

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.005

黄河三角洲 PM_{2.5} 时空分布及其影响因子分析

王欣瑶^{1,2}, 孙希华^{1,2}, 王林林^{1,2,3}, 刘曰庆^{1,2}(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. “人地协调与绿色发展”
山东省高校协同创新中心, 山东 济南 250358; 3. 滨州学院 建筑工程学院, 山东 滨州 256600)

摘要: 为黄河三角洲生态文化区域打造提供参考, 并为环境污染防治提供有力基础, 以空间数据插值和 Pearson 相关分析方法, 运用黄河三角洲及周围 40 个监测站点的 PM_{2.5} 逐日浓度和气象数据, 研究 PM_{2.5} 浓度的区域分布特征及随时间尺度的变化规律, 以及气象和 PM_{2.5} 浓度之间的相关性。结果表明: 黄河三角洲区域的 PM_{2.5} 浓度具有西南地区高于东北地区的特征, 总体上从滨州到东营呈减少趋势。2017 年黄三角地区 PM_{2.5} 年均浓度值为 63.16 μm^3 , 季节性变化显著, 总体呈现出春冬高、夏秋低的变化规律, 其中 1 月为一年中 PM_{2.5} 浓度污染最严重的月份, 日均值冬季的波动剧烈。此外, 黄河三角洲地区 PM_{2.5} 浓度与温度有负相关关系, 与湿度有正相关关系, 风速对于 PM_{2.5} 浓度来说具有双重影响。

关键词: PM_{2.5} 浓度; 时空特征; 影响因子; 黄河三角洲

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0032-11

Analysis of the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yellow River Delta

WANG Xinyao^{1,2}, SUN Xihua^{1,2}, WANG Linlin^{1,2,3}, LIU Yueqing^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. Human-earth Coordination and Green Development, Shandong University Collaborative Innovation Center, Jinan 250358, China; 3. School of Architectural Engineering Institute, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

Abstract: To provide a reference for building the ecological and cultural area of the Yellow River Delta and a strong foundation for environmental pollution prevention and control, the regional distribution characteristics of PM_{2.5} concentration and its change with time scales and the correlation between meteorology and PM_{2.5} concentration are studied by the spatial data interpolation and Pearson correlation analysis methods, together with the daily concentration of PM_{2.5} and meteorological data from 40 monitoring sites in the Yellow River Delta and surrounding areas. The results show that the concentration of PM_{2.5} around the Yellow River Delta in the southwest region is higher than that in the northeast region, and that the overall trend is decreasing from Binzhou to Dongying. In 2017, the annual average concentration of PM_{2.5} in the Yellow Triangle area is 63.16 μm^3 , with significant seasonal changes. The overall trend indicated that annual average concentration of PM_{2.5} in the Yellow Triangle area is high in spring and winter, and that it is low in summer and autumn. January is the most polluted month of the year for PM_{2.5} concentration, and the daily average fluctuated sharply in winter. In addition, PM_{2.5} concentration in the Yellow River Delta region have a negative correlation with temperature and a positive correlation with humidity, with wind speed having a double influence on PM_{2.5} concentration.

Key words: PM_{2.5} concentration; space-time characteristics; impact factor; Yellow River Delta

收稿日期: 2020-10-08; 网络出版日期: 2020-11-27

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201127.1113.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41871121); 山东水土保持学会重点领域创新资助项目(sdsbxh20181105)

第一作者: 王欣瑶, 女, 硕士生, 研究方向为 GIS 应用与环境可持续发展。E-mail: 2206481901@qq.com

通信作者: 孙希华, 男, 教授, 硕导, 研究方向为 GIS 应用与水土保持及环境可持续发展。E-mail: 471572553@qq.com

二十一世纪以来,随着工厂的数量增加和城市化速度的加快,经济蓬勃发展的同时也引发了许多污染问题,而十九大又最新作出坚决打好污染防治攻坚战的重大决策部署,其中大气污染是近年来中国面临的最为严峻的挑战,是污染防治的重要内容之一。通过不断的实验和研究,人们逐步认识到大气中的细颗粒物 PM_{2.5}颗粒半径非常小,被吸入肺中的机率很大,严重危害人体健康,增加各种与呼吸系统相关疾病的发病率以及死亡率,另外还会导致空气中能见度的降低^[1],造成空气质量下降。因此研究 PM_{2.5}的浓度与各种气象条件的关系,分析未来各种气象因子对空气的潜在危害影响,可以帮助相关部门制定空气质量标准的政策法规,制定各种大气污染治理措施,降低污染物的排放总量,为重污染天气提供定性定量的防治建议。

目前,众多学者^[2-4]从不同背景、不同视角、不同研究方法来对不同区域的颗粒物浓度展开大量研究,并取得了相关成果。由于经济迅速发展带来严重的大气污染问题,引起国内外专家进行了广泛的深入研究,包括在污染物浓度成分^[5-7]方面,研究表明 PM_{2.5}是污染环境的主要因子,并对有机气溶胶的化学组成进行探究。在污染源^[8-10]方面,发现二次气溶胶源、部分交通源、化石燃料和生物质燃烧源是 PM_{2.5}的主要来源。在时空分布^[11]方面,着重研究颗粒物污染的时间变化特征以及空间发展规律。在气象因素^[12-14]分析方面,对各污染物浓度与气象因素之间密切关系进行研究。另外许多学者采用各种不同的研究方法对浓度分布进行研究,如空间差异率(COD)^[14]、MATLAB 算法^[15]、反距离权重(IDW)^[16]以及遥感卫星观测方法^[17]。其中,关于 PM_{2.5}的时空特征及因素分析是研究的重要内容和方向。

近年来针对全国^[18-19]、北京市^[15,20]、京津冀地区^[12,21]等地区 PM_{2.5}污染浓度空间格局相关的研究较多,但对黄河三角洲的空气污染研究鲜少。黄河三角洲是世界六大河口三角洲之一,是我国国土开发的重点区域,随着经济政治文化不断提高,大气污染问题日益受大家关注,污染物浓度有逐年提高的趋势,并对许多领域都产生较大影响。对颗粒物浓度变化进行研究,对黄河三角洲环渤海地区打造“碧海蓝天”的生态环境、促进区域发展可持续发挥重要影响。因此,本研究对黄河三角洲内及周围 40 个站点的大气 PM_{2.5}污染浓度空间格局进行分析,一定程度上对其进行了整体污染分布模拟,从而进一步践行绿水青山就是金山银山的发展理念,为改善该

