东省的年平均 PM2.5 浓度值在 54~81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间变化。其中 2014 年 PM2.5 浓度值最高(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2018 年最低(54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。根据计算, 全省近 5 年平均 PM2.5 浓度值为 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 与全球陆上年平均 PM2.5 浓度值 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 相比, 山东省气溶胶浓度明显高出全球平均水平。但总体来看, 山东省 PM2.5 年均值的下降趋势较为稳定; 统计得出, 2014~2018 年 PM2.5 全年平均浓度分别为 80.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、75.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、66.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、57.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。线性方程式为: $y = -8.041x + 90.391$, 即近五年来 PM2.5 浓度值的变化斜率为 $-81.86/10\text{a}$, 判定系数为 0.9918, 可以看出自 2014 年以后, 山东省 PM2.5 浓度有明显的减少趋势。这与近年来政府相应措施的出台以及居民素质的提高等密切相关。

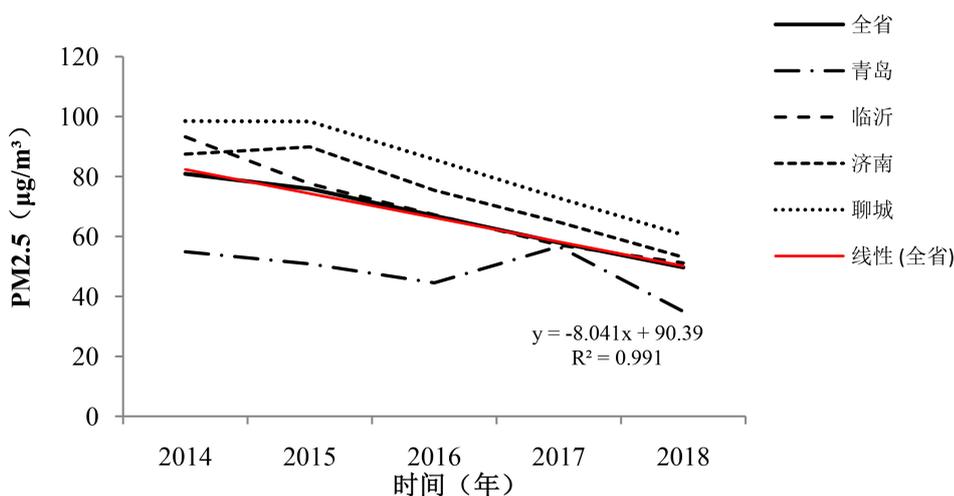


Figure 4. Annual average of PM2.5 in Shandong province and typical cities

图 4. 山东省及典型城市 PM2.5 的年平均值变化

从典型城市变化曲线分析得到济南、青岛、临沂、聊城市 PM2.5 浓度值分布规律。从变化趋势来看, 四个城市 PM2.5 浓度值均明显下降; 其中聊城、临沂市的逐年下降趋势最明显, 青岛为波动性下降。位于山东省内陆的地区(济南、聊城)的 PM2.5 浓度值高于沿海城市(青岛), PM2.5 浓度的高低与海陆位置有关联: 距海越近, PM2.5 浓度值越低, 反之越高。同时也高于地势较高的城市如临沂, 说明 PM2.5 的浓度与地形地势有关联: 地势越高, PM2.5 浓度值越低, 反之越高。观察单个城市的趋势线, 可以发现临沂与全年平均 PM2.5 浓度变化趋势基本一致, 呈现持续下降走势。济南与聊城浓度趋势相似, 近五年来 PM2.5 浓度的变化趋势分为两段: 第一段 2014~2015 年 PM2.5 浓度值基本不变, 或略有增长; 第二段 2015~2018 年, PM2.5 浓度值处于快速下降阶段。除海陆因素、地形地势影响之外, 济南、聊城还同属京津冀大气污染传输通道城市, 受工业废气影响, 使得大气中的细颗粒物(PM2.5)浓度高于沿海城市, 这也是 PM2.5 浓度产生差异的一个重要原因, 但近年来相关环境保护措施的实施使这种情况较好的得到改善。

4.2.2. PM2.5 季节及月变化特征分析

以临沂、青岛、济南、聊城市为代表城市, 求得五年间 4 个城市季节均值的变化曲线图(图 5)。图中可以看出: 夏季 PM2.5 浓度最低(全省各地市浓度值均低于 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 其中临沂、青岛两市的夏季 PM2.5

