

上海市大气污染物时空分布特征研究

王浩森^{1*}, 李春辉², 赵丽娅^{1#}

¹湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉

²恩施州农业发展服务中心, 湖北 恩施

收稿日期: 2023年12月13日; 录用日期: 2024年1月15日; 发布日期: 2024年1月23日

摘要

为了探究近些年来上海市大气污染物的时空分布特征, 利用2019~2022年上海市16个区每日的AQI和O₃、SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀环境监测数据对比分析, 并用对应的平均风速和平均温度进行相关性分析。通过ArcGIS插值揭示了其空间分布特征; 通过以年、季节、月为时间单位进行对比, 展现了其时间变化规律; 通过SPSS进行相关性分析, 探究了大气污染物之间以及与气象因素的联系。研究表明: 近四年AQI和PM_{2.5}浓度最大均值出现在青浦区, PM₁₀、SO₂和NO₂主要集中在宝山区, 崇明区、奉贤区和金山区的O₃浓度相对较高; 近四年空气质量达标率为88.23%, O₃是上海最常出现的首要污染物。NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5}和PM₁₀季均浓度以及AQI季均值呈现为冬季污染重、夏季污染轻的规律, O₃的季均浓度的变化规律与其他污染物相反; 由相关性分析可知, 大气颗粒物中PM_{2.5}占比大, 并且PM_{2.5}和CO来源相近, 6项污染物浓度以及AQI和平均风速相关性较低, SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀和平均温度呈负相关, O₃和平均温度呈正相关。

关键词

大气污染物, 时空分布, 相关分析

Research on the Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Air Pollutants in Shanghai

Haosen Wang^{1*}, Chunhui Li², Liya Zhao^{1#}

¹College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan Hubei

²Enshi Prefecture Agricultural Development Service Center, Enshi Hubei

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王浩森, 李春辉, 赵丽娅. 上海市大气污染物时空分布特征研究[J]. 自然科学, 2024, 12(1): 157-168.

DOI: 10.12677/ojns.2024.121019

Abstract

In order to explore the spatial and temporal distribution characteristics of air pollutants in Shanghai in recent years, this paper compares the daily AQI and environmental monitoring data of O₃, SO₂, CO, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ in 16 districts of Shanghai from 2019 to 2022, and does the correlation analysis between these corresponding average wind speed and average temperature. This paper uses ArcGIS interpolation to reveal spatial distribution characteristics, compares the time units of year, season and month to show time variation rules and explores the relationship between air pollutants and meteorological factors by correlation analysis which is carried out by SPSS. The results indicate that the maximum concentrations of AQI and PM_{2.5} appear in Qingpu District. PM₁₀, SO₂ and NO₂ mainly concentrate in Baoshan District, while the concentration of O₃ is relatively high in Chongming District, Fengxian District and Jinshan District. The air quality compliance rate of Shanghai is 88.23% and O₃ is the most frequent primary pollutant there. The seasonal average concentrations of NO₂, SO₂, CO, PM_{2.5} and PM₁₀ and the seasonal average values of AQI show the regularity of heavy pollution in winter and light pollution in summer, however, the seasonal average concentrations of O₃ are opposite to that of other pollutants. Then through correlation analysis, the proportion of PM_{2.5} in atmospheric particulate matter is large, which is similar to the source of CO, the correlation between the concentration of 6 pollutants, AQI and average wind speed is low, and SO₂, CO, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ are negatively correlated with the average temperature, while O₃ is positively correlated with the average temperature.

Keywords

Air Pollutants, Spatial and Temporal Distribution, Correlation Analysis

Copyright © 2024 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

随着我国经济高速发展,城市大气环境污染已成为影响大众健康的环境问题之一[1]。近年来,为减少和避免大气污染对人体造成危害,我国通过相关治理措施,取得了一定成效。主要城市的PM_{2.5}年均浓度的变化趋势呈逐年下降,但因为污染物的排放、静稳型重污染天气等因素,有的城市出现了反弹。

大气污染研究主要集中在工业发达地区的污染分布特征方面,如Zhang等[2]对大陆范围内工业区的空气污染物浓度研究发现,工业用地O₃和SO₂浓度相对较高,同时污染物分布受到气象条件的影响显著。刘逢璐等[3]研究发现,长江中游城市的PM_{2.5}、PM₁₀浓度以及AQI的分布相近,而NO₂主要分布在武汉、南昌等经济发达的地区。鞠可一等[4]分析结果表明,长江三角洲地区的大气污染具有明显的空间差异,且具有季节性规律。刘超等[5]以上海2014年和2015年的相关数据分析发现,夏季首要污染物以O₃为主,主要来源为西北输送;冬季首要污染物以PM_{2.5}为主,主要来源为偏北气流输送。尽管有众多关于长三角地区大气污染物的研究,但近些年来以上海16个区为单位的大气污染物时空分布特征研究尚少。本文以2019~2022年上海市的大气环境监测数据为基础,通过空间插值分析大气污染物空间分布特征,并结合气象因素,探究原因,旨在为近年来的上海市大气污染防治和其成因探究提供参考依据。

2. 研究区域概况和研究方法

2.1. 研究区域概况

上海市地处 120°52'~122°12'N, 30°40'~31°53'E 之间, 北界长江, 东濒东海, 南临杭州湾, 西接江苏和浙江两省, 面积 6340.5 km²。地势平坦, 属长江三角洲冲积平原的一部分, 平均海拔 4 米左右。气候属亚热带湿润季风气候, 平均气温 17.7℃, 日照时数 1809.2 h, 降水量 1388.8 mm。如图 1 所示, 市内 19 个环境空气质量监测国控站点, 除浦东新区设有 4 个监测站外, 其他区均设有 1 个监测站。