区域的大气环境质量提供借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域

本研究观测区域黄河三角洲位于黄河入海口处,即渤海南岸,莱州湾西侧,地处 117°31'E~119°18'E和 36°55'N~38°16'N 之间,主要分布于山东省的东营市和滨州市境内,涉及东营、滨州以及潍坊、德州、淄博、烟台市的部分地区共 19 个县(市、区),总面积达 $2.65 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 。黄河三角洲是通过黄河携来的大量泥沙不断沉积而形成的一个三角洲平原,地势非常平坦。这片三角洲属于温带大陆性气候,阳光十分充足,雨热同期,其中年平均降水量可达到五百多毫米,该区域内植被和生物资源丰富多样,生态类型非常独特。

1.2 数据源

本研究选用来自中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)的城市空气质量实时发布平台的逐小时监测数据,黄河三角洲各监测城市、及包括周围部分地区共计 40 个监测站点,选取 2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日的 PM_{2.5}逐时监测浓度数据,其对应的气象因子(温度、湿度、风速)逐时观测数据来源于中国气象局气象信息中心即 NMIC(<http://data.cma.cn/>),整理并计算分析监测站点的平均浓度,同时在进行数据的处理过程中,还计算数据的最大值和中位数作基础性检验,从而增加本文数据的可靠性与平稳性,其中部分缺失数据用空白表示。这些监测站点零散地分布在滨州市、东营市、德州市、潍坊市、淄博市,黄河三角洲区域所有监测站点的地理位置见图 1。

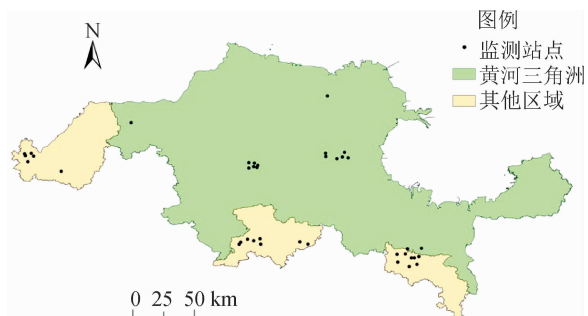


图 1 黄河三角洲各监测站点位置分布图
Fig. 1 Location of monitoring stations in the Yellow River Delta

1.3 数据分析方法

1.3.1 空间分析法

本研究采用地统计学中的普通 Kriging 内插法,Kriging 内插法是创建在试验变差图计算和建

模基础上的多阶段内插过程,其优点是可以确定空气中污染物的空间变化分布特征与规律,可以提供对未采样的最佳无偏预测^[22]。采用普通 Kriging 插值,将获得的点数据扩展到面数据,从而得到 2017 年整个黄河三角洲 PM_{2.5} 浓度的空间格局分布特征,以及不同季节的 PM_{2.5} 平均浓度格局分布图,其中未知点的大气 PM_{2.5} 浓度属性值 \hat{z}_0 表示为:

$$\hat{z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

式中: \hat{z}_0 是点 (x_0, y_0) 处的浓度估计值,即 $z_0 = (x_0, y_0)$; n 表示用来估算未知点的已知点的数目; i 表示国家或地区的序号; λ_i 表示权重系数; z_i 为已知点的大气 PM_{2.5} 污染浓度观测值。

1.3.2 相关系数法

黄河三角洲地区 PM_{2.5} 浓度污染时空格局变化与各气象因子之间的关系,采用相关系数法进行衡量^[23],其中 PM_{2.5} 浓度与气象因子之间的相关系数为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

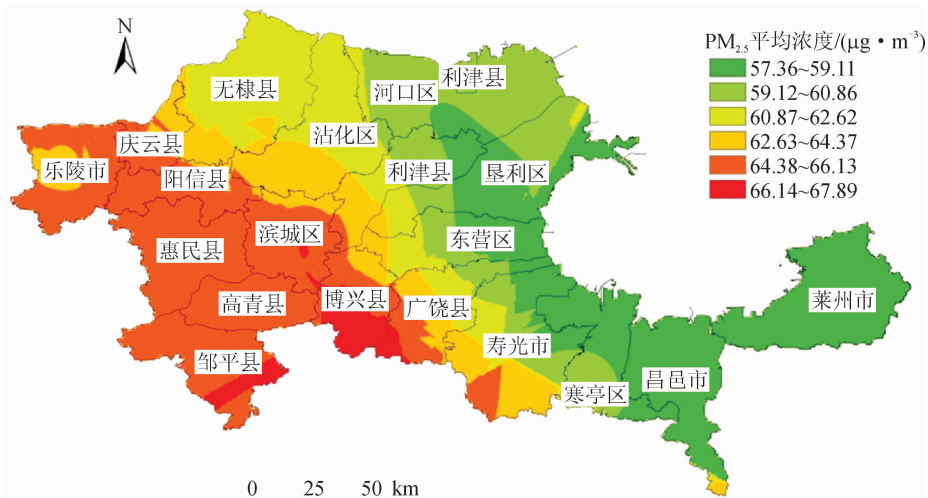


图 2 2017 年黄河三角洲 PM_{2.5} 空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of PM_{2.5} in the Yellow River Delta in 2017

从黄河三角洲 PM_{2.5} 浓度空间插值图(图 2)可以看出,各区域的污染情况都不尽相同,有高有低,连片分布,表现出明显的地方特征,而 PM_{2.5} 浓度总体分布格局呈现出西南高东北低的趋势。这主要是因为不同地区经济发展进度不同,污染源、人类活动强度以及气象条件各种因素造成区域差异。周敏丹等^[25]在探究广州市大气 PM_{2.5} 浓度的驱动因素时发现以公交车辆数、电力消费量、工业总产值为主的人为因素对 PM_{2.5} 变化的影响较为显著。周曙东等^[26]

式中: r_{xy} 为 x 与 y 之间的相关系数; i 表示日期; x_i 表示 PM_{2.5} 浓度值; y_i 表示第 i 日的各气象因子; \bar{x} 为日 PM_{2.5} 浓度平均值; \bar{y} 为气象因子的平均值。 $r_{xy} > 0$ 表示正相关, $r_{xy} < 0$ 表示负相关,相关系数越大,说明 PM_{2.5} 浓度与气象因子之间的相关性越强。

为了较好地表征黄河三角洲 PM_{2.5} 浓度与气象因子之间的相关性,运用统计产品 SPSS 25 着重对滨州市三个站点(北中新校、第二水厂、沾化体育中心)的逐时 PM_{2.5} 浓度与对应站点的日均温度(°C)、湿度(%)、风速(风级)等几种气象因子进行相关和回归分析。