浓度值低于 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为全年最高，聊城、济南冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值达到 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，属于重度污染区。由于受到主风向、温度、湿度及冬季燃煤污染物排放量增加等因素的影响，冬季是山东省各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值最高，污染范围最广，造成危害最大的季节；春、秋季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值在冬、夏两季之间。整体呈“冬高夏低、春秋居中”的季节性变化规律。一方面，夏季降雨丰富，空气对流强，更利于颗粒物沉降和扩散；冬季受下沉气流控制，颗粒物悬浮在近地面，不利于扩散。另一方面，冬季采暖加大了污染物排放(尤其是中国北方)，这也一定程度上导致了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节性差异，这与前人的研究成果相似[13] [14]。Zhao 等和 Chai 等的研究发现，我国北方城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的峰值分别出现在 10 月和 1 月[15] [16]，冬季峰值的出现可能受冬季采暖活动影响严重；另一方面，进入深秋的大气层结趋于稳定，边界层气温低，风速小，降水少，导致静稳天气增多而湿沉降减少，使污染物容易积累而不易扩散。因此，冬季成为我国灰霾高发的主要季节。

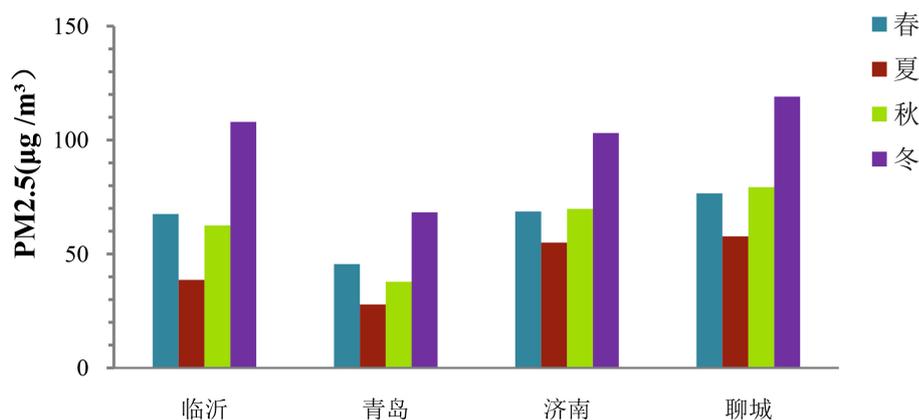


Figure 5. Changes in $\text{PM}_{2.5}$ mean values of typical cities in each season from 2014 to 2018
图 5. 典型城市 2014~2018 年各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 平均值变化

以聊城、济南、青岛、临沂为代表城市，根据收集到的 2014~2018 年山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日数据，逐年求出月均值，得到五年间山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的逐月变化趋势图(图 6)。山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈宽缓“U”型起伏的月平均变化，2~4 月为浓度明显的下降期，5~9 月为低值稳定期。进入 11 月份以后，浓度值有明显的升高趋势，随着冬季燃煤取暖的开始，浓度值达到全年的最大值；全省的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均表现出夏季低冬季高的特点，夏季以 7 月最低，冬季以 1 月最高，这与全省 $\text{PM}_{2.5}$ 季节变化规律是吻合的。

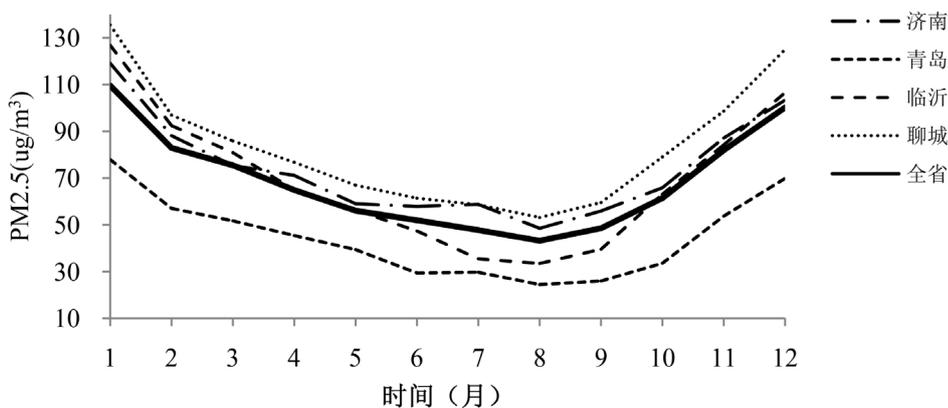


Figure 6. Monthly average change of $\text{PM}_{2.5}$ in typical cities in 2014-2018
图 6. 2014~2018 年典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 多年月平均值变化