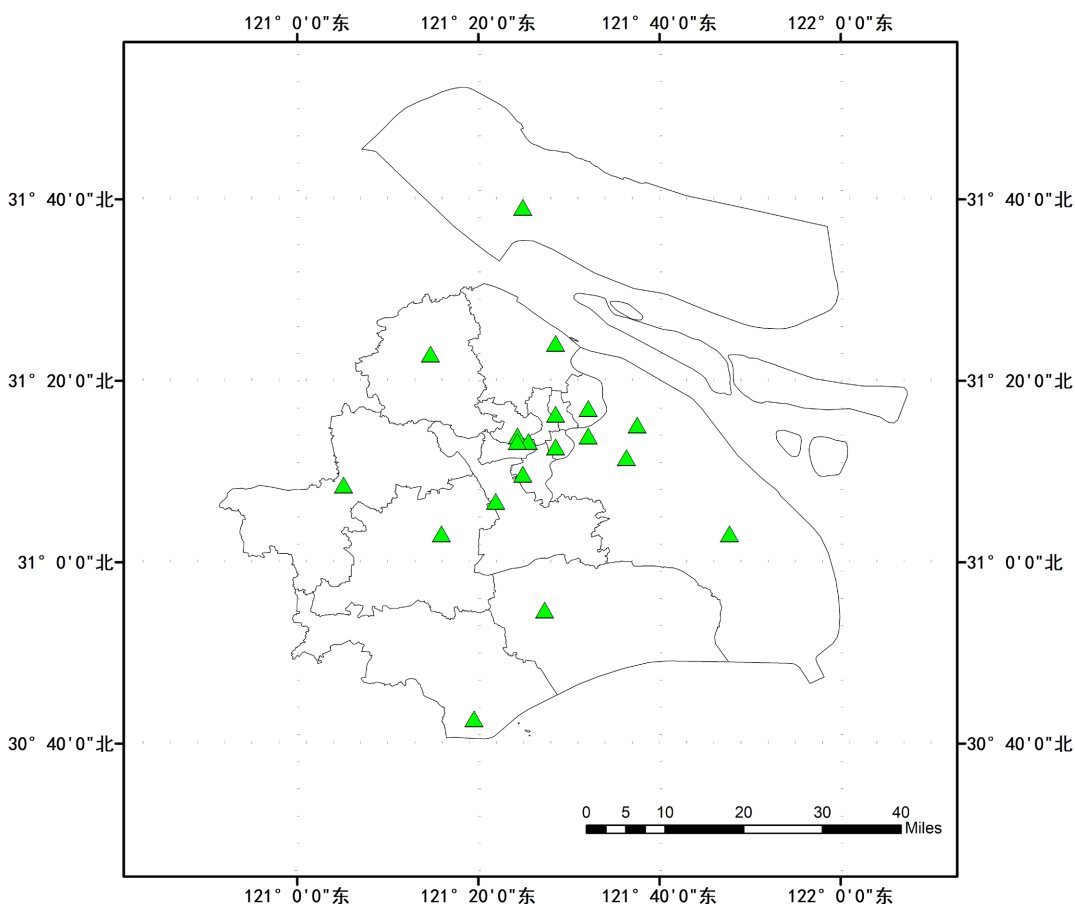


Figure 1. Distribution of environmental monitoring stations in Shanghai

图 1. 上海市大气监测站分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. 数据来源及处理

2019~2022 年, 上海市 16 个区每日的 O₃、SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 环境监测数据以及 AQI 数据均来自上海市生态环境局。其中 O₃ 浓度为最大 8 小时均值, 其余污染物浓度为日均值。期间上海市日平均气温和平均风速, 均获取于国家气象科学数据共享服务平台。

在 2019~2022 年间, 所有月份有效监测天数 27 d 以上, 每季有效监测天数 81 d 以上, 每年有效监测天数 328 d 以上, 根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 月、季、年的平均值均有效可靠。本文中冬季是指当年 1 月和 2 月以及前一年的 12 月, 每个季节时间跨度为三个月, 春夏秋冬所对应的月份以此

类推。

克里金插值法(Original Kriging)具有使用灵活且接近观测值的特点[6],利用 ArcGIS 10.7 对 19 个监测站的 6 项污染物浓度和 AQI 的平均数据进克里金插值分析。

2.2.2. 相关性分析

采用 SPSS 26 对 6 项大气污染物进行两两之间的相关性分析,并引入当日平均温度和平均风速的因素,探究温度和风速对大气污染物浓度的影响。此相关性分析采用皮尔逊相关系数,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(X_i - \bar{X})^2} \sqrt{(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: r —皮尔逊相关系数;

n —相关性分析的数据总数;

X 、 Y —参与相关性分析的因素。

3. 结果与分析

3.1. 上海市空气质量特征

上海市 2019~2022 年 AQI 有效天数为 1461 d,空气质量优良天数 1289 d,占比 88.23% (表 1)。近 4 年上海市首要污染物是 O_3 ,占比 56.05%、 NO_2 占比 23.88%、 $PM_{2.5}$ 占比 14.49%、 PM_{10} 占比 5.58%,可见 O_3 是上海最常出现的首要污染物。近三年空气质量达标率稳定,相较于 2019 年改善较为明显。

Table 1. Statistics table of AQI level days in Shanghai from 2019 to 2022

表 1. 2019~2022 年上海市 AQI 级别天数统计表

年份	AQI 级别占比/%						AQI	优良占比
	一级	二级	三级	四级	五级	六级		
2019	24.93	59.45	14.25	1.37	0	0	69.48	84.38%
2020	33.61	56.01	8.74	1.37	0.03	0	64.72	89.62%
2021	34.25	57.53	7.95	0.03	0	0	63.98	91.78%
2022	35.07	52.05	12.88	0	0	0	66.13	87.12%

