

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0682

张翔,曹志刚,崔萍.基于超级站数据的南通区域大气 PM_{2.5} 化学组分来源解析[J].生态与农村环境学报,2023,39(2):184-189.

ZHANG Xiang, CAO Zhi-gang, CUI Ping. Source Analysis of Chemical Components of Atmospheric PM_{2.5} in Nantong Region Based on Super Station Data [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(2): 184-189.

基于超级站数据的南通区域大气 PM_{2.5} 化学组分来源解析

张翔¹, 曹志刚², 崔萍² (1. 南通市生态环境监控中心, 江苏南通 226000; 2. 南通国信环境科技有限公司, 江苏南通 226000)

摘要: 基于超级站高时间分辨率观测数据,多尺度对南通市 2020 年的 PM_{2.5} 进行来源解析,分析了 PM_{2.5} 化学组成特征、相关性、行业贡献和分季节 PM_{2.5} 内外源贡献,同时采用 WRF-CMAQ 模型构建气象场和污染物场,模拟研究了南通市 2020 年 1、4、7、10 月的环境空气质量状况。结果显示,二次无机盐(SNA)是南通市 PM_{2.5} 的最主要组成成分,且其浓度季节差异明显。硝酸盐浓度大幅升高是南通市 PM_{2.5} 污染加剧的重要原因。冬季 PM_{2.5} 污染水平加剧受机动车尾气排放的影响较大。从 2020 年整体来看,不同季节由于气象条件、污染发生类型的差异,各污染来源所占比例也不相同。南通市 PM_{2.5} 本地排放贡献约为 61%,其次为北方长距离传输,约为 17%,长三角及苏南地区输送比例为 18%。空气质量模型校验结果表明,所有污染物的模拟均能较好地代表污染物的变化趋势,在量级上虽与观测值有一定差距,但处在合理接受范围内。总体而言,模拟结果可信且可在后续研究中使用。

关键词: 超级站; 南通; PM_{2.5}; 来源解析; WRF-CMAQ 模型

中图分类号: X823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)02-0184-06

Source Analysis of Chemical Components of Atmospheric PM_{2.5} in Nantong Region Based on Super Station Data.

ZHANG Xiang¹, CAO Zhi-gang², CUI Ping² (1. Nantong Ecological Environment Monitoring Center, Nantong 226000, China; 2. Nantong Guoxin Environmental Technology Co. Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: For exploring the source of PM_{2.5} of Nantong in 2020, the characteristics, correlation and industrial contribution of chemical components of PM_{2.5}, and the internal and external seasonal contribution of PM_{2.5} were analyzed based on the high time resolution observation data of super stations. At the same time, WRF-CMAQ model was used to construct meteorological field and pollutant field for the simulation of the ambient air quality of Nantong in January, April, July and October of 2020. The results show that the secondary inorganic ion is the main component of PM_{2.5} in Nantong City, and their concentrations have obvious seasonal difference. The sharp increase of nitrate concentration is an important reason for the aggravation of PM_{2.5} pollution in Nantong city. The aggravation of PM_{2.5} pollution level in winter was affected mainly by vehicle exhaust emission. From the perspective of 2020 as a whole, according to different meteorological conditions and pollution types in different seasons, the proportions of the pollution sources were also different. The local emission contribution of PM_{2.5} in Nantong is about 61%, followed by long-distance transmission from the north (17%), and from the Yangtze River Delta and southern Jiangsu (18%). The verification on the simulation of all pollutants in the air quality model can well represent the change trend of pollutants. Although, there is a certain gap between the simulated value and the observed value, it is still within a reasonable and acceptable range. The results worked out by the model are reliable and can be used in subsequent researches.

