



移动扫码阅读

薛艳,彭章娥,刘琳. 沿海典型城市大气污染物分布特征和影响因素分析[J].能源环境保护,2021,35(5): 94-101.

XUE Yan, PENG Zhang'e, LIU Lin. Analysis of distribution characteristics and influencing factors of air pollutants in typical coastal cities[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 94-101.

沿海典型城市大气污染物分布特征 和影响因素分析

薛 艳, 彭章娥*, 刘 琳

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要:基于2016~2020年来中国环境监测总站发布的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 浓度监测数据,选取了4个经济较为活跃的典型沿海城市(天津、青岛、上海、宁波),从地理位置、气候、产业结构、交通运输、GDP等方面进行了分析。结果表明,区域地理位置和气候对大气污染物的浓度分布存在影响。北方两城冬季 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 浓度均高于南方两城,其中2020最高均值分别为南方的2倍、1.8倍和1.4倍。青岛冬季的 PM_{10} 浓度均值最高,但在夏季远低于天津,与浓度最低的宁波相近。交通运输、温度、降水量均对大气污染物浓度分布存在不同程度的影响。受疫情影响,上海2020年运力与2019年运力差异显著,由此导致上海2020年冬季 NO_2 浓度波幅为2019年冬季的1.5倍。降水量对季节性干旱城市的影响大于常年湿润的城市,降水量对北方两市影响呈负相关,对南方两市呈弱相关。以单位GDP为比对基准值,各污染物浓度比对值最小的城市为上海。以上海为基准,北方城市的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 浓度比对值的最大值分别为上海的4.16、4.61、3.82、2.91倍。

关键词:大气污染物;分布特征;相关性;影响因素

中图分类号:X820.1

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)05-0094-08

Analysis of distribution characteristics and influencing factors of air pollutants in typical coastal cities

XUE Yan, PENG Zhang'e*, LIU Lin

(School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Based on the monitoring data of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , and NO_2 concentrations released by the China National Environmental Monitoring Station from 2016 to 2020, four typical coastal cities with active economy (Tianjin, Qingdao, Shanghai and Ningbo) were selected for analysis from the aspects of geographical location, climate, industrial structure, transportation and GDP. The results showed that regional geographic location and climate had an impact on the concentration distribution of atmospheric pollutants. The concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} and SO_2 in winter in the northern two cities were higher than those in the southern two cities. The highest average values in 2020 in the northern two cities were 2 times, 1.8 times and 1.4 times as much as those of the southern cities, respectively. The average PM_{10} concentration in Qingdao in winter was the highest among the four cities, but in summer it was much lower than that in Tianjin and was similar to Ningbo, which had the lowest concentration. Transportation, temperature, and precipitation had different impacts on the concentrations of air pollutants.

收稿日期:2021-06-27;责任编辑:金丽丽

基金项目:上海应用技术大学基金项目(J2019-135)

第一作者简介:薛艳(1999-),女,贵州省毕节人,助研,主要研究方向为空气质量影响因素分析与模拟。E-mail:yanxue0428@163.com

通讯作者简介:彭章娥(1970-),女,湖北省宜昌人,副教授,主要研究方向为环境安全与污染控制。E-mail:zhepeng@sit.edu.cn

Affected by the epidemic, there was a significant difference between the transportation capacity of Shanghai in 2020 and 2019. As a result, in Shanghai, the fluctuation amplitude of the NO_2 concentration in the winter of 2020 is 1.5 times as much as that in the winter of 2019. The impact of precipitation on seasonally arid cities was greater than that on humid cities. The impact of precipitation on the northern two cities was negatively correlated, and the impact on the southern two cities was weakly correlated. Taking the unit GDP as the comparison benchmark value, Shanghai has the smallest comparison value of each pollutant concentration. Taking Shanghai as the benchmark value, the maximum comparison values of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , and NO_2 concentrations in northern cities were 4.16, 4.61, 3.82 and 2.91, respectively.