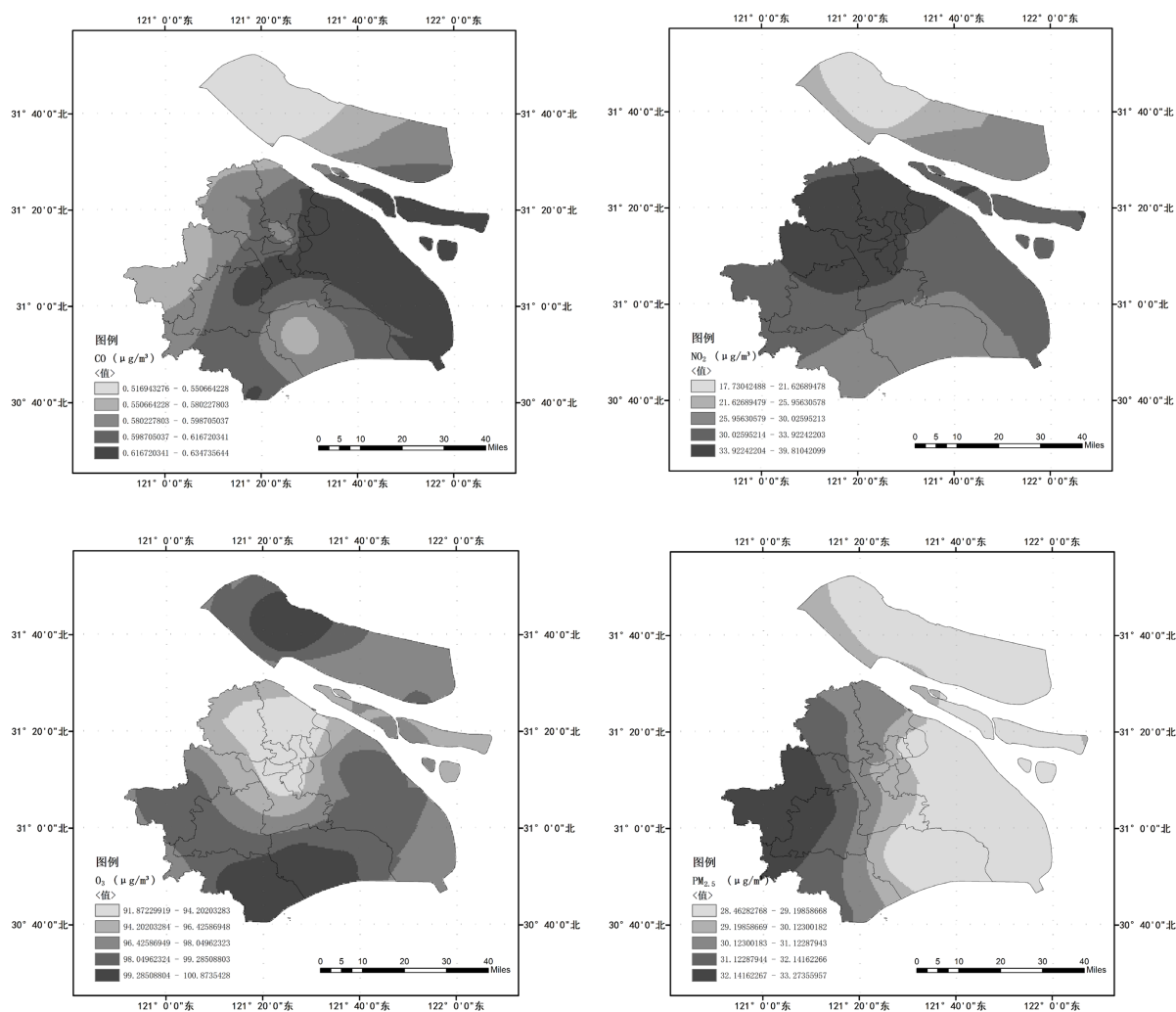
3.2. 空间变化

上海市这 4 年 6 种大气污染物(O_3 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10})浓度均值依次为 $95.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.60 \text{mg}/\text{m}^3$ 、 $33.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $30.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $42.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$,AQI 均值 66.08。上海市的大气污染物空间分布情况如图 2 所示, $PM_{2.5}$ 浓度由西向东逐步递减, PM_{10} 浓度由西偏北向东偏南递减。 SO_2 、 CO 整体为西高东低,但 CO 在中南部出现了低谷。 O_3 和 NO_2 的浓度分布情况相反, O_3 表现为在南部和北部高,向中东部递减; NO_2 表现为中东部高、四周低。

青浦区的 $PM_{2.5}$ 年均浓度最高,达到了 $33.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$,超过全市均值的 10.46%,其次是金山区、松江区和嘉定区; $PM_{2.5}$ 浓度较低的是杨浦区、浦东新区和奉贤区。宝山区的平均 PM_{10} 浓度达到了 $47.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$,超过全市均值的 10.87%,奉贤区和崇明区 PM_{10} 浓度较低。宝山区 SO_2 浓度均值为 $6.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$,高于全市均值 22.74%,未超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的年平均一级浓度限值($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$);静安区、黄浦区和徐汇区浓度低于全市均值 16%左右。浦东新区 CO 浓度最高,达到了 $0.63 \text{mg}/\text{m}^3$,崇明区 CO

浓度最低, 为 $0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。O₃ 在崇明区、奉贤区和金山区的平均浓度相对较高, 分别为 $102.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $100.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $100.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 徐江区和虹口区 O₃ 平均浓度最低, 分别为 $89.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $89.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。宝山区、徐汇区和普陀区的 NO₂ 浓度相对较高, 分别为 $39.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $39.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $38.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 超过全市均值 15% 左右, 接近国家年平均 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的一级浓度限值; 崇明区、奉贤区和金山区 NO₂ 浓度较低, 其中崇明区 NO₂ 浓度最低, 低于全市均值的 47.63%, 为 $17.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。以 AQI 值来看, 分布呈现为由西向东递减, 崇明区的 AQI 均值低于其他行政区, 青浦区 AQI 均值最高, 达到了 71.56。