2 PM_{2.5} 浓度时空变化特征

2.1 整体空间分布特征

将这些站点的 PM_{2.5} 年均浓度取平均值得出整体黄河三角洲的平均浓度为 $63.16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这一数值已经严重超过 WHO 规定的 PM_{2.5} 浓度年平均值。运用 ArcGIS,选用 Kriging 插值,对黄河三角洲 2017 年各个站点的 PM_{2.5} 年均浓度数据进行内插^[24],其浓度分布见图 2。图中颜色越深表示浓度越高,且为相对集中区域。

通过研究京津冀地区 PM_{2.5} 的影响因素发现,工业废气、煤炭的消费量对该地区污染物排放量具有显著影响。相关研究^[27-28]也表明除了复杂的自然气象因素外,人为因素对污染物浓度升高也有一定的影响。黄三角西部地区人口和建筑物比较密集,相应的交通运输以及能源的消费量、工农业生产等排放大量的人为气溶胶,从而导致 PM_{2.5} 污染物浓度比较高,而东部沿海地区相对西部内陆来说,风速较大,利于污染物的稀释和扩散^[29],故应该将西南部

以及西部地区作为治理工作的重中之重。

2.2 季节变化

同样,利用 ArcGIS 软件中的 Kriging 空间插值,对黄河三角洲春(3月1日—5月31日)、夏(6月1日—8月31日)、秋(9月1日—11月31日)、冬(12月1日—2月28日)四季的各个站点 PM_{2.5} 浓度数据进行插值,其浓度分布见图 3~图 6。

通过对比分析四季的空间分布来看,其浓度高低都表现为明显的片状分布,而春、夏和秋季的污染状况明显好于冬季,冬季是四季当中 PM_{2.5} 浓度最高的时期,最高浓度高达 $100.89 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。春季浓

度较高的区域范围包括以滨城区为圆心,呈圆弧状向四周扩散的周围区域,主要是滨州市污染最为严重,其次是德州市的浓度次高,主要以乐陵市为主,而低值区域为黄三角的东南地区。夏季浓度高值区域位于西南地区的邹平县,往北浓度依次降低,而低值区域为东部及东南地区。秋季地区的浓度高值位于邹平县、高青县以及博兴县附近,东北地区为浓度中值区域,低值区域依然位于东方向。冬季浓度值从西南方向东北方向逐渐递减,低值区域不再位于东南方向,而是位于以河口县、利津县、无棣县、沾化区、垦利区以及东营区为主的东北方向。