Key Words: Air pollutants; Distribution characteristics; Correlation; Influencing factors

0 引言

近二十年来,随着城市化建设加快和经济社会的快速发展,大气污染已成为我国最主要的环境问题之一。国内外学者针对大气污染物的危害、产生和分布开展了大量的研究工作。已有研究表明,严重的空气污染不仅影响大气能见度,并且会对人体健康造成严重威胁,如由空气污染引发呼吸系统相关疾病、心脑血管疾病、心肺疾病、肺癌等^[1-4]。诸多学者从不同角度研究了大气污染物的分布特征和影响因素,力求寻找有效、可行的治理方向和路径。相关研究表明冬季主要大气污染物是 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} ,气象条件会对大气污染物浓度分布具有一定的影响^[5-6]。诸多学者也对空气污染物的时空分布特征进行了分析,结果显示污染区域基本呈集中连片分布的态势^[7]。中国北方地区大气污染状况比南方地区严重^[8]。也有许多学者对区域大气进行了研究,结果显示燃煤、农作物秸秆焚烧和扬尘排放等人为因素会加剧大气污染^[9],人为污染为大气污染的主要污染源^[10]。区域间的大气污染物传输对当地污染物浓度影响显著^[11-12]。地形对污染物存在一定影响,地形起伏度有利于气流的扩散从而降低污染物浓度^[13]。研究表明,东部沿海地区空间变异性程度均属于中等水平,污染物浓度的高值区域主要分布在地表高程较低的地区^[14-15]。由于大气污染的形成和变化复杂,进一步了解区域空气污染特征和差异,以及引起差异的关键因素及其影响机制还有待进一步研究和分析。

通过对 2016~2020 年天津、青岛、上海、宁波四个经济活跃的典型沿海城市大气中的主要污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2)浓度分布进行分析与对比,研究了沿海典型城市大气污染特点。由于大气污染的程度与城市的地理位置、气候、经济发展

等因素相关联,本研究也选取了该四个沿海城市近五年的城市数据进行了影响因素和相关性分析,以期对沿海城市大气污染防控提供对策建议参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用空气质量数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)发布的天津、青岛、上海、宁波四市 2016 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日环境空气质量评价城市点的逐时监测数据。各种污染物的监测方法依据生态环境部相关标准与规范^[16]。经济、气候数据来源于国家统计局、各市统计局、各市统计年鉴^[17-32]。

1.2 研究方法

本研究采用 Mann-Kendall 检验法^[33]对四个典型城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 月均浓度,月均温度、降水量、日照时长等进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 典型城市四种大气污染物地理分布比较

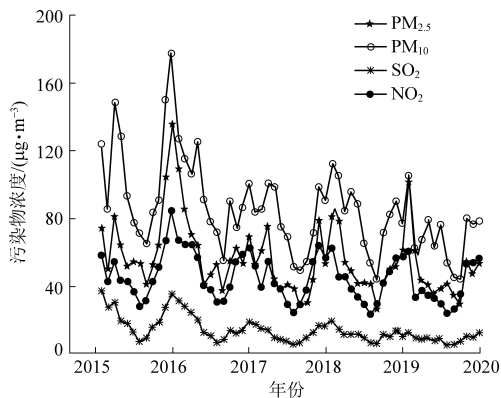
为了解四城市各个季节四种大气污染物的地理季节分布特征,本研究将四城市 2016~2020 年大气污染物的逐月变化趋势进行了比较,结果如图 1 所示。

四城市均呈现出污染物浓度冬季最高、夏季最低的特点,与我国其他地区大气污染物浓度变化规律一致,但是天津与青岛两市污染物浓度值以及随季节变化的波动幅度均高于上海与宁波。由于天津与青岛同属北方城市,冬季采暖需求大,使得污染物冬季浓度较高,污染物浓度整体呈现明显的“冬高夏低”的趋势。相关研究表明能源消耗对环境污染的影响为正^[34],能源消耗大,污染