综上, 大气污染最为严重的行政区是青浦区和宝山区, AQI 和 PM_{2.5} 浓度最大均值出现在青浦区, PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的浓度最大值出现在宝山区。有研究表明, 上海市 PM_{2.5} 主要来源于西北方向燃烧等人为排放所形成的内陆移动污染源, 同时海上吹来的清洁空气有利于上海东部 PM_{2.5} 浓度下降, 青浦区位于上海最西侧且 PM_{2.5} 浓度最高, 符合上述规律[7] [8]。刘镭等[9]研究发现, 钢铁行业会增大当地颗粒污染物、SO₂ 和 NO₂ 的浓度, 这与拥有大型钢铁企业的宝山区污染情况相符合, 其污染大概率来源于钢铁集团等重工业企业。卢进登等[10]研究所涉及的武汉市青山区大气污染为例, 其主要污染物和产业结构与上海市宝山区如出一辙, 而其污染来源为重工业, 这更佐证了宝山区的污染主要来源于钢铁集团等重工业企业的推论。



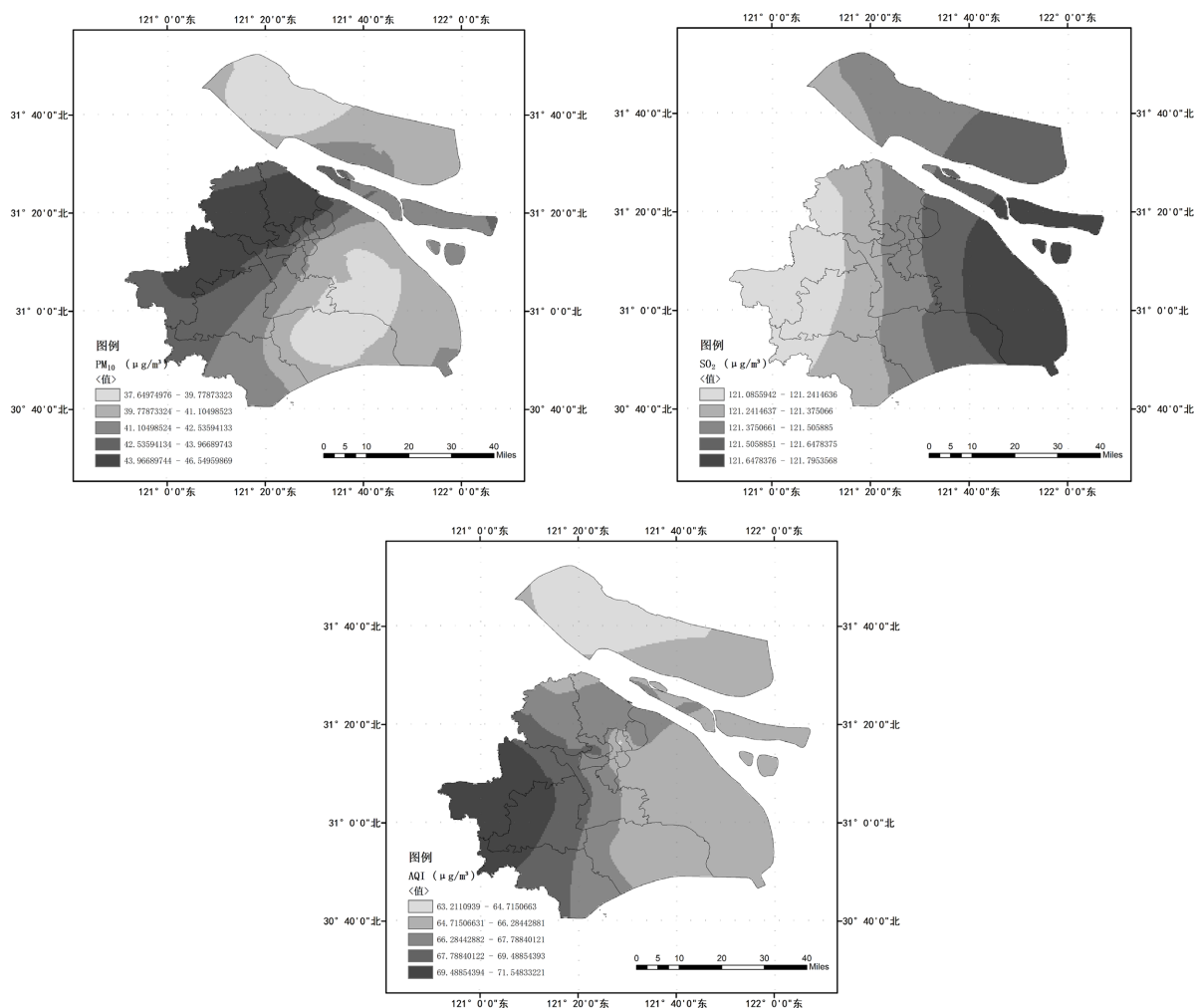


Figure 2. Average mass concentration of six key atmospheric pollutants and AQI in Shanghai
图 2. 上海市 6 种大气污染物和 AQI 年平均质量浓度空间插值图

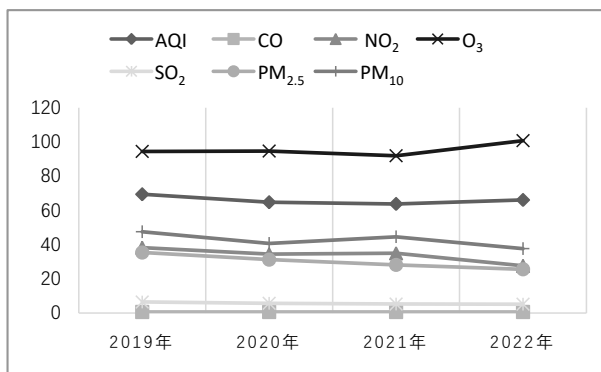
3.3. 时间变化

3.3.1. 年变化

由图 3 可知，CO 浓度年变化不大，NO₂、SO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 年均浓度均呈下降趋势，其中，NO₂ 平均浓度下降明显，降幅 20.96%。O₃ 年均浓度和 AQI 也呈下降趋势，但 2022 年出现了反弹。