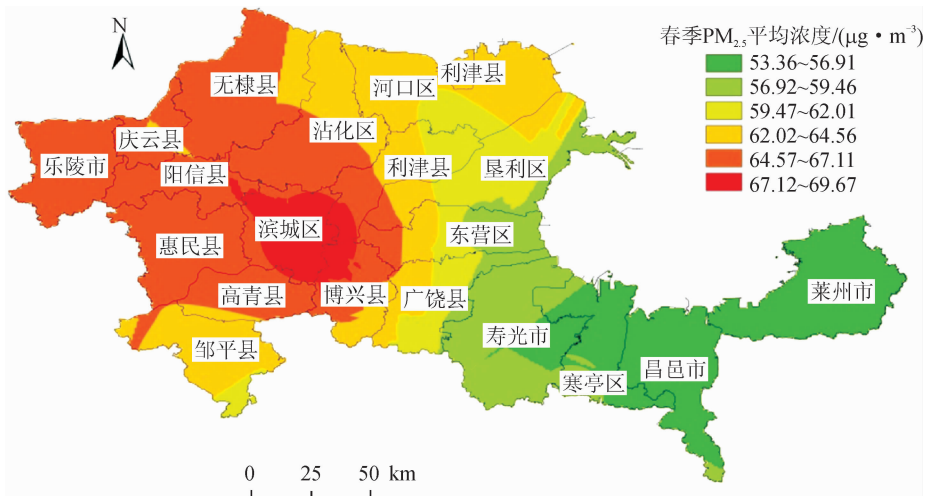


图 3 春季 PM_{2.5}空间分布图

Fig. 3 Spring PM_{2.5} spatial distribution map

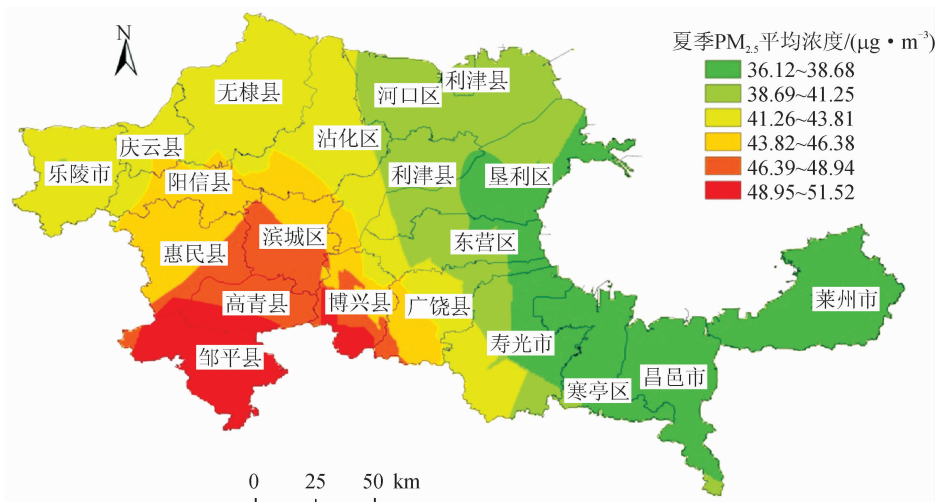


图 4 夏季 PM_{2.5}空间分布图

Fig. 4 Summer PM_{2.5} spatial distribution map

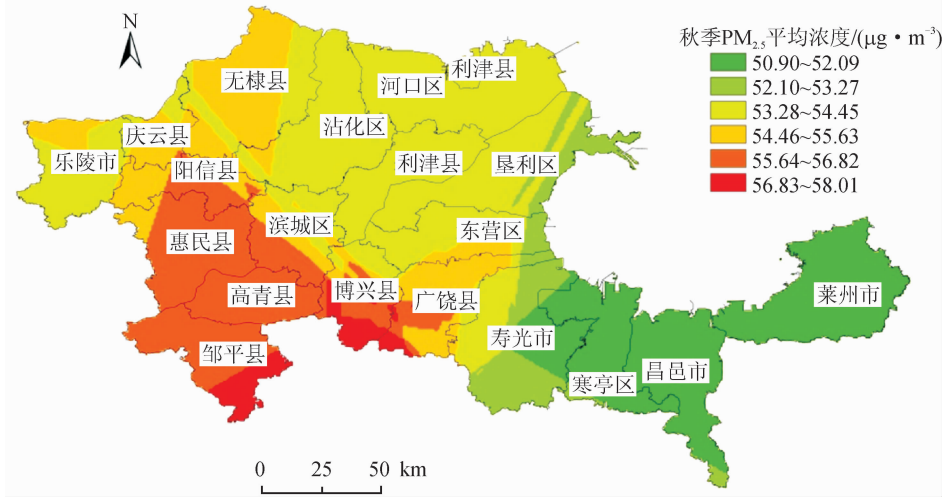


图 5 秋季 PM_{2.5}空间分布图

Fig. 5 Autumn PM_{2.5} spatial distribution map

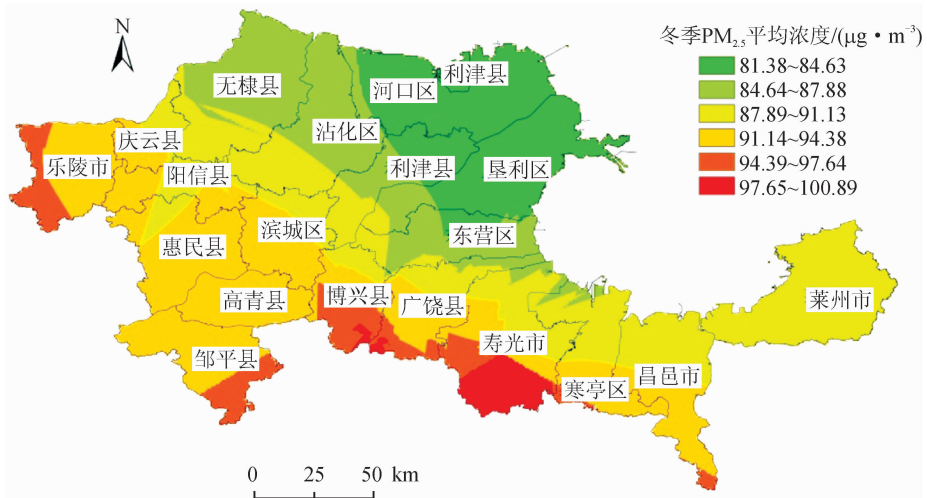


图 6 冬季 PM_{2.5}空间分布图

Fig. 6 Winter PM_{2.5} spatial distribution map

不同季节的 PM_{2.5} 浓度值见表 1。由表 1 可知, PM_{2.5} 浓度受季节影响比较显著, 相对来说, 春、冬季的 PM_{2.5} 浓度高于夏、秋季节, 然而冬天是污染最严重浓度最高的季节, 其浓度可高达 94.32 μg·m⁻³。这是由于秋冬季属于采暖期, 又恰逢春节期间, 大量的煤炭和爆竹会产生大量的污染物, 使得 PM_{2.5} 浓度较高。

表 1 PM_{2.5} 浓度季节变化

Tab. 1 Seasonal variation of PM_{2.5} concentration

季节	PM _{2.5} 浓度/(μg·m ⁻³)
春季	61.46
夏季	42.81
秋季	54.05
冬季	94.32

2.3 月变化

图 7 为 2017 年黄河三角洲 PM_{2.5} 浓度的月变

化趋势。由图 7 可看出: 与前边季节性变化相对应, 不同月份 PM_{2.5} 浓度不同, 其中 1 月为浓度最高月份, 达到一年中最大值 114.66 μg·m⁻³, 1 月之后浓度开始急剧下降, 随后降幅逐渐减缓, 在 8 月达到最低值即谷值, 为 34.18 μg·m⁻³, 随后在 9 月份开始呈上升趋势。

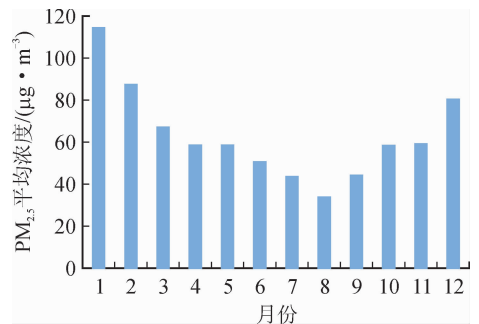


图 7 2017 年 PM_{2.5} 月平均浓度

Fig. 7 Average PM_{2.5} concentration in 2017

2.4 日变化

冬季辐射强度弱和日照时间短,易形成稳定逆温层,不利于污染物的扩散和稀释,且1月1日—7日是全年污染物浓度较高、持续时间较长时期^[30],故选取滨州市和东营市2017年1月1日至1月7日的平均逐时浓度数据,来清晰地分析反映PM_{2.5}浓度一天中随时间的变化规律即逐时变化规律。

由图8可知PM_{2.5}浓度变化范围较大,尽管不同地区的监测浓度有差异,但他们却呈现出相似的变化趋势。

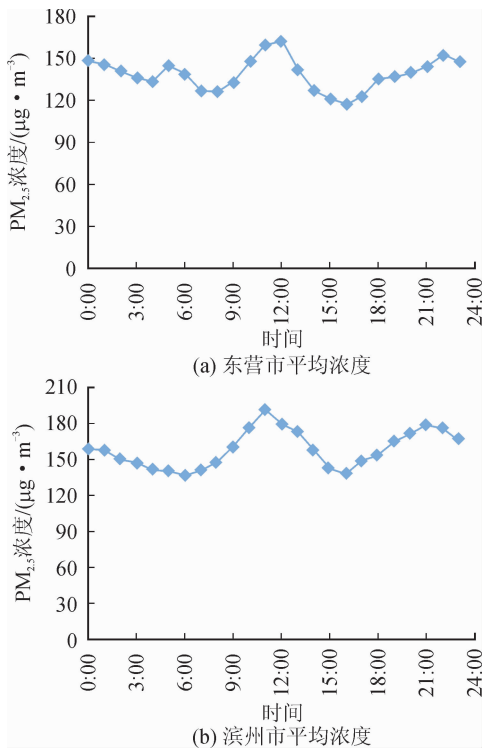


图8 PM_{2.5}浓度日变化

Fig. 8 Daily variation of PM_{2.5} concentration

东营市一天中的PM_{2.5}浓度在中午12:00出现峰值,呈现中午和夜间高,上午和下午低的趋势,其中从凌晨开始除了凌晨5:00浓度上升外,PM_{2.5}浓度开始逐步降低,于上午8:00降低至125.86 µg·m⁻³;8:00后浓度逐渐升高,并又在13:00至16:00出现减小降低的走势,从而到达一整天中的最低值117.43 µg·m⁻³;17:00至22:00浓度显著升高,并在22:00达到最高值152.43 µg·m⁻³。滨州市则是在中午11:00时,PM_{2.5}浓度达到最高值即峰值,表现出中午和晚上浓度高,早上和下午浓度低的趋势,其中从凌晨开始PM_{2.5}浓度逐步降低,于凌晨6:00降低至最低值135.71 µg·m⁻³,6:00后浓度