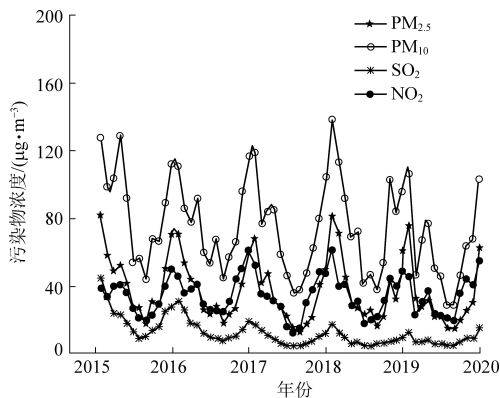
排放强度增大。

除各城市自身污染源排放强度的差异外,地理位置对大气污染物浓度分布也存在较大的影响。以青岛为例,青岛属于北方城市,冬季污染物浓度与同为北方城市的天津相近,夏季时却远低于天津,与浓度最低的宁波相近,如此显著差异可能与地理位置,沿海气候因素的影响有关。青岛地处山东半岛东南沿海,近乎被海包围,是四个城市中唯一具有海洋性气候的城市。海洋性气候具

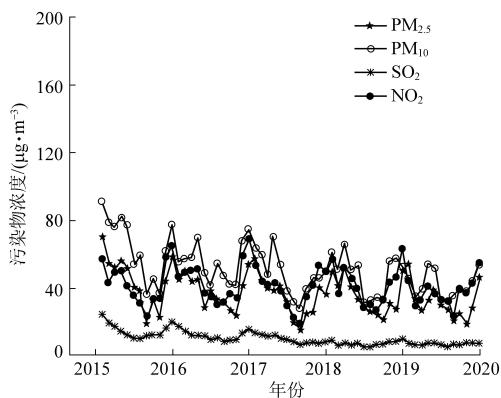
有受大陆影响小、受海洋影响大、降水日数多、云雾频数多、湿度高等特点。相关研究表明,冬季采暖为青岛大气污染物的主要来源^[35],因此冬季青岛污染物浓度高,其夏季受东南季风、海流、水团的影响,空气湿度大,对大气污染物沉降效果比冬季大,且夏季污染排放强度低,因此其夏季污染减轻幅度大。而其余三市除本身排放源差异外,夏季受海洋影响强度小于青岛,因而其余三市冬夏两季的差异总体低于青岛冬夏两季的差异。



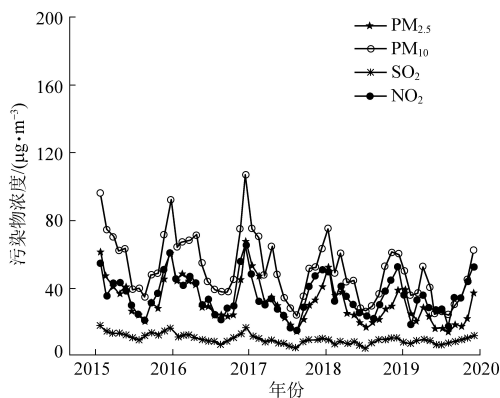
(a) 天津2016~2020年大气污染物趋势图



(b) 青岛2016~2020年大气污染物趋势图



(c) 上海2016~2020年大气污染物趋势图



(d) 宁波2016~2020年大气污染物趋势图

图1 四城市2016~2020年度大气污染物浓度变化趋势图

Fig.1 2016~2020 trend of air pollutants concentrations in the four cities

2.2 典型城市四种大气污染物各季度浓度波动区间比较

为了解四城市各个季节四种大气污染物的分布规律以及与产业结构的关联,本研究将2019~2020年内各季节月均值和变化区间作了比较。数据选取2018年12月至2020年11月,分析结果见表1和表2。为分析产业结构对污染的影响,选取四市部分产业值进行参考分析,结果见表3。

结果显示,北方两城冬季 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 浓度均高于南方两城,其2020高均值城值分别为南方的2倍、1.8倍和1.4倍。在四城市中,青岛 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的浓度波动也最大,青岛冬季的 PM_{10} 浓度均值为四市最高,但在夏季时却远低于天津,与浓度最低的宁

波相近。表明青岛冬季粗颗粒排放强度大、污染重,其来源可能为土壤扬尘、建筑扬尘等。

上海在春季和夏季的 $PM_{2.5}$ 浓度均值高于青岛,可能的原因为上海第二产业的GDP高于青岛。从而导致上海春夏两季 $PM_{2.5}$ 浓度均值高于青岛。

上海春季和夏季 NO_2 浓度均值为四市最高,其结果受多重因素的影响。上海人口为四市最多,相关研究表明人口压力对环境污染的影响为正^[34]。上海交通运输、仓储和邮政业和工业占比相对较高,交通运输、工业排放的 NO_2 较多,从而导致上海 NO_2 浓度相对较高。