3.3.2. 季节变化

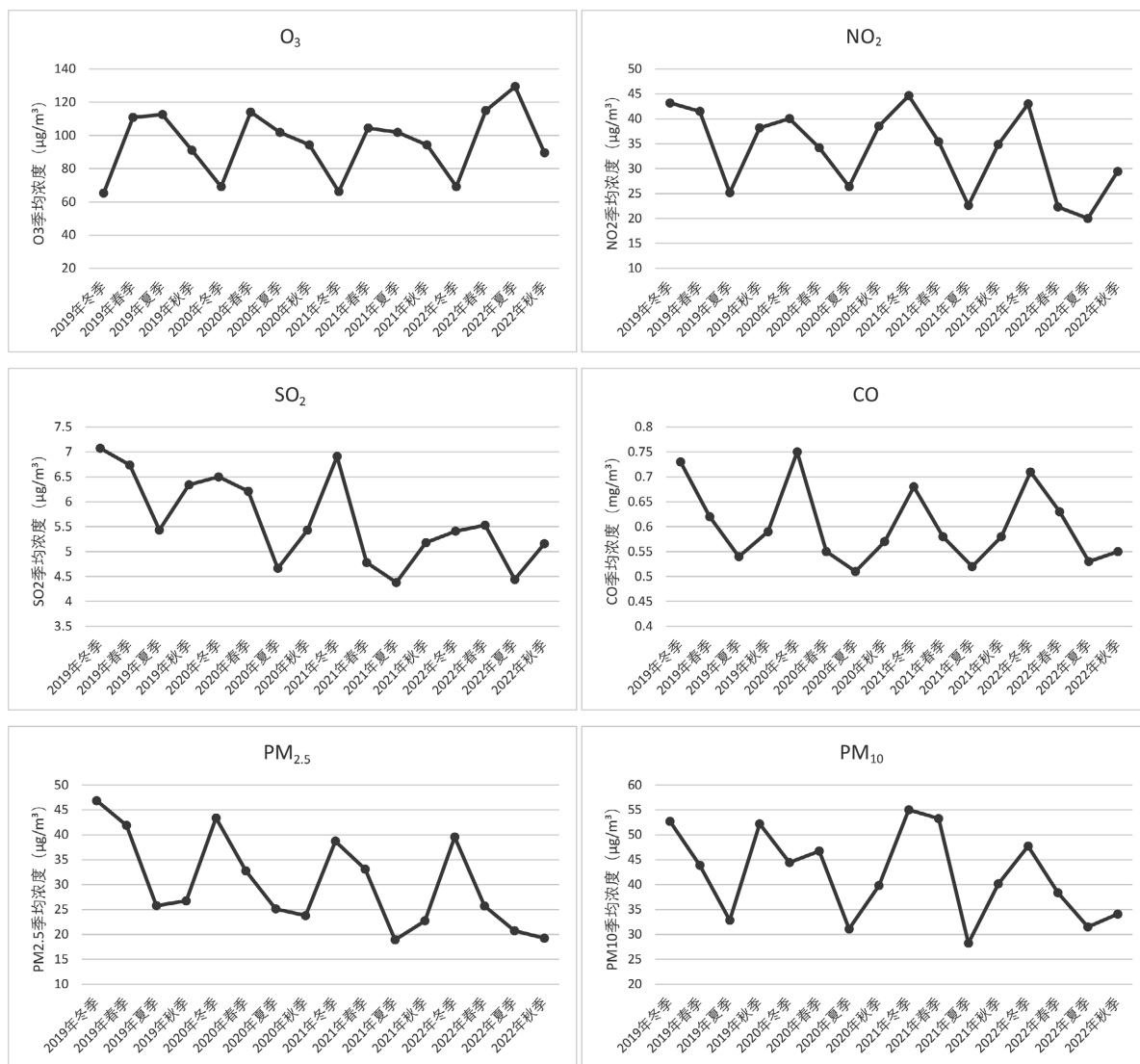
由图 4 可知，上海市 6 种大气污染物的季均浓度和 AQI 的季均值都展现出明显的季节性规律。NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 季均浓度以及 AQI 季均值在一年范围内都呈“V”字型，即冬季污染重、夏季污染轻。究其原因，上海夏季气温高、降水多，导致大气对流强，使得大气污染物易于扩散，从而污染物浓度较低；而冬季气温低、降水少，经常出现近地表逆温的情况，使得大气污染物难以扩散[11] [12]。O₃ 的季均浓度的变化规律与其他污染物相反，呈现倒“V”字型。其原因为夏季温度高、阳光辐射强度大，有利于 O₃ 的生成，冬季反之[13] [14]。以上结果也与侯素霞等人[15]对上海大气污染物的研究结果一致。通过热力图(图 5)来看，崇明区 NO₂、SO₂、CO 和 PM₁₀ 的季均浓度普遍更低，而 O₃ 浓度高于其他行政区，可见崇明区的 O₃ 污染较重，而其他大气污染相对更轻。



注：除 CO 浓度单位为 mg/m^3 以外，其余污染物单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Figure 3. Annual average mass concentration changes of six key atmospheric pollutants and AQI

图3. 上海市6种大气污染物和AQI年平均质量浓度变化图



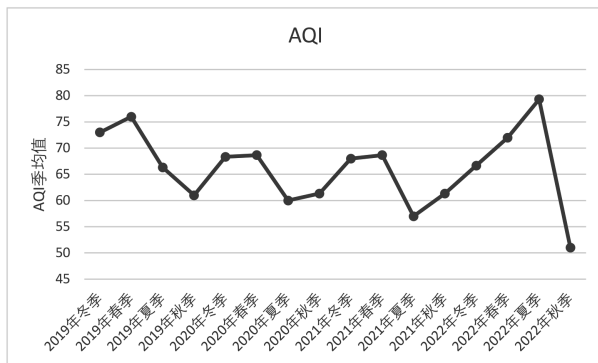


Figure 4. Seasonal average mass concentration changes of six key atmospheric pollutants and AQI in Shanghai
图 4. 上海市 6 种大气污染物和 AQI 季度平均质量浓度变化图

