

合肥市城区2018—2021年大气污染时空分布特征及相关性分析

张 宁¹, 廖同庆^{1*}, 周 刚², 顾浩杰¹, 张文娟¹, 左昌余², 赵读俊²

(1. 安徽大学 集成电路学院, 安徽 合肥 230601;
2. 安徽庆宇光电科技有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘 要: 为了解合肥市城区的大气污染状况, 本文基于合肥11个国控监测点和气象监测站2018—2021年的大气污染和气象数据, 采用趋势分析方法和Kriging插值方法, 充分分析了PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO和O₃的时空分布特征, 进而研究了合肥市城区大气污染物之间及其与气象要素的相关性。结果表明, 2018—2021年合肥市大气污染物浓度整体呈下降趋势, 同时季节性特征显著, 呈现冬季高、春秋次之、夏季最低的特点(O₃ 8h除外); PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的逐时浓度呈“双峰双谷”形态, O₃ 1h呈“单峰单谷”形态, 而CO和SO₂变化趋势稳定; 城区污染物浓度空间分布总体呈中部和东部区域较高, 而臭氧浓度西部较高; 大气污染物与气象要素主要呈负相关关系, 而大气污染物之间则呈正相关关系。

关键词: 大气污染物; 时空分布; 气象要素; 相关性; 合肥市

中图分类号: X51

文献标志码: A

文章编号: 1007-4260(2023)04-0101-06

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Air Pollutants in Hefei from 2018 to 2021

ZHANG Ning¹, LIAO Tongqing^{1*}, ZHOU Gang², GU Haojie¹, ZHANG Wenjuan¹, ZUO Changyu², ZHAO Dujun²

(1. School of Integrated Circuits, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Qingyu Photoelectric Technology Co. Ltd, Hefei 230061, China)

Abstract: In order to study the situation of air pollution in the urban area of Hefei, the spatial and temporal distribution characteristic of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, and O₃ are fully analyzed using trend analysis approach and Kriging interpolation method based on the air pollution and meteorological data of 11 state-controlled monitoring points and meteorological monitoring stations in Hefei from 2018 to 2021. And then, correlation between atmospheric pollutants and their correlation with meteorological elements in urban area of Hefei are studied. The results show that the concentration of air pollutants in Hefei shows a downward trend from 2018 to 2021, while their seasonal characteristics are significant, presenting high in winter, followed by spring and autumn, and the lowest in summer (except for O₃ 8h). The hourly concentration of PM_{2.5}, PM₁₀ and NO₂ shows a double-peak and double-valley pattern, O₃ 1h shows a single-peak, single-valley pattern, while the trends of CO and SO₂ are stable. In terms of spatial distribution characteristics, the concentrations of air pollutants are generally higher in the central and eastern regions in Hefei but the ozone concentration is higher in the west. The air pollutants are negatively correlated with meteorological elements, while they are positively correlated with each other.

Key words: air pollutant; spatial and temporal distribution; meteorological factor; correlation; Hefei

安徽省“十四五”生态环境保护规划指出: 环境保护取得了重大进展, 但是大气环境质量问题仍然严

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划(202104g01020005)

作者简介: 张宁(1999—), 女, 安徽宿州人, 安徽大学集成电路学院硕士研究生, 研究方向为新一代信息技术。

E-mail: Zh_ning5369@163.com

通信作者: 廖同庆(1976—), 男, 安徽宿州人, 博士, 安徽大学集成电路学院教授, 研究方向为光信息获取与处理。

E-mail: t.liao@ahu.edu.cn

重,生态环境监管监测能力仍需提高^[1]。2011—2021年间,安徽省合肥市经济发展迅猛,GDP从3 642.3亿元增长到11 412.8亿元,10年增幅达213.3%,发展速度位居全国第一^[2]。随着合肥市经济的迅猛发展,化石能源燃烧、城市扬尘和移动源污染也逐年增多,造成了挥发性有机化合物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物污染的增加^[3]。尤其是,伴随臭氧形成过程中的两位“主力军”——VOCs和 NO_x 的增加,近几年合肥市的 O_3 污染问题突显^[4-5]。