4.2.3. PM_{2.5} 日变化特征分析

通过收集山东省 2014~2018 年四个典型城市 4 月 15 日、7 月 15 日、10 月 15 日、1 月 15 日的逐小时 PM_{2.5} 浓度值，并对其进行平均得到四个典型城市的逐小时变化趋势图(图 7)。

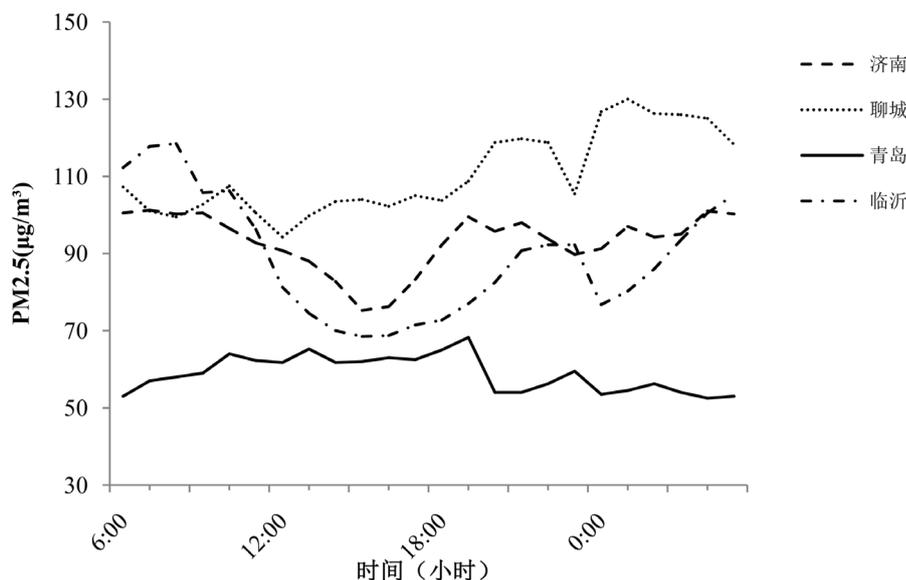


Figure 7. Shandong PM_{2.5} changes hour by hour
图 7. 山东省 PM_{2.5} 逐小时变化

从图 7 中可以看出济南、聊城、临沂在一天中的 PM_{2.5} 的浓度变化呈双峰分布，两个峰值分别出现在上午 9 时和晚上 22 时之后；而在一天中 PM_{2.5} 的浓度最低时出现在下午 16 时左右；青岛市没有明显的高值、低值时间段，全天在 15~19 时 PM_{2.5} 浓度略高。这表明由海陆热力差异引起的海陆风在稀释平滑 PM_{2.5} 浓度方面有重要的作用。

造成 PM_{2.5} 日变化差异的原因可能为气象和交通原因。从图中可以看出，早上六点钟以后 PM_{2.5} 浓度值在缓慢增加，这是由于对流层底层气温较低，易产生逆温层，导致大气污染物的扩散受到影响，底层大气污染严重，且随着上班高峰的到来，人类活动、机动车行驶等开始活跃，PM_{2.5} 的质量浓度开始升高，在早上 9 时左右出现了一个较为严重的污染峰值区间。9 点以后，由于气温的升高、上班交通高峰过去、大气扩散情况的好转，PM_{2.5} 的质量浓度不断下降并在下午 16 时左右出现最低值；而到了晚上 22 点的时间段，因为一天中人类活动、汽车行驶等情况的不断进行，加之晚上大气层结状况比较稳定，PM_{2.5} 由于累积而使其质量浓度值随之不断升高，出现了另一个峰值。

5. 结论与讨论

本文以山东省的 PM_{2.5} 浓度为研究对象，收集山东省 17 地市 2014~2017 年 PM_{2.5} 的日均值数据，求得四年的日均值，利用 ArcGIS 对每个地级市进行赋值得到空间分布图；选取典型城市进行年际变化的分析从而得出全省 PM_{2.5} 的年际变化规律；结合 PM_{2.5} 的季节、月变化、逐小时变化进行分析，得出山东省近四年 PM_{2.5} 的时空分布特征。结论如下：

1) 全省 PM_{2.5} 浓度值大致呈现由西向东递减的趋势，鲁西北地区 PM_{2.5} 浓度值最高，达到了 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，泰安地区相对于周边城市 PM_{2.5} 值较低，半岛地区 PM_{2.5} 值低于全省水平，大部分地区在 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