逐渐升高,并又在12:00至16:00出现降低的趋势;17:00至22:00浓度显著升高^[31]。

这与人类活动有关,黎明人类活动开始逐渐增加,上下班高峰期导致污染物排放量增加,这是导致空气中PM_{2.5}浓度较高的原因之一。另外,夜间和早晨易形成逆温层,导致空气无法对流,从而使得污染物难以扩散,故PM_{2.5}浓度普遍较高。而入夜后,各种污染物停止排放,将会直接导致PM_{2.5}浓度持续降低^[32],同时随着太阳升高,午后的气温状况不容易形成逆温层,污染物得以扩散,从而出现PM_{2.5}低值现象。

3 气象因子对PM_{2.5}浓度的影响

3.1 多因子相关性分析

气象对空气污染的扩散和稀释作用非常复杂,在不同的气候背景和不同年份,不同的气象因子对PM_{2.5}浓度的影响是有差异的,有的时候影响是完全相反的,另外在一定条件下会由某些特定因素起主要作用。在本文研究背景下,滨州时浓度变化较为显著,以滨州主要站点(北中新校、第二水厂、沾化体育中心)为例,通过SPSS对PM_{2.5}浓度和温度、湿度以及风速进行Pearson相关性分析,得到表2~表4各相关系数*r*和显著水平。

从相关系数的数值可以看出,各气象因子比如气温、风速和相对湿度等对各监测站点的空气影响大小不同,存在一定的差异性。其中北中新校的PM_{2.5}浓度与温度、湿度、风速的相关系数大小分别为-0.255**,0.121*,0.026,该数据表明PM_{2.5}浓度与温度极显著相关,有明显的相关性,与湿度显著相关且相关性强,而与风速的相关系数相对来说较小,相关性不明显,但仍然对浓度有一定的影响。第二水厂的PM_{2.5}浓度与温度、湿度、风速的相关系数大小分别为-0.283**,0.105*,-0.234**,该数据表明PM_{2.5}浓度与温度、风速极显著相关,相关性很明显且相关性很强,与湿度是呈显著相关。沾化体育中心的PM_{2.5}浓度与温度、湿度、风速的相关系数大小分别为-0.334**,0.084,0.042,该数据说明PM_{2.5}浓度与温度因素极显著相关,与湿度和风速相关不显著。从整体来说温度和湿度与PM_{2.5}浓度的相关性是较显著的,也就是说温度和湿度与各站点空气质量的关系较为密切,而风速影响程度相对来说较低。

表 2 北中新校 PM_{2.5}浓度与各气象因子相关系数Tab. 2 Correlation coefficient between PM_{2.5} concentration and meteorological factors in the new school

参数	类型	温度	湿度	风速	PM _{2.5} 浓度
温度	Pearson 相关性	1	0.299**	-0.302**	-0.255**
	Sig. (双尾)		0.000	0.016	0.000
	个案数	352	352	352	352
湿度	Pearson 相关性	0.299**	1	-0.521**	0.121*
	Sig. (双尾)	0.000		0.000	0.023
	个案数	352	352	352	352
风速	Pearson 相关性	-0.302**	-0.521**	1	0.026
	Sig. (双尾)	0.000	0.000		0.629
	个案数	352	352	352	352
PM _{2.5} 浓度	Pearson 相关性	-0.255**	0.121*	0.026	1
	Sig. (双尾)	0.000	0.023	0.629	
	个案数	352	352	352	352

说明:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 3 第二水厂 PM_{2.5}浓度与各气象因子相关系数Tab. 3 Correlation coefficient between PM_{2.5} concentration and meteorological factors in the second water plant

参数	类型	温度	湿度	风速	PM _{2.5} 浓度
温度	Pearson 相关性	1	0.345**	-0.127*	-0.283**
	Sig. (双尾)		0.000	0.016	0.000
	个案数	359	359	359	359
湿度	Pearson 相关性	0.345**	1	-0.345**	0.105*
	Sig. (双尾)	0.000		0.000	0.048
	个案数	359	359	359	359
风速	Pearson 相关性	-0.127*	-0.345**	1	-0.234**
	Sig. (双尾)	0.016	0.000		0.000
	个案数	359	359	359	359
PM _{2.5} 浓度	Pearson 相关性	-0.283**	0.105*	-0.234**	1
	Sig. (双尾)	0.000	0.048	0.000	
	个案数	359	359	359	359

说明:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 4 沾化体育中心 PM_{2.5}浓度与各气象因子相关系数Tab. 4 Correlation coefficient between PM_{2.5} concentration and meteorological factors in Zhanhua Sports Center

参数	类型	温度	湿度	风速	PM _{2.5} 浓度
温度	Pearson 相关性	1	0.258**	-0.458**	-0.334**
	Sig. (双尾)		0.000	0.000	0.000
	个案数	327	327	327	327
湿度	Pearson 相关性	0.258**	1	-0.474**	0.084
	Sig. (双尾)	0.000		0.000	0.130
	个案数	327	327	327	327
风速	Pearson 相关性	-0.458**	-0.474**	1	0.042
	Sig. (双尾)	0.000	0.000		0.453
	个案数	327	327	327	327
PM _{2.5} 浓度	Pearson 相关性	-0.334**	0.084	0.042	1
	Sig. (双尾)	0.000	0.130	0.453	
	个案数	327	327	327	327

说明:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

3.2 气温的影响

在上一部分研究了 PM_{2.5} 浓度与各种气象因子的相关性之后,再对各因子进行回归分析,得到各因子与浓度之间的线性方程以及预测线,从而进一步研究其相关程度。图 9 所示为滨州站点(北中新校、第二水厂、沾化体育中心)的 PM_{2.5} 逐月平均浓度与温度月均值的相关关系。