四市2020年冬春两季的 NO_2 波动比2019年

表 1 2019 年四城市四种大气污染物浓度区间(均值)
Table 1 Concentration range (average value) of four air pollutants in four cities in 2019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

季节	污染因子	污染物浓度			
		天津	青岛	上海	宁波
冬季	PM _{2.5}	58~81(72.49)	46~80(65.68)	35~57(48.07)	36~53(44.40)
	PM ₁₀	100~110(104.64)	98~138(116.46)	49~61(54.84)	49~75(64.09)
	NO ₂	45~62(54.80)	40~61(48.90)	35~57(48.07)	32~51(44.75)
	SO ₂	14~19(16.40)	12~17(13.62)	6~9(7.76)	6~10(8.43)
春季	PM _{2.5}	41~54(48.26)	27~46(33.97)	33~51(41.05)	24~37(28.82)
	PM ₁₀	85~98(90.50)	69~93(78.17)	50~65(57.23)	44~61(49.94)
	NO ₂	33~45(38.71)	29~41(33.58)	39~52(45.33)	30~41(35.08)
	SO ₂	11~11(11.00)	6~10(7.80)	6~7(6.92)	7~8(8.00)
夏季	PM _{2.5}	27~42(36.57)	14~26(20.94)	23~29(25.74)	16~19(17.88)
	PM ₁₀	43~67(54.56)	34~48(41.41)	31~33(32.23)	26~31(28.42)
	NO ₂	23~29(26.47)	18~20(19.23)	26~29(27.65)	22~26(23.50)
	SO ₂	6~9(7.08)	4~5(4.69)	5~6(5.39)	5~7(6.06)
秋季	PM _{2.5}	39~52(47.49)	22~44(33.00)	22~31(27.11)	22~29(26.00)
	PM ₁₀	62~92(81.37)	55~105(82.09)	33~59(49.71)	37~63(51.28)
	NO ₂	40~57(48.64)	31~46(39.52)	34~47(41.18)	30~46(38.09)
	SO ₂	10~13(11.17)	6~8(7.28)	6~8(7.28)	9~11(9.61)

表 2 2020 年四城市四种大气污染物浓度区间(均值)
Table 2 Concentration range (average value) of four air pollutants in four cities in 2020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

季节	污染因子	污染物浓度			
		天津	青岛	上海	宁波
冬季	PM _{2.5}	61~101(74.70)	33~76(56.80)	33~54(41.68)	24~39(37.32)
	PM ₁₀	62~105(81.26)	47~106(83.35)	35~52(46.74)	36~61(46.20)
	NO ₂	33~60(50.09)	23~49(39.30)	29~63(41.84)	18~53(38.71)
	SO ₂	9~12(10.29)	7~13(9.73)	6~9(7.63)	7~10(7.58)
春季	PM _{2.5}	35~43(39.42)	22~32(27.69)	27~39(32.96)	20~28(23.50)
	PM ₁₀	63~79(68.69)	51~77(65.14)	39~54(47.96)	37~53(43.16)
	NO ₂	32~37(34.41)	24~37(30.34)	33~41(36.34)	28~36(32.57)
	SO ₂	7~9(8.09)	6~8(6.99)	6~7(7.07)	8~9(8.30)
夏季	PM _{2.5}	34~38(37.87)	15~22(17.41)	20~30(25.66)	14~16(15.49)
	PM ₁₀	45~76(58.11)	29~46(35.08)	32~35(32.90)	24~26(25.15)
	NO ₂	23~29(25.73)	20~23(21.14)	23~33(29.57)	17~27(23.08)
	SO ₂	5~8(6.04)	5~6(5.16)	5~6(5.51)	6~7(6.47)
秋季	PM _{2.5}	29~54(43.69)	20~30(24.32)	19~27(23.72)	17~22(18.98)
	PM ₁₀	44~80(66.70)	47~68(58.36)	38~44(49.89)	30~45(36.26)
	NO ₂	35~53(46.61)	36~44(40.09)	37~42(39.67)	34~44(37.17)
	SO ₂	7~10(9.24)	7~9(7.89)	6~7(6.39)	8~10(9.01)