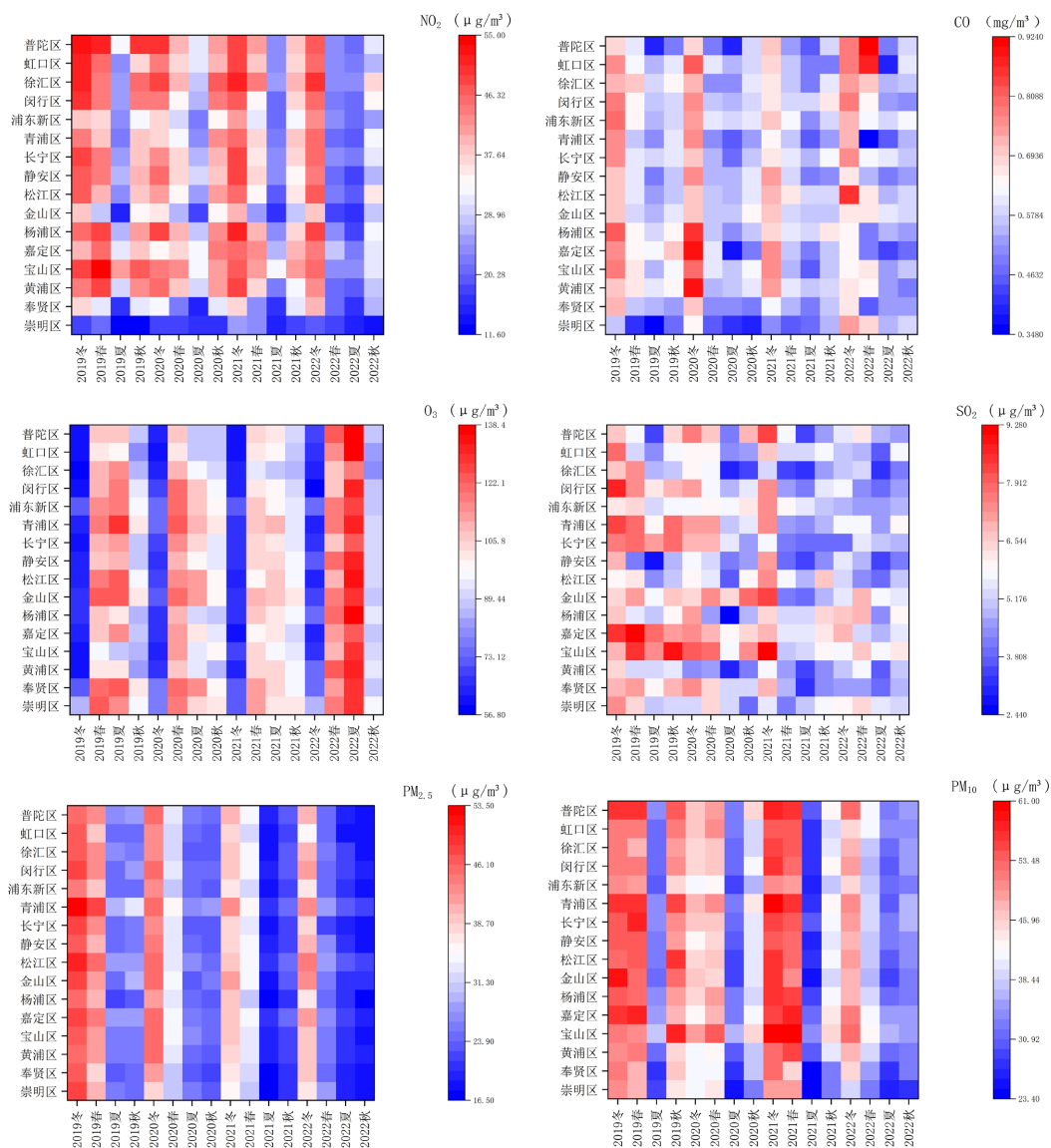
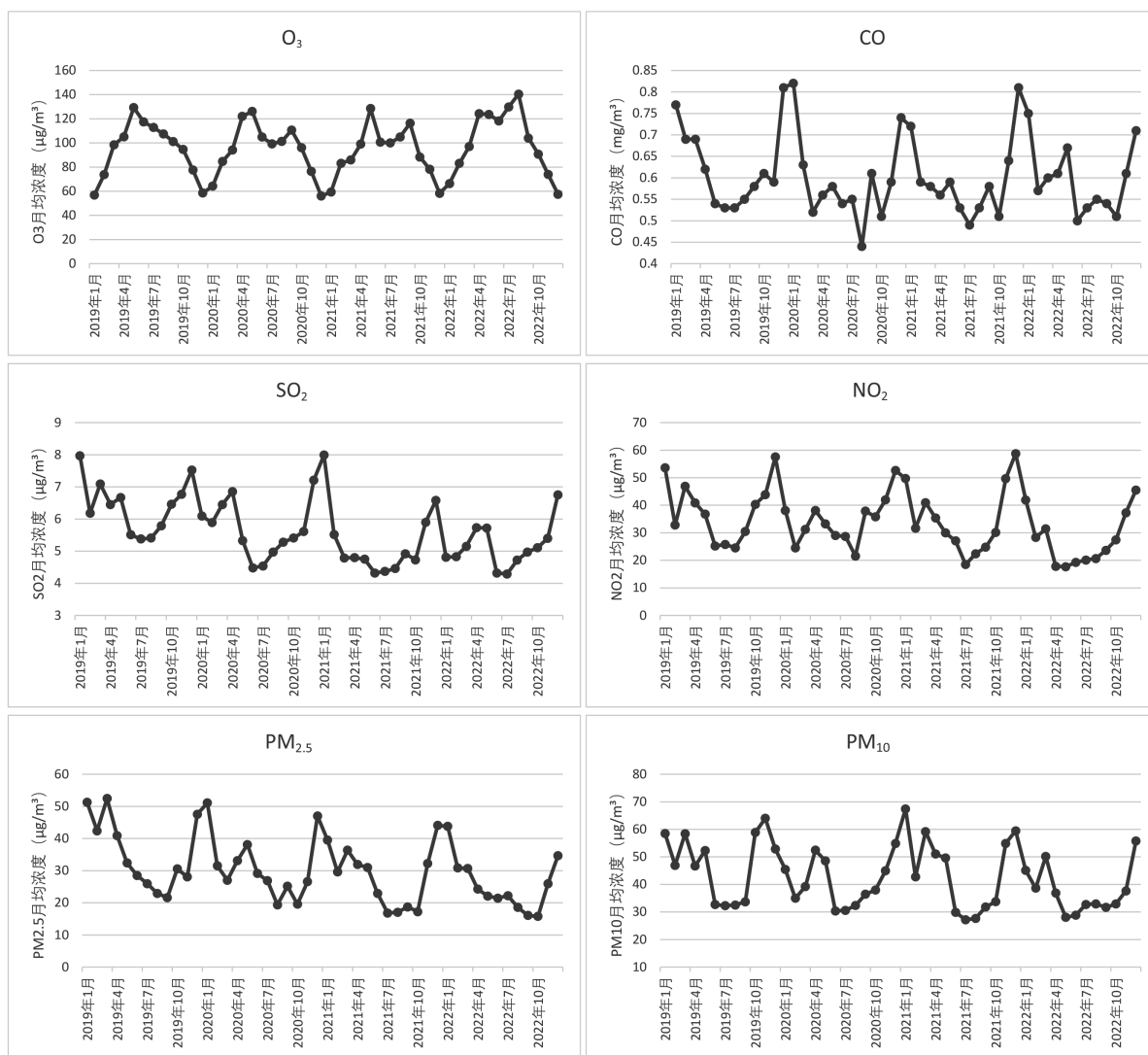