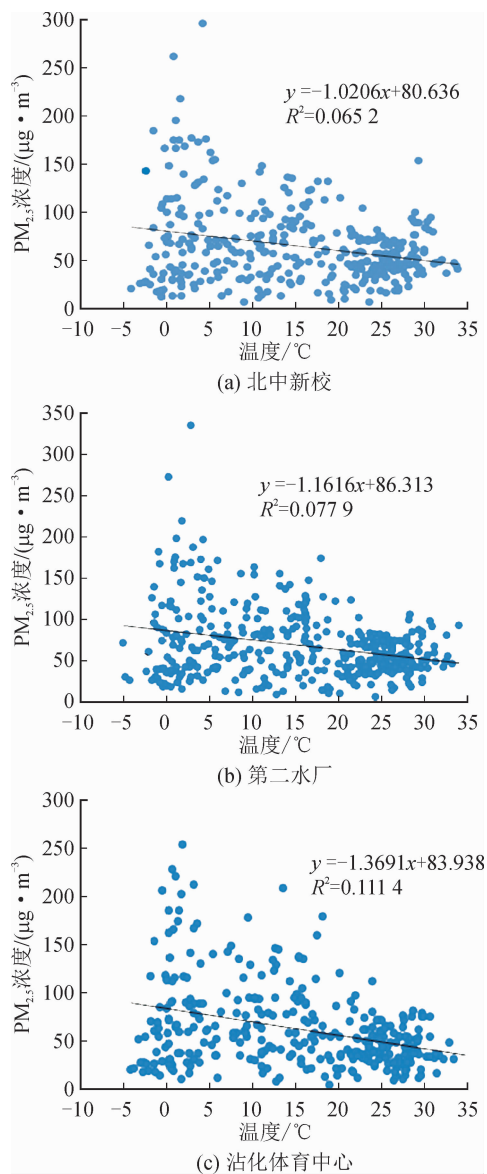


图 9 黄河三角洲 PM_{2.5} 月均浓度随月均温度的变化
 Fig. 9 Changes of monthly mean concentration of PM_{2.5} in the Yellow River Delta with monthly mean temperature

综合各站点的线性回归分析结果表明,温度和 PM_{2.5} 浓度之间呈现负相关性 ($R = -0.255, R = -0.279, R = -0.334$)。随着温度升高,PM_{2.5} 浓度明显减小;反之,当温度降低时,PM_{2.5} 浓度又相应地增大。导致这种现象是因为当气温较高时,大气不稳定,在热力对流作用下,从而加速污染物 PM_{2.5} 的

扩散,使得 PM_{2.5} 的浓度降低^[33]。而温度降低出现逆温层时,会阻碍 PM_{2.5} 垂直方向的扩散运动,使得污染物聚集在近地层大气中,从而进一步加剧了空气污染的程度。除此之外,傍晚下班交通高峰期会产生许多污染物,因此 PM_{2.5} 浓度升高。

3.3 湿度的影响

由图 10 各站点变化图可知,当 PM_{2.5} 浓度为最高时,其对应的相对湿度也会处于一个较高值。当 PM_{2.5} 浓度为最低浓度时,其对应的湿度也处于一个较低值。可见,黄河三角洲的湿度与 PM_{2.5} 浓度呈正相关关系 ($R = 0.133, R = 0.089, R = 0.098$),当相对湿度越高时,PM_{2.5} 浓度也就越高。当湿度变大时,PM_{2.5} 吸湿膨胀,从而使得细颗粒物数量变多,进而 PM_{2.5} 浓度升高。

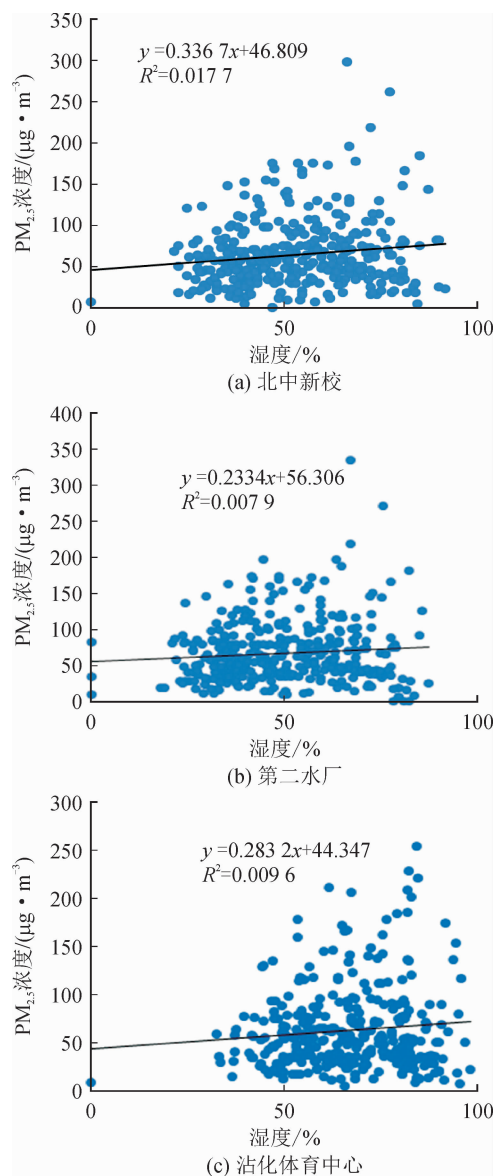


图 10 黄河三角洲 PM_{2.5} 月均浓度随月均湿度的变化
 Fig. 10 Changes of monthly mean concentration of PM_{2.5} in the Yellow River Delta with monthly mean humidity

3.4 风速的影响

研究表明,风对污染物的运输和扩散起着极其重要的作用。风速对 $PM_{2.5}$ 浓度具有双重影响,在一定的风级大小范围内,风速越大越有利于污染物浓度的降低^[33]。由图 11 可知,滨州市的风力临界值大约为 2 级,即风力小于 2 级时,污染物浓度变化不明显,有随着风速变大而浓度升高的趋势。这是由于风速较小特别是静风时,空气流动较缓慢,不利于高污染区域与低污染区域的颗粒物传输,污染物水平方向扩散较弱^[34],使得颗粒物在近地面处堆积,浓度升高。当风力大于 2 级时,风速越大,其对应的 $PM_{2.5}$ 浓度表现出减少的趋势,二者呈现出负相关。这是因为风速变大,大气层结构就会变得相对来说不够稳定,使得湍流作用变强,从而越有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散和运输。