为有效治理合肥市的大气污染问题,众多学者开展了一系列相关研究和分析,为大气污染的治理提供了丰富的理论和现实依据。例如,刘子豪等通过分析合肥市2014—2017年的大气污染时空变化特征,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为合肥市首要污染因子,其春夏秋冬季节污染较重,且整体呈北部和西部重、东部和南部轻的分布态势^[6]。王薇等研究了合肥市城市街道峡谷中 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征,并揭示了街道峡谷内 $\text{PM}_{2.5}$ 日均质量呈“W”型变化特征,且道路交叉口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于一般街道峡谷^[7]。汪水兵等分析了2019年合肥市的臭氧时空特征及气象因子影响,发现 O_3 日月变化均呈单峰型,且其污染治理在太阳辐射、风速和温度较高时段进行效果较好^[8]。2022年,合肥回归新一线城市,对大气环境治理提出了更高要求,研究合肥市大气污染的时空特征和影响因素尤为迫切。

1 材料与方法

1.1 研究区域

合肥市地处我国华东地区,是长三角城市群副中心城市(图1a),总面积11 445平方千米,平均海拔20~40米,主城区地势由西北向东南倾斜^[9]。合肥市属于亚热带季风性湿润气候,四季分明,2021年年平均气温为17.3℃,平均相对湿度为72.36%。近几年来,合肥市积极推进大气污染防治,不断建设空气质量监测站,确保准确掌握不同地区大气污染要素,以期因地制宜地治理城市大气污染。目前,合肥市已有国控监测站点11个,其中高教基地监测站点为2020年新增,监测点位分布情况如图1b所示。这11个站点全部位于合肥市城区,且站点监测数据均能代表该区域的污染状况。

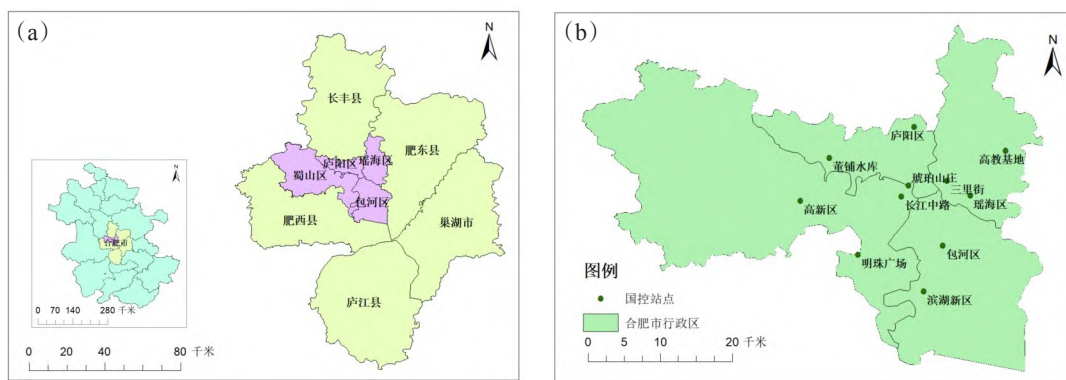


图1 合肥市国控监测站点分布。(a)研究区域地图;(b)监测站点空间分布

1.2 数据来源

地图数据来源于国家基础地理信息中心(1:100万公众版基础地理信息数据,2021);2018—2021年的大气污染和气象数据来源于合肥市11个国控监测点和气象监测站,具体包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 O_3 、温度、气压、相对湿度、风速和降水量等逐日逐时数据。

1.3 研究方法

大气污染物监测过程受设备故障、停电和大风大雨天气等因素影响,会出现监测数据缺失或异常情况,故将收集的数据剔除异常值,并使用临近点跨度为2范围内的有效序列值均值来填补缺失值。《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)规定在 O_3 日最大8小时(O_3_{8h})滑动平均浓度大于 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 O_3 任何1小时(O_3_{1h})平均浓度大于 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,认定 O_3 浓度超标^[10],因此在分析 O_3 污染特征时,逐时特征分析