Figure 5. Seasonal average mass concentration changes of six key atmospheric pollutants in urban area
图 5. 6 种大气污染物季度平均质量浓度变化图

NO₂ 的季均浓度总体而言呈现冬高夏低且逐年降低的趋势。而 SO₂ 季均浓度的季节性变化在热力图中并不明显,但可以看出近几年浓度在逐渐下降。CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 季均浓度呈现出明显的季节性规律,即冬高夏低,同时 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 季均浓度呈现出逐年下降的趋势。O₃ 季均浓度冬低夏高的季节性变化规律显而易见,但 2022 年浓度增加较为明显,且四年间 O₃ 的日最大 8 小时平均值超过一级浓度限值的天数占 44.83%,需更加关注。

3.3.3. 月变化

图 6 中 O₃ 月均浓度来看,总体变化规律为冬低夏高,每年最低值在 12 月,而每年在 5 月和 8-9 月出现了两个峰值。根据付虹等[16]的研究,成都市的 O₃ 月均浓度也呈现出了 5 月和 8 月“双峰”的情况,且 5 月的峰值来源于农村的生物源。对照上海市的情况,拥有农村较多的崇明区、金山区和奉贤区等地 5 月 O₃ 浓度均高于其他区,且 5 月份上海城郊天然源的 VOCs 逐渐增加、不容忽视[17]。同时有研究表明,上海的 5~6 月 O₃ 生成的主要来源为 VOCs,且 VOCs 在 5 月份出现峰值[18]。总之,上海市 5 月份 VOCs 含量的增大导致了 O₃ 浓度达到峰值,而其背后的推手可能是自然源的 VOCs 释放。而第二个峰值应当是与受到高温的影响[13] [14] [19] [20]。



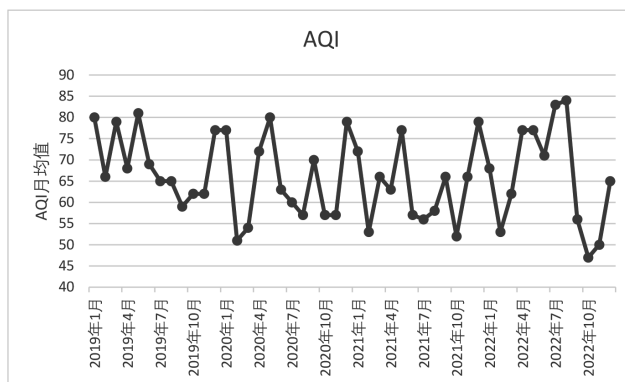


Figure 6. Monthly average mass concentration changes of six key atmospheric pollutants and AQI in Shanghai
图 6. 上海市 6 种大气污染物和 AQI 月平均质量浓度变化图

NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5}和PM₁₀月均浓度均在1月和12月达到峰值，这5项污染物的月均浓度最低值普遍集中在7~8月，符合温度变化的规律。AQI的月均最大值出现在每年的5月和12月，最小值集中在初春和秋季。

3.4. 相关性分析

3.4.1. 污染物间的相关性分析

由表 2 可知，SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 相互之间存在一定的正相关性，其中 PM_{2.5} 和 PM₁₀、PM_{2.5} 和 CO 呈现出显著正相关($r > 0.7, P < 0.01$)，这说明大气颗粒物中 PM_{2.5} 占比很大，并且 PM_{2.5} 和 CO 来源相近均主要来自于含碳燃料燃烧和汽车尾气排放[21] [22]。O₃ 与 NO₂、CO 存在负相关性，与 PM₁₀ 存在一定的正相关，与其他大气污染物几乎没有相关性。

Table 2. Correlation coefficients of key atmospheric pollutants in Shanghai

表 2. 上海市 AQI 以及不同大气污染物之间的相关系数

污染物	CO	NO ₂	O ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂
CO	1	0.629**	-0.103**	0.826**	0.543**	0.551**
NO ₂		1	-0.203**	0.645**	0.606**	0.652**
O ₃			1	0.039	0.112**	0.025
PM _{2.5}				1	0.718**	0.606**
PM ₁₀					1	0.655**
SO ₂						1