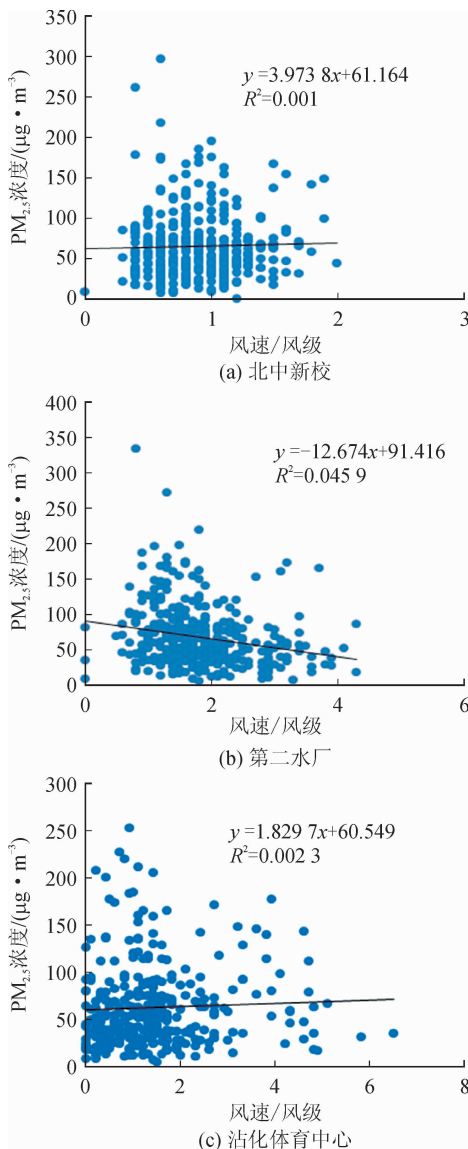


图 11 黄河三角洲 $PM_{2.5}$ 月均浓度随月均风速的变化
Fig. 11 Changes of monthly mean concentration of $PM_{2.5}$ in the Yellow River Delta with monthly mean wind speed

4 结论与讨论

1) 2017 年黄河三角洲 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 $63.16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,与 WHO 空气质量规范还有一定的差距。从插值图中可以看出,黄河三角洲的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布差异非常明显,污染物浓度总体趋势是西南地区高于东北地区。为此,应区分不同区域,对污染物进行特殊管理,提前采取相应的措施来减少其污染物的排放。

2) 从整体来看, $PM_{2.5}$ 浓度表现出明显的季节性变化特征,其中秋、冬季 $PM_{2.5}$ 浓度较高,而相对来说春、夏季浓度较低。从不同的月份来看,黄河三角洲 $PM_{2.5}$ 的浓度在 1 月最高,高达 $114.66 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在 8 月最低,低至 $34.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这与冬季燃烧大量煤炭,排放污染物有关系。因而更应该加大对冬季大气污染物的治理,加大低碳清洁力度,要大力发展清洁能源逐步替代传统的煤炭能源,协同控制温室气体排放,执行大气污染物特别排放限值,实行冬季清洁取暖,继续严格执行春节期间收紧烟花爆竹燃放政策。

3) 冬季东营市和滨州市的 $PM_{2.5}$ 质量浓度都表现出明显的双峰双谷型,平均最大值位于 12:00 和 22:00 这两个时间点。总之, $PM_{2.5}$ 浓度从黎明开始上升,在下午时间段达到浓度最小值,呈现出明显的夜间高于日间的污染现象。

4) $PM_{2.5}$ 浓度与气象因子之间有相关性,受气象因素影响比较大,温度降低和相对湿度增加都会导致 $PM_{2.5}$ 浓度增大,而风速对 $PM_{2.5}$ 浓度具有双重影响,超过一定范围,增大风速将使空气中的颗粒物浓度减少。

目前中国大气环境面临的形势非常严峻,大气污染是中国第一大环境污染问题。2018 年党中央印发《关于全面加强生态环境保护,坚决打好污染防治攻坚战的意见》。为准确掌握 $PM_{2.5}$ 的时间空间分布形态及关联因子,本文通过利用 2017 年整年的多监测站点监测的时均数据,分析黄河三角洲 $PM_{2.5}$ 浓度的污染水平,并研究其时空分布特征,以及受温度、湿度、风速等气象因子的变化发展规律,在一定程度上可以提供准确、及时的信息,为空气预测提供重要的参考价值,从而改善空气质量,减少污染物的排放。然而,本文未能对连续多年的时空演化特征进行深入研究,缺乏 $PM_{2.5}$ 与其他大气污染物等影响因子的综合解析,这将是下一步研究的主要攻克方向。

参考文献:

- [1] 韩士杰,王佳,燕启社,等. 2014~2016年间郑州市控制 PM₁₀和 PM_{2.5}污染的健康效益评估[J]. 环境科学, 2019,40(6):2565-2571.
HAN Shijie, WANG Jia, YAN Qishe, et al. Health benefit evaluation for PM₁₀ and PM_{2.5} pollution control in Zhengzhou, China, 2014-2016 [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2565-2571.
- [2] 伍鹏程. 临沂市主要大气污染物人群健康效应研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2018.
WU Pengcheng. Study on population health effects of major air pollutants in Linyi City[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2018.
- [3] 李琳. 辽宁地区不同等级霾天气时空分布特征及成因分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
LI Lin. Spatial-temporal distribution characteristics and cause analysis of haze in different grades in Liaoning[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2018.
- [4] 刘莹. 徐州市点源大气污染物排放清单研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
LIU Ying. Study on emission inventory of point source air pollutants in Xuzhou[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [5] CHOW J C. Welcome to a special issue on PM_{2.5}: a fine particle standard[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1999, 49(9):2-2.
- [6] CHOW J C, BACHMANN J D, WIERMAN S S G, et al. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(9): 973-999.
- [7] 郭安可,郭照冰,张海潇,等. 南京北郊冬季 PM_{2.5}中水溶性离子以及碳质组分特征分析[J]. 环境化学,2017, 36(2):248-256.
GUO Anke, GUO Zhaobing, ZHANG Haixiao, et al. Analysis of water soluble ions and carbon component in PM_{2.5} in the northern suburb of Nanjing in winter[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 248-256.
- [8] 马笑,王丽涛,马思萌,等. 邯郸市 PM_{2.5}成分的时空分布特征及来源[J]. 环境化学,2017,36(9):1932-1940.
MA Xiao, WANG Litao, MA Simeng, et al. Spatial and temporal distribution and source analysis of components in PM_{2.5}, Handan[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(9): 1932-1940.
- [9] 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,等. 常州市大气 PM_{2.5}中 PAHs污染特征及来源解析[J]. 环境科学,2017, 38(8):3110-3119.
GU Aijun, LIU Jiashu, LUO Shipeng, et al. Pollution characteristics and source identification of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Changzhou City[J]. Environmental science, 2017, 38(08): 3110-3119.
- [10] JANSEN R C, SHI Yang, CHEN Jianmin, et al. Using hourly measurements to explore the role of secondary inorganic aerosol in PM_{2.5} during haze and fog in Hangzhou, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(6): 1427-1434.
- [11] HU Maogui, JIA Lin, WANG Jinfeng, et al. Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Beijing, China using the empirical mode decomposition method[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 70-80.
- [12] 李文杰,张时煌,高庆先,等. 京津石三市空气污染指数(APD)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J]. 资源科学,2012,34(8):1392-1400.
LI Wenjie, ZHANG Shihuang, GAO Qingxian, et al. Relationship between temporal-spatial distribution pattern of air pollution index and meteorological elements in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang[J]. Resource science, 2012, 34(8): 1392-1400.
- [13] 于彩霞,邓学良,石春娥,等. 降水和风对大气 PM_{2.5}、PM₁₀的清除作用分析[J]. 环境科学学报,2018, 38(12):4620-4629.
YU Caixia, DENG Xueliang, SHI Chune, et al. The scavenging effect of precipitation and wind on PM_{2.5} and PM₁₀[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(12): 4620-4629.
- [14] VAN DONKELAAR A, MARTIN R V, BRAUER M, et al. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(6):847-855.
- [15] 郭家瑜,张英杰,郑海涛,等. 北京 2015年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J]. 环境科学学报, 2017,37(7):2409-2419.
GUO Jiayu, ZHANG Yingjie, ZHENG Haitao, et al. Characteristics of spatial distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2409-2419.
- [16] 肖建能,杜国明,施益强,等. 厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析[J]. 环境科学学报, 2016,36(9):3363-3371.
XIAO Jianneng, DU Guoming, SHI Yiqiang, et al. Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Xiamen City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(9): 3363-3371.
- [17] LIU Yang, PACIOREK C J, KOUTRAKIS P. Estimating regional spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data, meteorology, and land use information [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(6): 886-892.
- [18] 姜磊,周海峰,赖志柱,等. 中国城市 PM_{2.5}时空动态变化特征分析:2015—2017年[J]. 环境科学学报,2018, 38(10):3816-3825.
JIANG Lei, ZHOU Haifeng, LAI Zhizhu, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic of PM_{2.5} concentrations of Chinese cities; 2015-2017[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10): 3816-3825.
- [19] 王振波,方创琳,许光,等. 2014年中国城市 PM_{2.5}浓度的时空变化规律[J]. 地理学报,2015, 70(11):