Key words: super station; Nantong; PM_{2.5}; source resolution; WRF-CMAQ model

改善中国区域性霾污染现状、提高大气能见度已成为当前城市气候研究领域亟待解决的热点和难点问题^[1]。作为大气污染颗粒物的主要成分,PM_{2.5}化学成分复杂,对大气能见度、生态系统和人类健康都有不利影响^[2-3]。因此,研究南通市 PM_{2.5} 化学组分污染特征和来源,对评价该区域大气污染

程度、制定相应污染防控策略具有较好的参考价

收稿日期: 2021-11-04

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2020YFF0426522); 南通市社会民生科技项目(MS12021052); 南通市“226 高层次人才培养工程”(201802095)

值^[4]。目前,南通区域开展的PM_{2.5}源解析大多为离线源解析,由于离线采样的时间分辨率较大,通常样品采集时间为24 h,不能很好地反映南通市大气PM_{2.5}污染的短时间变化特征,更无法研究小时时间尺度的突发污染事件^[5-6]。

大气超级站是利用高度专业化的监测设备对空气污染理化特性、立体时空分布、成因和变化规律及其生态和健康影响开展多维度多参数、高时间分辨率的长期观测和实验研究的综合性大气监测站。与常规环境空气监测站相比,超级站除常规因子外,还配置了颗粒物化学组分、颗粒物物理特性、光化学组分、地基垂直探测、地面气象要素等种类齐全的监测仪器,可以更系统地监测污染气团的各项指标,采样时间短,且可以对小质量的样品进行分析,使得对大气颗粒物短期组分变化的测量更为精准^[7]。该研究基于超级站高时间分辨率的观测数据对PM_{2.5}在多尺度上进行来源解析,分析南通市PM_{2.5}的主要行业及不同区域的来源贡献,同时建立空气质量模型进行校验,研究区域输送特征,追踪污染气团的演变过程,进而更精准地确定污染成因,研究成果可为长三角区域城市大气污染和空气质量预报研究提供科学参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

环境受体样品采集:根据现有环境空气质量国控监测点或省控监测点,综合南通市污染物重点排放源、污染物浓度、人口密度、功能区分布等信息,在南通市范围内设置南郊、虹桥、城中、星湖花园、紫琅学院5个环境受体采样点,开展环境受体大气PM_{2.5}连续采样。

源样品采集:采集固定源(燃煤尘)、开放源(扬尘源、土壤尘源、道路尘和建筑尘等源类)PM_{2.5}尘样品。对于移动源(机动车尘)和海盐粒子等源样品,通过测定其元素、离子和碳质组分含量,并与其他城市比较,发现其空间差异较小,化学成分谱相似,且考虑到采样费用高、难度大等特点,故借鉴国内外已有成果。

样品采集的具体方法参照《大气颗粒物源解析技术指南(试行)》。

1.2 采样时间

根据南通市颗粒物排放源和污染物环境浓度季节变化特征及扩散条件等气象因素,将2020年1、4、7以及10月底至12月初分别作为冬季、春季、夏季和秋季典型时段,开展环境受体大气PM_{2.5}连

续采样,采样时间原则上设置为10:00至次日09:00,实际采样时根据各季节大气边界层变化情况调整采样时间。

1.3 数据分析

1.3.1 源谱特征提取及谱库建立

借助自适应共振神经网络分类方法(ART-2a)^[9],根据颗粒的谱图特征对采集的各源颗粒进行分类,得到各源的特征谱库,汇总嵌入仪器内置的比对模型^[10]。

1.3.2 在线源解析

利用在线单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS 05系列)进行受体颗粒物连续监测,比对模型调取源谱库与实时测到的每个受体颗粒质谱图,据此进行相似度计算,及时判断颗粒物的来源,通过一定时间(目前最短时间为1 h)的统计,即可得到源解析结果^[11]。

1.4 质量控制

1.4.1 设备校准

使用颗粒物组分全系统校准设备将一定浓度的颗粒物通入监测仪,重复3次,记录仪器监测结果,然后改变浓度水平,记录每次校准仪器监测结果,计算相对偏差、精密度和准确度,结合离子色谱检测器的校准结果,评估采样系统的采集效率 γ 。

1.4.2 数据质控

每日远程查看仪器状态及数据质量,每周对仪器运行参数、滤膜更换、采样流量调整等进行巡检,并做好原始记录。每月进行载气流量传感器校准和标准溶液标定,标准溶液在使用前经实验室离子色谱校核,其母液留样保存3个月以上,接受抽测核验。