采用O₃_1h浓度数据,其余均采用O₃_8h浓度数据。本文计算了2018—2021年合肥市PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂和O₃的年均值、月均值和小时值,分析其时间特征。与此同时,本文以11个监测点的地理位置数据和监测数据为离散值,使用ArcGIS软件进行普通Kriging插值预测,并将离散点数据转换为连续的面数据,进而得到整个研究区域的预测分布图,以此分析不同区域大气污染状况的差异^[11]。

在相关影响因子分析中,选用双变量相关分析方法,若数据服从正态分布,则使用Pearson相关系数,否则使用Spearman相关系数,并利用SPSS软件进行Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态性检验。

2 大气污染物时空分布特征

2.1 大气污染物时间分布特征

2.1.1 逐年变化特征

2018—2021年合肥市主要大气污染物年均质量浓度如表1所示,可知合肥市大气污染物浓度整体呈下降趋势,其中2021年PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、O₃_8h和CO的年均质量浓度相较2018年分别下降了14.53 μg/m³、3.80 μg/m³、4.66 μg/m³、0.19 μg/m³、16.53 μg/m³和0.16 mg/m³,但O₃_8h年均质量浓度依旧居高,对城区整体大气污染状况贡献较大。总之,合肥市大气污染治理取得了积极成效,但臭氧污染问题仍然突出,在大气污染防控中应给予高度重视。

表1 2018—2021年合肥市主要大气污染物年均质量浓度

年份	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	O ₃ 8h	CO
	/(μg/m ³)				/(mg/m ³)	
2018	47.75	71.31	40.18	6.95	119.09	0.81
2019	43.55	68.82	40.28	6.16	119.22	0.75
2020	35.74	57.57	37.39	6.80	105.21	0.66
2021	33.22	67.51	35.52	6.76	102.56	0.65

2.1.2 逐月变化特征

图2为2018—2021年合肥市大气污染物逐月浓度变化趋势,其中PM_{2.5}和PM₁₀月均质量浓度变化趋势略有不同,PM_{2.5}呈“U”形分布,而PM₁₀呈“W”形分布,但其峰值均出现在1月和12月,且谷值均出现在7月和8月,污染物浓度呈现冬季高、夏季低的特点。2018年4月份PM₁₀浓度明显较高,其与合肥市施工修路所造成的扬尘较多有关。与此同时,NO₂和SO₂月均质量浓度变化趋势总体一致,呈“W”形分布,且浓度夏季低、冬季高^[12]。CO月均质量浓度变化趋势呈“U”形分布,也表现为夏季低、冬季高的特点,月均质量浓度变化区间为0.609 59~0.961 35 mg/m³。此外,O₃_8h月均质量浓度变化趋势呈倒“U”形分布,季节特征明显,浓度高低顺序为夏季、春季、秋季、冬季。O₃_8h是由NO_x和VOCs在太阳照射下经光化学反应所生成^[13]。夏季温度高、太阳辐射强,有利于光化学反应进行,从而使O₃_8h浓度升高;冬季温度低、颗粒物增加且太阳辐射弱,不利于光化学反应进行,故O₃_8h浓度较低。此外,夏季大气环流活动比较频繁且降雨增多,易于大气污染物扩散与沉降,故除O₃_8h外,夏季其余五种大气污染物浓度均较低^[14]。