冬春两季 NO₂波动大,尤其以上海与宁波最为显著。可能的原因为 2020 年 2 月突然爆发的新冠疫情,使得 2020 年人口、交通运输的波动大于 2019 年。以上海为例,新冠疫情爆发与社交隔离

之后公路货物运输量与旅客发送量大幅下降,随着新冠疫情的有效管控,公路货物运输量与旅客发送量逐渐上升。2019 年 12 月上海市公路货物运输量为 3 387 万吨,公路旅客发送量为 249 万

人;而 2020 年 2 月公路货物运输量下降至 2 200 万吨,公路旅客发送量急剧下降至 0.30 万人;2020

年 3 月公路货物运输量增至 3 429 万吨,公路旅客发送量上升到 10 万人;到 2020 年 5 月公路货物

表 3 四城市 2020 产业结构

Table 3 Industrial structure of the four cities in 2020

万元

产业	GDP			
	天津	青岛	上海	宁波
第一产业	211.26	425.41	103.57	338.4
第二产业	4 802.55	4 361.56	10 289.47	5 693.9
其中:工业	4 182.87	/	9 656.51	5 045.6
建筑业	718.27	/	719.64	656.3
第三产业	9 027.67	7 613.59	28 307.54	6376.4
其中:交通运输、仓储和邮政业	816.86	/	1 474.82	476.7
批发和零售业	1 253.45	/	4 869.89	1 432.3
金融业	2 056.22	/	7 166.26	994.6

运输量进一步增加到 3 756 万吨,公路旅客发送量继续上升至 82 万人,两季公路货物运输量与旅客发送量波动很大。虽然四市均存在务工返乡、返城、新冠疫情社交隔离等问题,但天津、青岛两市冬季采暖所排放的 NO₂ 会抵消部分务工返乡、返城引起的波动。波动规律表明交通运输对 NO₂ 有较大的影响,且冬春两季交通运输对南方城市的影响作用大于北方城市。

四市 SO₂ 浓度均远低于国家二级标准,表明四市对 SO₂ 污染控制力度大、SO₂ 减排效果显著,且四市 SO₂ 四季波动中,上海全年浓度波动最小。

2.3 以单位 GDP 为基准的典型城市四种大气污染物浓度比较

为了解单位经济产值与大气污染物浓度的关系,本次研究将近年来的污染物浓度以 GDP 为基准进行了比较,结果见表 4。

表 4 2016~2020 四城市四种大气污染物与 GDP 比值

Table 4 The ratio of four air pollutants to GDP in the four cities from 2016 to 2020

10⁻³(μg·m⁻³)/万元

城市	污染因子/GDP	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
天津	PM _{2.5} /GDP	5.98	4.97	3.64	3.65	3.41
	PM ₁₀ /GDP	9.37	7.49	5.77	5.73	4.89
	SO ₂ /GDP	1.84	1.31	0.84	0.78	0.06
	NO ₂ /GDP	4.18	4.04	3.22	3	2.78
青岛	PM _{2.5} /GDP	4.45	3.44	2.76	3.38	2.56
	PM ₁₀ /GDP	8.67	7.01	5.82	6.73	4.93
	SO ₂ /GDP	2.16	1.38	0.74	0.69	0.65
	NO ₂ /GDP	3.33	3.43	2.68	3.03	2.69
上海	PM _{2.5} /GDP	1.49	1.16	0.95	0.93	0.82
	PM ₁₀ /GDP	2.16	1.67	1.33	1.26	1.07
	SO ₂ /GDP	0.49	0.35	0.26	0.18	0.17
	NO ₂ /GDP	1.45	1.34	1.08	1.09	0.96
宁波	PM _{2.5} /GDP	4.43	3.76	2.91	2.39	1.84
	PM ₁₀ /GDP	7.15	6.07	4.64	3.97	3.12
	SO ₂ /GDP	1.49	1.04	0.76	0.65	0.64
	NO ₂ /GDP	4.51	3.9	3.05	2.96	2.59