1.5 PM_{2.5}区域传输贡献及来源分析

采用空气质量模型(CMAQ)分析南通市国控站点PM_{2.5}排放位置及来源,对外来输送及本地生成情况进行定量解析。

1.6 空气质量模型校验

采用WRF-CMAQ模型进行气象场和污染物场的模拟研究^[12],选择目前已发布的最新版本模型(WRF v4.0 + CMAQ v5.3)^[13],在固定排放源(考虑到月、周、日变化基础上)情况下,模拟南通市2020年1、4、7、10月的环境空气质量状况,对区域空气质量开展校验研究。模拟评估区域采用3层网格嵌套,嵌套区域以南通市为中心,最外层区域覆盖了中国大部分地区,分辨率为27 km,网格数为163×163;第2层区域覆盖长三角地区,分辨率为9 km,网格数为127×127;最内层区域覆盖南通市全境以

及周边相邻地区,分辨率为 3 km,网格数为 118×118。为更精细地模拟三维风场的情况,模式垂直分为 33 层,其中在 2 km 以下的边界层区域有 15 层。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 化学组成特征

根据 2020 年南通市超级站 PM_{2.5} 离子在线监测数据(以虹桥站为例),不同季节 PM_{2.5} 浓度表现为冬季(53.1 μg·m⁻³)>春季(35.6 μg·m⁻³)>秋季(27.2 μg·m⁻³)>夏季(23.0 μg·m⁻³)。由表 1 可见,四季 PM_{2.5} 中硝酸根离子(NO₃⁻)浓度占比均为最高,且冬季占比(38%)明显高于其他 3 个季节。

随着南通市 PM_{2.5} 污染水平的加剧,硝酸盐浓度也逐渐升高。根据 2020 年南通市虹桥站点颗粒物组分在线观测数据,可将 PM_{2.5} 污染水平分为 5 类,≤35、>35~75、>75~115、>115~150、>150~250

μg·m⁻³ 分别表示优、良、轻度污染、中度污染和重度污染。由表 2 可见,各化学组分的质量浓度均随着 PM_{2.5} 浓度的增加而增大。在 PM_{2.5} 浓度由低浓度转变为高浓度的过程中,硝酸根离子在细颗粒物中的占比不断加大,由 29% 增加至 43%,有机碳(OC)及硫酸根离子(SO₄²⁻)的质量浓度占比总体呈减小趋势^[14-15],分别由 22%、21% 减少至 12%、17%,铵根离子及无机碳的占比变化不明显。

表 1 2020 年南通市虹桥站点 PM_{2.5} 化学组分的季节变化
Table 1 Seasonal variation of PM_{2.5} chemical composition at Hongqiao Station in 2020 %

季节	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	OC
春	3	17	35	17	3	1	4	20
夏	3	22	29	17	1	1	5	22
秋	4	18	31	16	1	2	6	21
冬	5	17	38	19	1	1	4	15

表 2 2020 年南通市虹桥站点不同污染水平下 PM_{2.5} 的化学组分变化

污染水平	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	EC	OC
优	4	21	29	16	0	1	2	1	5	22
良	3	17	36	18	0	0	1	1	5	18
轻度污染	3	16	42	19	0	1	0	1	5	14
中度污染	4	15	41	19	0	0	0	2	4	15
重度污染	3	17	43	20	0	0	0	1	4	12