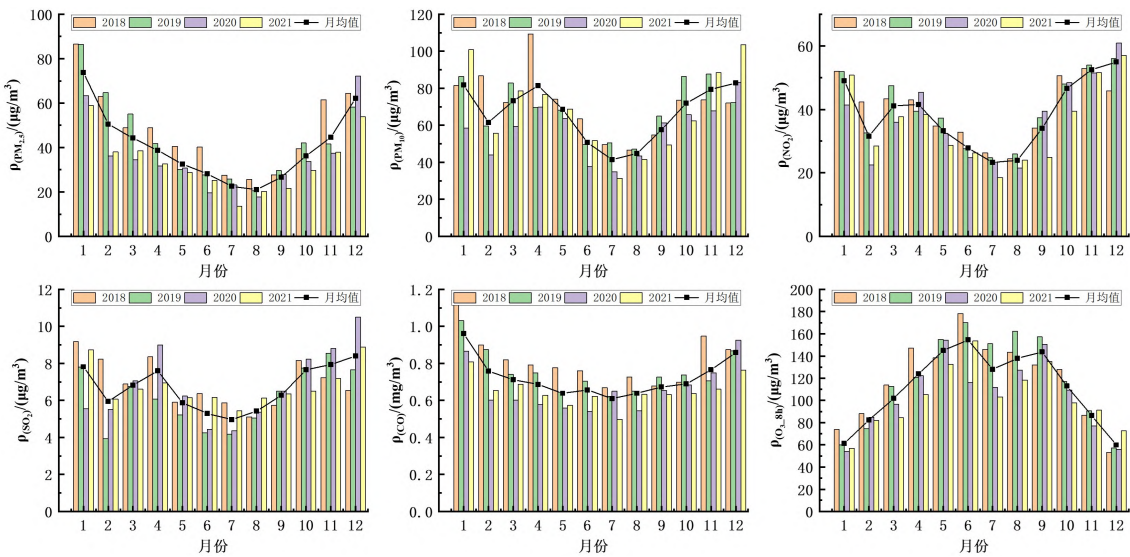


图2 2018—2021年合肥市大气污染物逐月浓度变化

2.1.3 逐时变化特征

图3为2018—2021年合肥市4年平均逐时大气污染物浓度变化曲线。由图可知,PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂浓度日变化趋势呈“双峰双谷”形态,第一个峰值出现在上午7~10时,此时为上班高峰期,车流量大,城区道路交通堵塞,机动车尾气产生聚积,从而造成大气污染物浓度上升。随后开始下降,下午13~16时PM₁₀和NO₂浓度出现谷值,且16~19时PM_{2.5}浓度出现谷值。随着下班高峰期的到来和居民活动的增加,污染物浓度开始上升,并且夜晚大气环境趋于平静,污染物聚积且不易扩散,故在20~22时PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂浓度攀升至第二个峰值。22点后,随着车流量和居民活动的减少,污染物浓度开始降低,在次日4~6时形成第二个低谷。与此同时,O₃_1h的浓度日变化趋势与其他污染物有明显差异,呈“单峰单谷”形态,白天浓度明显大于夜间。这是因为,O₃_1h浓度变化与太阳辐射强度密切相关,从上午7点开始,O₃_1h浓度不断攀升,而13时太阳辐射强度最大,由于O₃_1h浓度会产生聚积,故在13~17时出现峰值,之后随着太阳辐射强度的减弱,O₃_1h浓度急速下降,并在次日7时出现最低值^[15]。此外,CO和SO₂的浓度日变化趋势较为稳定,分别在上午8时和10时左右出现较高值。总之,合肥市大气污染物浓度逐时变化特征明显,其与人类活动、日照强度和气象要素密切相关。

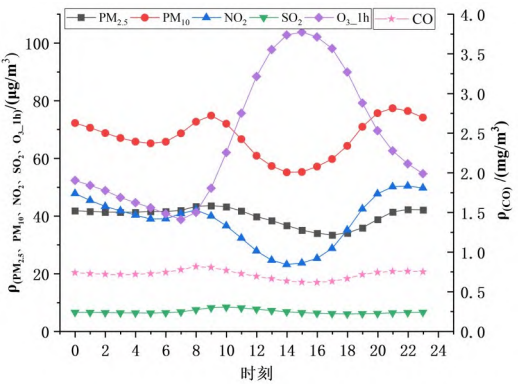


图3 2018—2021年合肥市4年平均逐时大气污染物浓度变化

2.2 大气污染物空间分布特征

本文以合肥市11个监测点的经纬度和2021年各种大气污染物年浓度均值为基础数据,进行Kriging插值分析(图4)。由于监测点位不多,Kriging插值结果与站点监测值存在一定误差,故需要对插值结果进行可信度验证。