数据显示,上海的单位 GDP 的各污染物浓度比对值均远小于其余三市,其原因可能是上海本

身 GDP 远高于其余三市,另一方面可能是上海对大气污染的治理措施更加严格,从而使得大气污

染物浓度与 GDP 比值小于其余三市。不同城市之间污染物浓度比对值的差异与产业结构、污染治理等因素密切相关。

除 2019 年青岛的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 比对值外, 四市单位 GDP 的四种大气污染物浓度比对值均逐年减小, 原因主要为四市经济逐年增长和四市对大气污染的治理效果越来越好。

2020 年的结果表明, 单位 GDP 内, $PM_{2.5}$ 比对值从低到高顺序为上海<宁波<青岛<天津。天津 $PM_{2.5}$ /GDP 浓度为上海 $PM_{2.5}$ /GDP 浓度的 4.16 倍。单位 GDP 内, PM_{10} 比对值从低到高顺序为上海<宁波<天津<青岛。青岛 PM_{10} /GDP 浓度为上海 PM_{10} /GDP 浓度的 4.61 倍。单位 GDP 内, SO_2 比对值从低到高顺序为上海<天津<宁波<青岛。青岛 SO_2 /GDP 浓度为上海 SO_2 /GDP 浓度的 3.82 倍。单位 GDP 内, NO_2 比对值从低到高顺序为上海<宁波<青岛<天津。天津 NO_2 /GDP 浓度为上海 NO_2 /GDP 浓度的 2.9 倍。

2.4 大气污染物浓度影响因素分析

本文采用 Mann-Kendall 检验法对四个典型

表 5 四市 2016~2020 大气污染与气象数据相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results of air pollution and meteorological data in four cities from 2016 to 2020

相关系数		$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2
平均温度	天津	-0.505 * *	-0.488 * *	-0.616 * *	-0.686 * *
	青岛	-0.736 * *	-0.672 * *	-0.513 * *	-0.576 * *
	上海	-0.556 * *	-0.454 * *	-0.341 * *	-0.660 * *
	宁波	-0.707 * *	-0.660 * *	-0.408 * *	-0.648 * *
日照时数	天津	-.344 * *	-0.113	-0.166	-0.286 * *
	青岛	-0.339 * *	-0.231 * *	-0.193	-0.237 * *
	上海	-0.232 *	-0.096	-0.087	-0.294 * *
	宁波	-0.355 * *	-0.297 * *	-0.264 *	-0.438 * *
降水量	天津	-0.476 * *	-0.520 * *	-0.540 * *	-0.570 * *
	青岛	-0.498 * *	-0.520 * *	-0.424 * *	-0.511 * *
	上海	-0.283 * *	-0.308 * *	-0.253 *	-0.318 * *
	宁波	-0.366 * *	-0.385 * *	-0.296 * *	-0.296 * *

注: * * 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。n=48

3 结 论

(1) 大气污染物浓度分布总体存在冬季高、夏季低的季节变化特征, 由于北方城市冬季采暖会加剧空气污染, 北方城市冬高夏低的趋势要比南方城市显著。

(2) 除自身污染排放强度的影响外, 地理位置和区域气候对大气污染物浓度分布也有一定影

响。北方两城冬季 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 浓度均高于南方两城, 其 2020 高均值城值分别为南方的 2 倍、1.8 倍和 1.4 倍。青岛冬季的 PM_{10} 浓度均值为四市最高, 但在夏季时却远低于天津, 与浓度最低的宁波相近。与其地处半岛、具有海洋性气候特征有一定关系。

城市的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 月均浓度, 月均温度、日照时数、降水量等进行相关性分析, 结果见表 5。通常按照相关系数区间依次将 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0, 分为无相关、弱相关、相关、强相关和极强相关 5 个区间^[12]。

除上海的 SO_2 与平均温度相关性呈弱相关外, 沿海四市的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 均与平均温度呈负相关, 相关性系数均在 0.4~0.8 范围内相关性较显著, 此结果表明温度升高有利于增强污染物的扩散, 从而有助于 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 浓度降低^[11]。

由于降水对污染物有冲刷和沉降作用, 尤其是在冬季污染相对严重时期, 短时降水能对大气污染起到一定程度的缓解作用^[13]。但降水量对南北四个城市的影响差异明显, 在气候干燥地区降水降低大气污染浓度的作用更为显著。天津气候特点为夏季雨水集中、冬季干燥, 所以降水量对污染物浓度影响明显。而宁波气候特点为终年湿润, 所以降水量对污染物浓度的影响较小。