2.2 PM_{2.5} 化学组成的相关性分析

已有研究表明,硝酸盐浓度大幅升高是南通市

PM_{2.5} 污染加剧的重要原因^[16]。PM_{2.5} 浓度与二次无机盐(SNA)及主要无机离子浓度的关系见图 1。

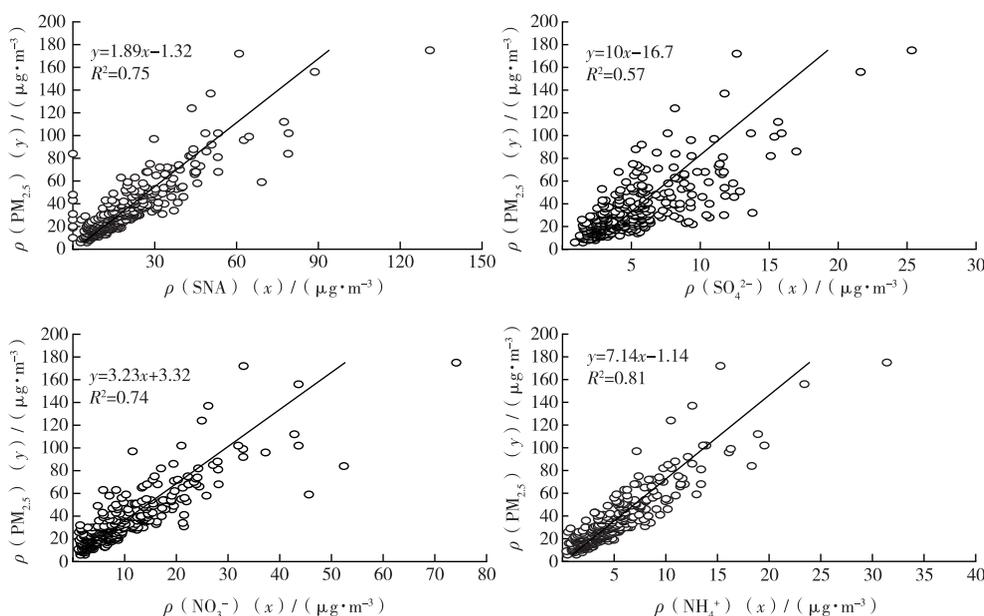


图 1 2020 年南通市 PM_{2.5} 浓度与二次无机盐(SNA)、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺ 浓度之间的关系

Fig. 1 Relationship between PM_{2.5} concentrations and concentrations of SNA, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ in 2020

由图 1 可见, PM_{2.5} 浓度与 SNA 浓度呈高度线性正相关 ($R^2 = 0.75$), 表明 PM_{2.5} 污染主要是由 SNA 浓度升高所致。与硫酸根离子浓度相比 ($R^2 = 0.57$), PM_{2.5} 浓度与硝酸根离子浓度呈现出更高的线性相关性 ($R^2 = 0.74$), 表明硝酸根离子浓度变化对 PM_{2.5} 浓度的影响较大。PM_{2.5} 中铵根离子与硝酸根、硫酸根等阴离子主要起到中和作用^[17], 故铵根离子浓度与 PM_{2.5} 浓度的决定系数最大 ($R^2 = 0.81$)。

2.3 南通市 PM_{2.5} 分行业来源解析

由图 2 可见, 研究区 PM_{2.5} 主要来源于工艺过程、生物质燃烧(生物质炉灶和生物质开放燃烧)和扬尘(工地扬尘和道路扬尘), 其排放量分别占总排放量的 39.2%、24.7% 和 17.4%。此外, 还有 8.9% 的 PM_{2.5} 来自于移动源(机动车尾气和农业机械), 8.3% 的 PM_{2.5} 来自于化石燃料固定燃烧源, 1.5% 的 PM_{2.5} 来自于其他排放源。

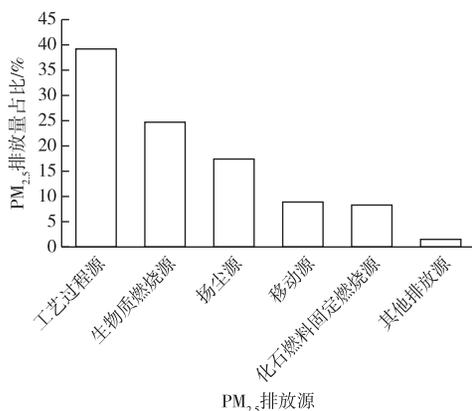


图 2 2020 年南通市 PM_{2.5} 的行业分布特征

Fig. 2 Industrial distribution characteristics of PM_{2.5} in 2020 in Nantong

2.4 不同季节南通市 PM_{2.5} 的本地源和外来源贡献

南通市国控站点 PM_{2.5} 主要来源包括本地排放、北方长距离传输、省内其他城市(苏南、苏中、苏北)输入以及长三角输入(上海、浙江、安徽等外部输入)。不同季节气象条件、污染发生类型存在差异, 导致各污染来源占比也不相同。笔者通过分析南通市国控站点的 PM_{2.5} 主要来源, 解析南通市 PM_{2.5} 本地源排放和外来源排放的贡献占比(表 3)。