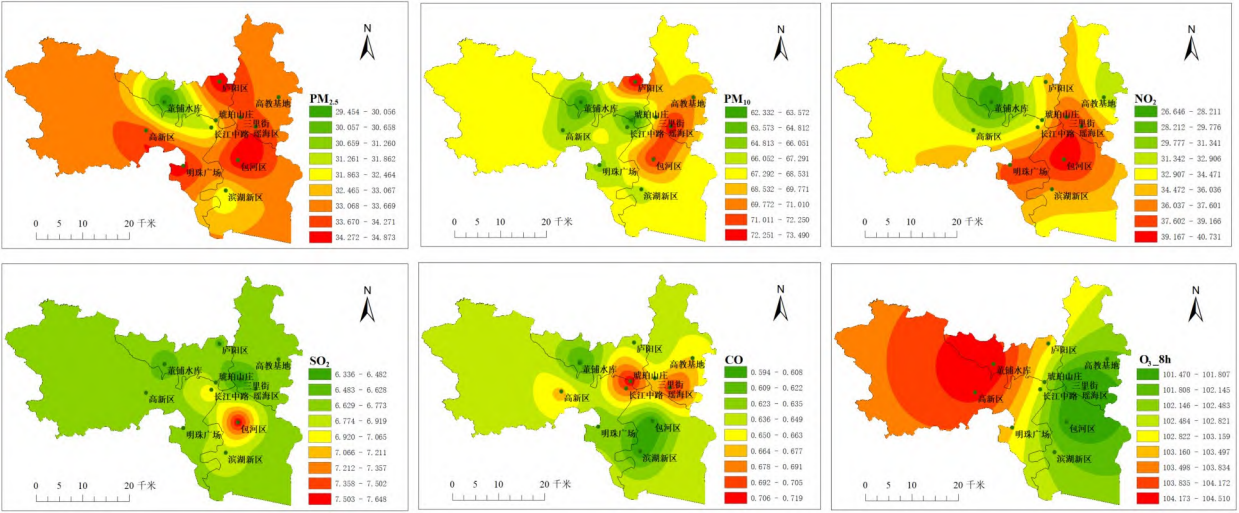


图4 2021年合肥市大气污染物年均浓度空间分布

本文选取了80%的监测点数据作为训练集来进行空间插值,剩余20%的监测点数据(长江中路和滨湖新区)作为验证集来进行可信度验证。将模型预测值与站点实际监测值进行对比,发现平均绝对偏差为5.53%。由此可知,使用Kriging插值法对合肥市大气污染物浓度的插值预测偏差较小,可信度高。可知,合肥市各种大气污染物浓度分布有明显差异,PM_{2.5}浓度呈西北和东南低、东北和西南高的分布态势。其中,庐阳区、包河区和明珠广场PM_{2.5}浓度最高,而董铺水库浓度最低,最大浓度差为7.74 µg/m³。PM₁₀年均质量浓度分布与PM_{2.5}略有不同,呈现西部低、东北高的特点。分析发现庐阳区、瑶海区和包河区PM₁₀年均浓度最高且超过了国家二级标准。NO₂年均质量浓度分布呈西北低、中部高的特点,除包河区

NO₂年均质量浓度最高超过二级标准,其余地区均未超过。SO₂年均质量浓度分布呈中部重、周边轻的分布态势,以包河区浓度最高,但远远低于国家二级标准,且整体分布差异较小。CO年均质量浓度分布呈东部、西部高,西北、东南低的分布态势,以琥珀山庄、长江中路和瑶海区浓度最高,董铺水库浓度最低,最大浓度差为0.12 mg/m³。O₃_8h年均质量浓度分布呈西部高、东部低的分布态势,以董铺水库和高新区浓度最高。合肥市污染物浓度分布态势与本市的社会经济要素有关,城市中心人口密集,其污染主要与机动车尾气和居民生活源排放有关,而新区和郊区的污染主要与工业污染和机动车尾气有关^[16-17]。