响。北方两城冬季 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 浓度均高于南方两城, 其 2020 高均值城值分别为南方的 2 倍、1.8 倍和 1.4 倍。青岛冬季的 PM_{10} 浓度均值为四市最高, 但在夏季时却远低于天津, 与浓度最低的宁波相近。与其地处半岛、具有海洋性气候特征有一定关系。

(3) 四市间不同产业结构对污染物的浓度分布也有一定影响。公路交通运输、工业排放对

NO₂分布具有较大影响。受疫情影响,上海 2020 交通与 2019 年交通差异显著,相应的其 2020 年冬季 NO₂浓度波幅为 2019 年冬季的 1.5 倍,表明交通运输对 NO₂浓度存在较为显著影响。四市中,上海市单位 GDP 所对应的大气污染物浓度最小。以上海为基准,天津 PM_{2.5}、NO₂浓度比对值分别为上海的 4.16 倍、2.9 倍,青岛 PM₁₀、SO₂浓度比对值分别为上海的 4.61 倍、3.82 倍。

(4)在气象因素影响方面,温度对大气污染物浓度存在较显著影响,温度上升有助于降低大气污染物浓度。如平均温度与 PM_{2.5}、NO₂的相关性,四市均呈负相关,降水量对季节性干旱地区的大气污染物浓度的降低效果要强于常年湿润地区。降水量对北方两市影响呈负相关,对南方两市呈弱相关,北方两市与南方两市差别在于北方两市冬季较干,存在季节性干旱。北方城市春季降雨对降低颗粒污染物浓度效果显著。

参考文献

- [1] Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, et al. Haze, public health and mitigation measures in China: A review of the current evidence for further policy response [J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 148-157.
- [2] Clifford A, Son N, Paul S, et al. Impacts of air pollution on health: Evidence from longitudinal cohort data of patients with cardiovascular diseases [J]. The European Journal of Health Economics, 2020, 21 (7): 1025-1038.
- [3] 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 大气污染对居民健康影响研究进展 [J]. 环境科学, 2019, 40 (3): 1512-1520.
- [4] Massimiliano B, Silvia G, Alice C, et al. Is there a link between air pollution and mental disorders [J]. Environment International, 2018, 118: 154-168.
- [5] 邱坚, 霍玉玲, 万学平, 等. 镇江市四季 PM_{2.5} 污染特征与潜在源区分析 [J]. 环境工程, 2019, 37 (6): 123-130.
- [5] 吴一帆, 张子豪, 王帅, 等. 大连市大气污染特征、影响因素及来源分析 [J]. 环境工程, 2018, 36 (6): 104-109.
- [6] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 PM_{2.5} 污染时空分布规律 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (3): 641-650.
- [7] 董佳丹, 陈晓玲, 蔡晓斌, 等. 基于中国大气环境监测站点的 2015—2019 年大气质量状况时空变化分析 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22 (10): 1983-1995.
- [8] 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 等. 东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 [J]. 环境科学, 2019, 40 (11): 4810-4823.
- [9] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2016, 37 (5): 1619-1628.
- [10] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析 [J]. 地理学报, 2018, 73 (1): 177-191.
- [11] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 时空分布特征及其与气象因素的关系 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (10): 1747-1754.
- [12] 吴蒙, 彭慧萍, 范绍佳, 等. 珠江三角洲区域空气质量的时空变化特征 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38 (2): 77-82.
- [13] 刘昕, 辛存林. 陕甘宁地区城市空气质量特征及影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (12): 2065-2074.
- [14] 杨立娟. 基于两层随机森林模型估算中国东部沿海地区的 PM_{2.5} 浓度 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (4): 137-144.
- [15] 陈亚慧, 葛跃. 东部沿海地区秋冬季空气 PM_{2.5} 污染时空变化特征 [J]. 农业灾害研究, 2019, 9 (1): 53-56.
- [16] GB 3095—2012. 环境空气质量标准 [S].
- [17] 天津市统计局. 2017 年天津市统计年鉴 [EB/OL]. (2018-09-30) [2021-06-07]. <http://stats.tj.gov.cn/nianjian/2017nj/zk/indexch.htm>.
- [18] 天津市统计局. 2018 年天津市统计年鉴 [EB/OL]. (2019-08-12) [2021-06-07]. <http://stats.tj.gov.cn/nianjian/2018nj/zk/indexch.htm>.
- [19] 天津市统计局. 2019 年天津市统计年鉴 [EB/OL]. (2020-05-09) [2021-06-07]. <http://stats.tj.gov.cn/nianjian/2019nj/zk/indexch.htm>.
- [20] 天津市统计局. 2020 年天津市统计年鉴 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-06-07]. <http://stats.tj.gov.cn/nianjian/2020nj/zk/indexch.htm>.
- [21] 青岛市统计局. 2017 年青岛市统计年鉴 [EB/OL]. (2017-09-04) [2021-06-07]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561073/n32561277/index.htm>.
- [22] 青岛市统计局. 2018 年青岛市统计年鉴 [EB/OL]. (2018-10-17) [2021-06-07]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561073/n32565483/index.html>.
- [23] 青岛市统计局. 2019 年青岛市统计年鉴 [EB/OL]. (2019-09-10) [2021-06-07]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561073/n32568240/index.html>.
- [24] 青岛市统计局. 2020 年青岛市统计年鉴 [EB/OL]. (2020-09-11) [2021-06-07]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561073/n32571049/index.html>.
- [25] 上海市统计局. 2017 年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2017) [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20190117/0014-1001529.html>.
- [26] 上海市统计局. 2018 年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2018) [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20190117/0014-1003014.html>.
- [27] 上海市统计局. 2019 年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2019)