1 月是 PM_{2.5} 浓度较高的月份之一, 本地排放占比略高于年平均值, 达 64%, 其次是长距离传输, 占比达 19%, 而长三角及省内传输占比为 17%, 表明

冬季污染以本地排放累积型和污染物长途输入型为主^[18]。从日变化看, 本地排放占比最大可达 76.8%。4 月与 7 月的 PM_{2.5} 传输特征相似, 即本地排放占比偏低, 为 49%~53%, 长三角与苏南地区传输的占比增大, 为 22%~31%。10 月 PM_{2.5} 的本地排放占比为一年中最大, 约 77%, 其单日占比最大可达 88%, 长距离输送占比为 14%, 表明 PM_{2.5} 的主导排放来源是本地, 外源影响较小。

表 3 2020 年南通市 PM_{2.5} 的区域传输特征

Table 3 Regional transmission characteristics of PM_{2.5} in Nantong in 2020

时间	占比/%					
	苏北	苏中	苏南	长三角	本地贡献	长距离输送
1 月	3	4	5	5	64	19
4 月	3	3	10	12	53	19
7 月	1	1	11	20	49	18
10 月	2	1	2	4	77	14
年均	2.25	2.25	7.00	10.25	60.75	17.50

2.5 空气质量模型的校验比对分析

以南通区域排放源清单和多尺度空气质量模型(CMAQ)为主体, 对南通区域空气质量进行模拟与初步校验, 分析模拟误差来源, 据此评估南通市区域 PM_{2.5} 排放清单的可靠性。目前, 南通市区域 PM_{2.5} 排放清单是通过现场核查并参考污染源普查数据, 基于精细化的活动水平和排放因子建立的 3 km×3 km 排放清单。该清单将 PM_{2.5} 排放来源分为电厂、钢厂、水泥厂、石化企业、化工企业、其他工业源、机动车、道路与施工扬尘、生物质燃烧以及其他面源。生物源 VOCs 排放数据源于自然源排放模型 MEGAN 的在线运算^[19]。选取 2020 年 1、4、7 和 10 月代表四季, 进行基准年大气污染物浓度模拟, 使用南通 5 个国控监测站点(南郊、虹桥、城中、星湖花园、紫琅学院)的观测数据平均值与模型模拟的各站点平均值进行比较, 结果见表 4。

取决于模型模拟性能、气象形势变化及化学物理反应机理, 南通市 2020 年不同月份不同污染物的模拟性能有所不同。综合而言, NO₂ 模拟值与实测值的相关系数达 0.83, 平均误差为 7.5 μg·m⁻³; 臭氧(O₃-8 h)模拟值与实测值的相关系数达 0.63, 平均误差为 40.6 μg·m⁻³; PM_{2.5} 模拟值与实测值的相关系数达 0.84, 平均误差为 12.7 μg·m⁻³; PM₁₀ 模拟值与实测值的相关系数为 0.70, 平均误差为 21.3 μg·m⁻³。不同季节的模拟误差来源存在差异, 4 月受北方气团夹带沙尘影响, PM₁₀ 颗粒物模拟性能较差; 7 月臭氧浓度模拟值偏高, 但前体物浓度模拟效

果较好,表明气象场或模型模拟机理可能存在误差,但在合理接受范围内^[20]。总体而言,该研究的模拟结果误差稳定,与实测值变化的相关性较好,

所有污染物的模拟均能较好地代表污染物的变化趋势,在量级上与观测值有一定差距但处在合理接受范围内,模拟结果可信且可在后续研究中使用。

表4 5个国控监测站点大气污染物观测平均值与模型模拟结果的比较

Table 4 Average value of observation data of 5 state-controlled monitoring stations and average value of corresponding points of model simulation results