3 相关性分析

3.1 大气污染物与气象要素相关性

大气污染状况与污染源、气象要素等有关,气象要素会影响大气污染物的沉降、扩散和转化,进而影响其浓度值。研究表明,大气污染物浓度变化具有明显的季节性差异。本文将合肥市2018—2021年主要大气污染物浓度与气象要素进行了Spearman相关性分析,如表2所示。

表2 2018—2021年合肥市大气污染物浓度与气象要素的Spearman分析

类别	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃ _8h
温度	-0.484**	-0.226**	-0.424**	-0.201**	-0.267**	0.690**
气压	0.446**	0.302**	0.483**	0.330**	0.209**	-0.541**
相对湿度	-0.131**	-0.579**	-0.437**	-0.638**	0.088**	-0.366**
风速	-0.195**	-0.187**	-0.401**	-0.177**	-0.252**	-0.122**
降水量	-0.130**	-0.412**	-0.253**	-0.422**	0.007	-0.373**

注:**表示在0.01级别(双尾)显著相关。

结果表明,温度与PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂和CO浓度呈负相关,与O₃_8h浓度呈正相关;气压与O₃_8h浓度呈负相关,与其余5种大气污染物浓度呈正相关;相对湿度与大气污染物浓度呈负相关,但与CO浓度相关性较弱;风速和降水量均与大气污染物浓度呈负相关,但是CO浓度与降水量相关性不显著。这是因为,高温时空气受热膨胀上升,气压较低,而低温时空气受冷收缩下沉,气压较高,故温度和气压与大气污染物的相关性相反。与此同时,高温低压时大气层运动剧烈,有利于大气污染物的扩散与迁移,而低温高压时大气层较为平稳,且下沉气流易使污染物沉降,不利于大气污染物扩散。温度高时太阳辐射强,有利于光化学反应生成O₃,故O₃_8h浓度与温度和气压分别呈正负相关^[18];相对湿度较小时,大气污染物吸附在水分子上,其浓度增大,当相对湿度大于80%时易发生降雨,对污染物有冲刷作用,故降低了大气污染物浓度;风速较大和降水量较多对大气污染物的扩散和沉降作用明显。然而,大气污染物的浓度变化不是由单一气象要素影响的,而是多种气象要素相互作用、协同作用的结果。

3.2 大气污染物之间的相关性

鉴于部分大气污染物有共同的排放源,本文分析了大气污染物之间的相关性,其Spearman相关性分析结果如表3所示。其中,PM_{2.5}和PM₁₀呈显著正相关,其间存在包含关系以致于相关性显著。颗粒物PM_{2.5}/PM₁₀和气态污染物NO₂、SO₂、CO之间呈显著正相关,说明PM_{2.5}/PM₁₀与这三种气态污染物有共同的来源。工业生产和居民生活都会产生大量的CO与PM_{2.5},二者共源性较强,其相关性也较大。同时,NO₂、SO₂、CO均与化石燃料燃烧和机动车尾气排放有关,故这三种大气污染物有很强的相关性。NO₂光解是O₃的重要来源,但由于O₃浓度变化还受其他因素影响,且与其他大气污染物的共源性较弱,故O₃_8h与其他污染物的相关性不强^[19]。

表3 2018—2021年合肥市主要大气污染物浓度的Spearman相关性分析

类别	PM _{2.5}	PM ₁₀	NO ₂	SO ₂	CO	O ₃ _8h
PM _{2.5}	1.000	0.737**	0.646**	0.434**	0.796**	-0.097**
PM ₁₀		1.000	0.747**	0.714**	0.529**	0.213**
NO ₂			1.000	0.703**	0.547**	-0.034
SO ₂				1.000	0.321**	0.150**
CO					1.000	-0.050
O ₃ _8h						1.000