- 1720-1734.
- WANG Zhenbo, FANG Chuanglin, XU Guang, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014[J]. *Acta-Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [20] 程念亮, 李云婷, 邱启鸿, 等. 2013年北京市PM_{2.5}重污染日时空分布特征研究[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(3): 38-42.
- CHENG Nianliang, LI Yunting, QIU Qihong, et al. Analysis on spatial and temporal distribution of PM_{2.5} during heavy pollution days in Beijing in 2013[J]. *China Environmental Monitoring*, 2015, 31(3): 38-42.
- [21] 张晓郁, 晏淑梅, 田茜. 基于GIS的唐山地区大气污染物时空分布研究[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(3): 49-55.
- ZHANG Xiaoyu, YAN Shumei, TIAN Qian. Research on the temporal and spatial distribution of air pollutants in Tangshan based on GIS[J]. *China Environmental Monitoring*, 2017, 33(3): 49-55.
- [22] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2154-2163.
- ZHAO Wenhui, GONG Huili, ZHAO Wenji, et al. Spatial and temporal variation of Beijing inhalable particulate matter and its meteorological factors based on geostatistical analysis[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2154-2163.
- [23] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [25] 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气PM_{2.5}浓度驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 271-279.
- ZHOU Mindan, KUANG Yaoqiu, YUN Guoliang. Analysis of driving factors of atmospheric PM_{2.5} concentration in Guangzhou City based on geo-detector[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 271-279.
- [26] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀PM_{2.5}的主要影响因素及内在关系研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(4): 102-109.
- ZHOU Shudong, OUYANG Weiqing, GE Jihong. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(4): 102-109.
- [27] 李慧, 张敬巧, 王涵, 等. 银川市冬季PM_{2.5}重污染特征、来源与成因分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 289-295.
- LI Hui, ZHANG Jingqiao, WANG Han, et al. Pollution characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Yinchuan City during winter[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 289-295.
- [28] 薛国艳, 王格慧, 吴灿, 等. 长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 554-563.
- XUE Guoyan, WANG Gehui, WU Can, et al. Pollution characteristics and source apportionment of n-alkanes and PAHs in summertime PM_{2.5} at background site of Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 554-563.
- [29] 赵佳楠, 徐建华, 卢德彬, 等. 基于RF-LUR模型的PM_{2.5}空间分布模拟——以长江三角洲地区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(1): 18-23.
- ZHAO Jianan, XU Jianhua, LU Debin, et al. The Spatial distribution simulation of PM_{2.5} concentration based on RF-LUR model: a case study of Yangtze River Delta[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(1): 18-23.
- [30] 胡森林, 刘红年. 合肥市PM_{2.5}对城市辐射和气温的影响[J]. *气象科学*, 2017, 37(1): 78-85.
- HU Senlin, LIU Hongnian. Effects of PM_{2.5} on the urban radiation and air temperature in Hefei[J]. *Journal of The Meteorological Sciences*, 2017, 37(1): 78-85.
- [31] 陈波, 李少宁, 鲁绍伟, 等. 北京大兴南海子公园PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度变化特征[J]. *生态科学*, 2016, 35(2): 104-110.
- CHEN Bo, LI Shaoning, LU Shaowei, et al. Characteristics of mass concentration variations of PM₁₀ and PM_{2.5} in Nanhaizi Park of Daxing in Beijing[J]. *Ecology Science*, 2016, 35(2): 104-110.
- [32] 张朝能, 王梦华, 胡振丹, 等. 昆明市PM_{2.5}浓度时空变化特征及其与气象条件的关系[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(1): 90-98.
- ZHANG Chaoneng, WANG Menghua, HU Zhendan, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration and the correlation of PM_{2.5} and meteorological factors in Kunming City[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2016, 38(1): 90-98.
- [33] 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 191-199.
- ZHOU Zhaoyuan, ZHANG Shihuang, GAO Qingxian, et al. The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and trend analysis[J]. *Resource Science*, 2014, 36(1): 191-199.
- [34] 项佳娥, 徐丽华, 张方方, 等. 杭州城区PM_{2.5}和PM₁₀污染特征及其影响因子分析[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(6): 36-42.
- XIANG Jiae, XU Lihua, ZANG Fangfang, et al. Study on the pollution characters and impact factors of PM_{2.5} and PM₁₀ in Urban Hangzhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(6): 36-42.