2) 从年际变化来看, 山东省与四个典型城市 PM_{2.5} 浓度变化均呈下降趋势, 且与海陆位置、地势有关。从季均值和月均值变化看, 山东省 17 地市 PM_{2.5} 浓度均表现出了夏季低冬季高的特点, 而又以夏季 7 月最低, 冬季 1 月最高, 呈现“冬高夏低, 春秋居中”的规律; 全年来看, 山东省 PM_{2.5} 月浓度值呈现明显的“U”字型变化规律。全天来看, 一天中的 PM_{2.5} 的浓度变化呈双峰分布, 两个峰值分别出现在上午 9 时和晚上 22 时左右, 而在一天中 PM_{2.5} 的浓度最低值出现在下午 16 时左右; 其中沿海城市青岛日变化较为平缓其浓度较低, 而内陆城市双峰变化明显且浓度较高。

3) 本文研究了 PM_{2.5} 的时空分布特征及变化趋势, 可以得到山东省较完整的 PM_{2.5} 时空分布状况, 弥补国内目前对小尺度区域研究领域的不足, 对认识区域环境气候变化具有重要意义; 另一方面, 为山东省政府及有关部门进行未来大气环境的治理提供了方向, 制定有效可行的大气污染防治措施, 改善空气质量, 减少对人体健康的伤害, 加快经济的发展。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(201710446001)。

参考文献

- [1] 陆喜红, 任兰, 吴丽娟. 南京市大气 PM_{2.5} 中重金属分布特征及化学形态分析[J]. 环境监测与预警, 2019, 11(1): 40-44.
- [2] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 15-26.
- [3] 潘小川, 李国星, 高婷. 危险的呼吸: PM_{2.5} 的健康危害和经济损失评估研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [4] Jiménez, E., Linares, C., Rodríguez, L.F., Bleda, M.J. and Díaz, J. (2009) Short-Term Impact of Particulate Matter (PM_{2.5}) on Daily Mortality among the Over-75 Age Group in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, **407**, 5486-5492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.038>
- [5] Janssen, N.A.H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C. and Cassee, F.R. (2013) Short-Term Effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on Daily Mortality in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, **463-464**, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>
- [6] Cox, L.A., Popken, D.A. and Ricci, P.F. (2013) Warmer Is Healthier: Effects on Mortality Rates of Changes in Average Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentrations and Temperatures in 100 US Cities. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **66**, 336-346. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2013.05.006>
- [7] Pascal, M., Falq, G., Wagner, V., et al. (2014) Short-Term Impacts of Particulate Matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on Mortality in Nine French Cities. *Atmospheric Environment*, **95**, 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.030>
- [8] 南国卫, 孙虎, 朱一梅. 陕西省 PM_{2.5} 时空分布规律及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 834-843.
- [9] Wang, Y.-G., Ying, Q., HU, J.L. and Zhang, H.-L. (2014) Spatial and Temporal Variations of Six Criteria Air Pollutants in 31 Provincial Capital Cities in China during 2013-2014. *Environment International*, **73**, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.016>
- [10] 谢志祥, 秦耀辰, 郑智成, 等. 京津冀大气污染传输通道城市 PM_{2.5} 污染的死亡效应评估[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 843-852.
- [11] Yin, D., Zhao, S. and Qu, J. (2016) Spatial and Seasonal Variations of Gaseous and Particulate Matter Pollutants in 31 Provincial Capital Cities, China. *Air Quality Atmosphere & Health*, **10**, 359-370. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0432-1>
- [12] 隋玟萱, 王颀樾, 唐晓, 等. 山东省 2015 年 PM_{2.5} 和 O₃ 污染时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2019, 35(2): 59-69.
- [13] 江亿, 唐孝炎, 倪维斗, 等. 北京 PM_{2.5} 与冬季采暖热源的关系及治理措施[J]. 中国能源, 2014, 36(1): 7-13+28.
- [14] 杨文雪, 张晶, 秦宇, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 浓度的时空差异及其相关性研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 159-164.
- [15] Zhao, S., Yu, Y., Yin, D., He, J., Liu, N., Qu, J. and Xiao, J.-H. (2016) Annual and Diurnal Variations of Gaseous and

Particulate Pollutants in 31 Provincial Capital Cities Based on in Situ Air Quality Monitoring Data from China National Environmental Monitoring Center. *Environment International*, **86**, 92-106.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.003>

- [16] Chai, F., Gao, J., Chen, Z., *et al.* (2014) Spatial and Temporal Variation of Particulate Matter and Gaseous Pollutants in 26 Cities in China. *Journal of Environmental Sciences*, **26**, 75-82. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60383-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60383-6)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5762, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: gser@hanspub.org