注:**表示在0.01级别(双尾)显著相关。

综上,各大气污染物间存在一定的相关性且以正相关为主,其主要与污染物来源及各自间的物理化学作用和相互转化有关^[20]。

4 结 论

本文研究了2018—2021年合肥市大气污染物的时空特征,并揭示了大气污染物与气象要素及各污染物间的相关性。研究表明,近年合肥市空气质量逐渐好转,大气污染物浓度逐年降低。然而, O_3 污染仍然严重,已成为合肥市夏季大气污染的主要污染物。与此同时,合肥市各地区污染物浓度分布有明显差异,其中已建城市区域小且集中,造成了机动车尾气和居民生活源排放污染严重。此外,研究发现大气污染物与气象要素以负相关为主,而大气污染物间则以正相关为主。结合研究结果,对合肥市大气污染治理提出如下建议:(1)着力做好合肥市中心城区的秋冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染防控工作。(2)针对全市夏季臭氧污染整体值过高问题,深入研究臭氧污染成因,并立即着手完善VOCs监测体系。(3)根据合肥市大气污染物的来源与影响要素,尽快制定大气污染综合治理与防控方案。

参考文献:

- [1] 中国移动源环境管理年报(2021)[Z]. 中华人民共和国生态环境部, 2021.
- [2] 张泉, 白冬梅, 邹成东. 长三角副中心城市促进区域经济协同发展研究: 以合肥市为例[J]. 现代管理科学, 2022(3): 19-29.
- [3] HOU F M, MAO D Y, CHEN Y, et al. Environmental study on causes and countermeasures of urban air pollution in china: a case study of haze in Hefei city, Anhui province[J]. Ekoloji, 2019, 28(107): 1245-1249.
- [4] HU R Y, LIU G J, ZHANG H, et al. Odor pollution due to industrial emission of volatile organic compounds: a case study in Hefei, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 246: 119075.
- [5] LI L, HU J L, LI J Y, et al. Modelling air quality during the EXPLORE-YRD campaign-Part II. Regional source apportionment of ozone and $PM_{2.5}$ [J]. Atmospheric Environment, 2021, 247: 118063.
- [6] 刘子豪, 黄建武, 孔德亚, 等. 合肥市大气污染时空变化及与气象因子相关性分析研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(2): 43-48.
- [7] 王薇, 程歆玥, 胡春, 等. 城市街道峡谷 $PM_{2.5}$ 时空分布特征与空气质量评价: 以合肥市长淮街道为例[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2157-2164.
- [8] 汪水兵, 刘桂建, 杨鹏, 等. 合肥市臭氧时空分布特征与气象因子影响研究[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(4): 339-348.
- [9] 彭苗枝, 李运怀, 管后春, 等. 影响合肥城市地下空间开发的地质因素分析[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 396-401.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准(GB 3095—2012)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [11] 王占山, 李志刚, 钱岩, 等. 基于监测及Kriging方法的京津冀地区大气污染物暴露分布研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 185-193.
- [12] 李长霞, 程秀莲, 王俊, 等. 2012—2016年安庆市空气质量状况分析及控制对策[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 24(1): 92-96.
- [13] 郝永佩, 宋晓伟, 赵文珺, 等. 汾渭平原大气污染时空分布及相关因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 512-523.
- [14] LIU Y S, ZHOU Y, LU J X. Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 14518.
- [15] WANG X, SHEN Z X, TANG Z Y, et al. Characteristics of surface ozone in five provincial capital cities of China during 2014—2015[J]. Atmosphere, 2020, 11(1): 107.
- [16] 潘红, 赵华东, 叶林茂. 合肥市大气污染物时空变化与来源分析研究[J]. 环保科技, 2020(1): 30-36.
- [17] 冯晓亮, 肖长春, 王志强. 合肥市2014—2017年大气 $PM_{2.5}$ 污染时空分布特征及气象因素的影响[J]. 安徽预防医学杂志, 2019, 25(5): 335-342.
- [18] 高婵娟, 赵啟超, 丁若男, 等. 2018年吉林市大气污染物浓度变化及其与气象因素的相关性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(5): 71-79.
- [19] GUO H, CHEN K Y, WANG P F, et al. Simulation of summer ozone and its sensitivity to emission changes in China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(5): 1543-1552.
- [20] 杜娟, 宋鹏程, 龙平, 等. 绵阳市大气污染物浓度变化特征及相关性分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(2), 183-191, 201.