时间 (月-日)	$\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$							
	NO ₂		O ₃ -8 h		PM _{2.5}		PM ₁₀	
	观测值	模拟值	观测值	模拟值	观测值	模拟值	观测值	模拟值
01-02	38	34	60	58	26	24	51	50
01-10	35	36	72	97	32	81	54	101
01-18	37	41	91	123	99	128	96	174
01-26	10	21	70	68	18	20	20	38
04-02	78	33	76	205	44	58	98	97
04-10	80	66	182	183	39	46	62	85
04-18	60	55	182	259	62	49	76	88
04-26	56	81	148	242	54	77	71	103
07-02	20	21	72	128	12	15	49	51
07-10	19	18	92	181	13	14	50	47
07-18	19	22	121	194	11	19	38	48
07-26	50	48	128	267	43	52	88	80
10-02	56	58	163	135	50	48	78	79
10-10	17	18	95	93	18	18	41	42
10-18	20	28	100	92	18	20	38	49
10-26	35	37	89	103	71	71	87	89

3 结论

(1)南通市PM_{2.5}的主要组成成分是SNA,且其浓度季节差异明显。冬季PM_{2.5}高浓度与硝酸根离子浓度高有密切联系,可以初步判断虹桥站点冬季PM_{2.5}污染水平加剧主要受机动车尾气排放的影响。夏季时硫酸根离子浓度在PM_{2.5}中占比最高,可能与夏季新粒子生成事件相关,硫酸盐的多元成核又是新粒子生成的重要途径。有机碳浓度虽然在冬季最高,但其在PM_{2.5}中的占比在冬季达最低,这主要是受SNA浓度变化的影响。

(2)硝酸盐浓度大幅升高是南通市PM_{2.5}污染加剧的重要原因。PM_{2.5}污染主要是由SNA浓度升高所致,硝酸盐浓度变化对PM_{2.5}浓度波动的影响较大。在PM_{2.5}中,铵根离子与硝酸根、硫酸根等阴离子主要起到中和作用,故铵根离子浓度与PM_{2.5}浓度的相关性最大。

(3)不同行业对PM_{2.5}浓度的贡献差异较大,且空间分布特征各不相同。南通市PM_{2.5}主要来源于工艺过程、生物质燃烧(生物质炉灶和生物质开放燃烧)和扬尘(工地扬尘和道路扬尘)。

(4)南通市国控站点PM_{2.5}浓度来源主要包括本地排放、北方长距离传输、省内其他城市输入、长

三角输入。不同季节因气象条件、污染发生类型存在差异,各污染来源占比也明显不同。从2020年整体来看,南通市PM_{2.5}本地排放贡献约为61%,其次为北方长距离传输,约为17%,长三角及苏南地区输送比例为18%。

参考文献:

- [1] 马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].中国工业经济,2014(4):19-31.[MA Li-mei,ZHANG Xiao.The Spatial Effect of China's Haze Pollution and the Impact from Economic Change and Energy Structure[J].China Industrial Economics,2014(4):19-31.]
- [2] CHEN Y,SCHLEICHER N,CHEN Y Z,*et al.*The Influence of Governmental Mitigation Measures on Contamination Characteristics of PM(2.5) in Beijing[J].Science of the Total Environment,2014,490:647-658.
- [3] WANG Q Y,CAO J J,TAO J,*et al.*Long-term Trends in Visibility and at Chengdu,China[J].PLoS One,2013,8(7):e68894.
- [4] 韩彩云,赵欣,单艳红,等.我国大气VOCs的监测技术和污染特征研究进展[J].生态与农村环境学报,2018,34(2):114-123.[HAN Cai-yun,ZHAO Xin,SHAN Yan-hong,*et al.*A Review of Researches on Atmospheric VOCs Monitoring Technique and Pollution Characteristics in China[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(2):114-123.]
- [5] 钱鹏,邹莎莎.南通市灰霾天气PM_{2.5}微观形貌、物质组成及来源研究[C]//2014年中国环境科学学会学术年会论文集.北