- [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20200427/4aa08fba106d45fda6cb39817d961c98.html>.
- [28] 上海市统计局. 2020 年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2020 [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20210303/2abf188275224739bd5bce9bf128aca8.html>.
- [29] 宁波市统计局. 2017 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2017-10-15) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2017nbnj/indexch.htm>.
- [30] 宁波市统计局. 2018 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2018-12-10) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2018nbnj/indexch.htm>.
- [31] 宁波市统计局. 2019 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2019-01-02) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2019nbnj/indexch.htm>.
- [32] 宁波市统计局. 2020 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2020nbnj/indexch.htm>.
- [33] 王咏梅, 武捷, 褚红瑞, 等. 1961-2012 年山西雾霾的时空变化特征及其影响因子 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (10): 1-8.
- [34] 周南南, 林修宇. 能源消费与环境污染的关系研究——基于我国 30 省份面板数据的分析 [J]. 青岛科技大学学报 (社会科学版), 2020, 36 (3): 62-69.
- [35] 杜艳伟, 程建光, 王静, 等. 青岛市 PM_{2.5} 输送来源研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (5): 140-144.

(上接 93 页)

- [13] 冯梅, 陈业勤, 张学兵, 等. 空气环境质量评价分析的数学方法及应用 [J]. 环境科学与技术, 2008 (8): 141-143.
- [14] 王露云. 中国 31 个主要城市空气质量评价及主要污染物浓度预测 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2014: 12-13.
- [15] 范灿鹏, 熊杰. 2017~2020 年珠海市金湾区环境空气质量变化特征分析 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (2): 94-97.
- [16] 贾薇, 高冠龙. 山西省朔州市山阴县空气环境质量现状及变化趋势 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2020, 56 (5): 130-134.
- [17] 宫殿清, 贾陈忠, 田浩宇, 等. 临汾市空气污染与呼吸疾病相关性研究 [J]. 绿色科技, 2017 (20): 58-60.
- [18] 国家环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准环境空气质量指数 (AQI) 技术规范: HJ 633—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 周静, 成鹏伟. 秋季秸秆焚烧对临汾市空气质量的影响分析 [J]. 科技与创新, 2019 (16): 59-63.
- [20] 王冬梅. 临沂市城区 2018 年环境空气污染特征及原因分析 [J]. 环境与发展, 2019, 31 (12): 174-175.
- [21] 顾爽, 史孟娅. 临汾市大气污染治理困境浅析——基于政策工具视角 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019 (2): 207-208.
- [22] 临汾市财政局. 临汾市财政局“三个支持”全力打好污染防治攻坚战 [J]. 山西财税, 2020 (10): 14.