**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

3.4.2. 污染物与气温、风速的相关性分析

由表 3 可知，日 AQI 值与日平均风速呈现出负相关，可以得出风较大时有利于污染物的浓度的扩散，从而降低了污染的程度。虽然平均风速与 5 种大气污染物的浓度呈现为负相关，但是相关系数的绝对值并不高，这应当是因为西边吹来的风往往会携带着更高浓度的大气污染物，而东边吹来的洁净海风又起到了清洁的作用，因此上海市的大气污染与风速的相关性较低，应当更注重风向所带来的影响[3] [5] [7] [18]。日平均温度与 SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 呈现负相关，这与前文大气污染物浓度“冬高夏低”的规律相符合。日平均气温与 O₃ 呈现正相关，印证了高温有利于 O₃ 生成的结论。

Table 3. Correlation coefficients of atmospheric pollutants and meteorological factors in Shanghai
表 3. 上海市 6 种大气污染物与气象因素之间的相关系数

气象因素	AQI	CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
平均风速	-0.151**	-0.158**	-0.164**	-0.069**	0.029	-0.041	-0.016
平均温度	0.065*	-0.415**	-0.430**	0.530**	-0.376**	-0.384**	-0.313**

注: **在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; *在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

4. 结论

(1) 2019~2022 年, 上海市 6 项大气污染物均值和 AQI 均值克里金插值分析看出, 青浦区和宝山区相对污染更为严重, AQI 最大均值和 PM_{2.5} 浓度最大均值出现在青浦区, PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的浓度最大均值出现在宝山区。崇明区、奉贤区和金山区的 O₃ 浓度相对较高。

(2) 2020~2021 年上海市空气质量达标率稳定, 且较 2019 年改善明显, 近四年空气质量达标率为 88.23%, O₃ 是上海最常出现的首要污染物。以季节为单位来看, NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 季均浓度以及 AQI 季均值呈现为冬季污染重、夏季污染轻的规律; O₃ 的季均浓度的变化规律与其他污染物相反。在上海市大气污染物中, 仅 O₃ 浓度在 2022 年出现反弹, 且超过一级浓度限值的天数占 44.83%, 应当更加关注 O₃ 的污染。

(3) PM_{2.5} 和 PM₁₀、PM_{2.5} 和 CO 呈现出显著正相关, 大气颗粒物中 PM_{2.5} 占比大, 并且 PM_{2.5} 和 CO 来源相近。6 项污染物浓度以及 AQI 和平均风速相关性低, SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 和平均温度呈现负相关, O₃ 和平均温度呈正相关。

参考文献

- [1] 范茂清. 我国大气污染现状及治理方法[J]. 绿色环保建材, 2021(11): 24-25.
- [2] Zhang, Z.H., Song, Y.Z., et al. (2023) Elucidation of Spatial Disparities of Factors That Affect Air Pollutant Concentrations in Industrial Regions at a Continental Level. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **117**, Article ID: 103221. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103221>
- [3] 刘逢璐, 廖建军. 长江中游城市群空气质量时空特征及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 172-186.
- [4] 鞠可一, 叶钦, 李文慧, 等. 长三角地区大气污染水平时空分布特征及影响因素差异分析[J]. 科技与经济, 2022, 35(4): 11-15.
- [5] 刘超, 花丛, 康志明. 2014-2015 年上海地区冬夏季大气污染特征及其污染源分析[J]. 气象, 2017, 43(7): 823-830.
- [6] 晏星, 马小龙, 赵文慧. 基于不同插值方法的 PM₁ 污染物浓度研究[J]. 测绘, 2010, 33(4): 172-175.
- [7] 张哲. 长三角典型城市 PM_{2.5} 化学组分时空分布特征及来源解析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
- [8] 陈杨欢, 王杨君, 张苗云, 等. 上海市大气 PM_{2.5} 时空分布特征[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3671-3677.
- [9] 刘镭, 曲冰, 兰雨. 钢铁行业对大气污染的影响及减排措施分析[J]. 资源节约与环保, 2020(9): 7-8.
- [10] 卢进登, 柯杰, 莫彩芬, 等. 2017 年武汉市城区空气污染物时空分布特征[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(6): 46-51.
- [11] 戴健, 程月星, 李艳, 等. 北京市朝阳区大气污染物时空分布特征及与气象要素的关系研究[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(1): 55-61.
- [12] Liu, N., Zhou, S., Liu, C., et al. (2019) Synoptic Circulation Pattern and Boundary Layer Structure Associated with PM_{2.5} during Wintertime Haze Pollution Episodes in Shanghai. *Atmospheric Research*, **228**, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.06.001>
- [13] Ueno, H. and Tsunematsu, N. (2019) Sensitivity of Ozone Production to Increasing Temperature and Reduction of Precursors Estimated from Observation Data. *Atmospheric Environment*, **214**, Article ID: 116818. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116818>

- [14] 朱常琳, 李夏清, 李富渊. 西安市主要大气污染物浓度变化特征及相关特性分析[J]. 环境工程, 2017, 35(11): 104-109.
- [15] 侯素霞, 张鉴达, 李静. 上海市大气污染物时空分布及其相关性因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1220-1228.
- [16] 付虹, 李迪, 明镇洋, 等. 成都市臭氧日间及季节变化规律分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(9): 134-139.
- [17] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 132-139.
- [18] 叶露. 上海北郊大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(6): 107-116.
- [19] 方德贤, 张明, 安风霞, 等. 长三角典型城市臭氧污染特征和影响因素研究[J]. 能源科技, 2020, 18(10): 43-48.
- [20] 吴俊, 肖彬. 上海城区近地面臭氧污染研究[J]. 广州化工, 2020, 48(9): 112-116.
- [21] 苑丽, 闫瑞敏. 焦作市大气污染物特征和相关性分析[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 114-119.
- [22] 徐卓然, 胡豪杰, 赵子瑶, 等. 安徽省 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 和几种主要大气污染物浓度间的相关性分析[J]. 河南科技, 2022, 41(24): 88-92.