- 京: 中国环境科学学会, 2014: 1-7.
- [6] 何智敏, 陈峰. 南通市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及其吸入健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2020, 47(2): 233-236. [HE Zhi-min, CHEN Feng. Pollution Characteristics and Inhalation Health Risk Evaluation of Heavy Metal Particles in PM_{2.5} in Nantong[J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(2): 233-236.]
- [7] 郭新颖, 戴志英, 杨梅桂, 等. 南通市社区大气 PM_{2.5} 中多环芳烃污染特征分析[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(7): 649-650. [GUO Xin-ying, DAI Zhi-ying, YANG Mei-gui, et al. Analysis on Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM_{2.5} in Nantong Community [J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(7): 649-650.]
- [8] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 961-971. [KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, et al. Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM_{2.5} during the Winter in the Yangtze River Delta Region, China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 961-971.]
- [9] 陈宁, 毛善君, 李德龙, 等. 多基站协同训练神经网络的 PM_{2.5} 预测模型[J]. 测绘科学, 2018, 43(7): 87-93. [CHEN Ning, MAO Shan-jun, LI De-long, et al. PM_{2.5} Prediction Model Based on Multi-station Co-training Neural Network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(7): 87-93.]
- [10] 张恒德, 张庭玉, 李涛, 等. 基于 BP 神经网络的污染物浓度多模式集成预报[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1243-1256. [ZHANG Heng-de, ZHANG Ting-yu, LI Tao, et al. Forecast of Air Quality Pollutants' Concentrations Based on BP Neural Network Multi-model Ensemble Method[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1243-1256.]
- [11] ELSER M, HUANG R J, WOLF R, et al. New Insights into PM_{2.5} Chemical Composition and Sources in Two Major Cities in China during Extreme Haze Events Using Aerosol Mass Spectrometry[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(5): 3207-3225.
- [12] 秦思达, 王帆, 王堃, 等. 基于 WRF-CMAQ 模型的辽宁中部城市群 PM_{2.5} 化学组分特征[J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1277-1286. [QIN Si-da, WANG Fan, WANG Kun, et al. Numerical Simulation Study on Chemical Composition of PM_{2.5} in Urban Agglomeration of Central Liaoning Province According to WRF-CMAQ Model[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(6): 1277-1286.]
- [13] 康志明, 桂海林, 花丛, 等. 国家级环境气象业务现状及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 64-69. [KANG Zhi-ming, GUI Hai-lin, HUA Cong, et al. China's National Environmental-meteorological Services and Their Developmental Trend[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(2): 64-69.]
- [14] 丁峰, 朱志锋, 陆晓波, 等. 2014—2018 年南京 PM_{2.5} 中碳组分污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(2): 165-172. [DING Feng, ZHU Zhi-feng, LU Xiao-bo, et al. Characteristics Analysis of Carbon Components in PM_{2.5} in Nanjing from 2014 to 2018 [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(2): 165-172.]
- [15] LU Z, STREETS D G, ZHANG Q, et al. Sulfur Dioxide Emissions in China and Sulfur Trends in East Asia since 2000[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(13): 6311-6331.
- [16] 昌晶亮, 余洪, 罗伟伟. 珠三角地区 PM_{2.5} 浓度空间自相关分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6): 853-858. [CHANG Jing-liang, YU Hong, LUO Wei-wei. Spatial Autocorrelation Analysis of PM_{2.5} Concentration in the Pearl River Delta [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(6): 853-858.]
- [17] CHEN D, CUI H F, ZHAO Y, et al. A Two-year Study of Carbonaceous Aerosols in Ambient PM_{2.5} at a Regional Background Site for Western Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Research, 2017, 183: 351-361.
- [18] 陈飞, 张小华, 于洪霞, 等. 石家庄市冬季 PM_{2.5} 污染特征、成因及潜在源区分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 975-982. [CHEN Fei, ZHANG Xiao-hua, YU Hong-xia, et al. Characteristics, Causes and Potential Source Regions of PM_{2.5} Pollution in Winter in Shijiazhuang, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(11): 975-982.]
- [19] 张富华, 黄明祥, 张晶, 等. 生物源挥发性有机物 (BVOCs) 排放模型及排放模拟研究综述[J]. 中国环境管理, 2014, 6(1): 30-43. [ZHANG Fu-hua, HUANG Ming-xiang, ZHANG Jing, et al. A Review on Research of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission Model and Emission Simulation [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2014, 6(1): 30-43.]
- [20] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 778-790. [WANG Zi-fa, XIE Fu-ying, WANG Xi-quan, et al. Development and Application of Nested Air Quality Prediction Modeling System [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 778-790.]

作者简介: 张翔(1982—), 女, 江苏南通人, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境管理、环境科研、环境监测监控等方面的研究。E-mail: 70964060@qq.com

(责任编辑: 许素)