

doi: 10.12194/j.ntu.20191116001

引文格式: 娄彩荣, 彭小燕, 叶子纯. 2014—2018 年南通市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征及影响因素[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2021, 20(2):82-89.

## 2014—2018 年南通市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征及影响因素

娄彩荣<sup>1,2</sup>, 彭小燕<sup>3</sup>, 叶子纯<sup>2</sup>

(1. 南通大学杏林学院, 江苏 南通 226236; 2. 南通大学 地理科学学院, 江苏 南通 226007;  
3. 南通市气象局, 江苏 南通 226000)

**摘要:**近年来,高浓度颗粒物所带来的霾污染在南通市经常发生,但已有文献对其关注较少。文章以南通市 5 个大气环境监测站点发布的小时数据为基础,运用数理统计法详细分析了 2014—2018 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度在不同时间尺度上呈现出的特征和变化规律。结果表明:1) 年尺度上,5 年间南通市 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度总体呈下降趋势,但逐年值均超过国家 II 级污染限值,超出率为 11%~74%,表明城市雾霾污染仍不可忽视。2) 季节和月变化上,南通市的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为“冬季最高,春季次之,夏、秋两季最低”。除此之外,冬季污染日出现多,占全部污染日的 54%,这反映出南通市雾霾污染在冬季不仅污染严重且发生率高。在 60 个月份中,75%的月均值超过 35 μg/m<sup>3</sup>。3) 日变化上,PM<sub>2.5</sub> 日质量浓度概率密度曲线表明,南通市出现频率最高的 PM<sub>2.5</sub> 日质量浓度为 20~40 μg/m<sup>3</sup>,表明大部分时段空气质量是优良状态;在 24 时刻内,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化呈“双峰型”曲线,上午 9:00 前后和晚间 10:00 前后污染最重,下午 4:00 污染最轻。从影响因素看,南通市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与其地理位置及天气条件、人类活动污染排放等多种因素相关,尤其是地方特定的湿度环境有可能加剧霾污染程度。

**关键词:**PM<sub>2.5</sub> 特征;影响因素;南通市

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2021)02-0082-08

## Characteristics and Contributing Factors of PM<sub>2.5</sub> in Nantong from 2014 to 2018

LOU Cairong<sup>1,2</sup>, PENG Xiaoyan<sup>3</sup>, YE Zichun<sup>2</sup>

(1. Nantong University Xinglin College, Nantong 226236, China;

2. School of Geographical Science, Nantong University, Nantong 226007, China;

3. Nantong Meteorological Bureau, Nantong 226000, China)

**Abstract:** Recently the haze pollution caused by high concentration of particulate matter often affected Nantong, but which has not attracted due academic attention. Based on the hourly data of PM<sub>2.5</sub> concentrations released by five atmospheric environment-monitoring stations in Nantong, this study used mathematical statistics to analyze the characteristics and variation rules of PM<sub>2.5</sub> at different time scales from 2014 to 2018. The main results are as follows: 1) On an annual scale, the average PM<sub>2.5</sub> concentrations in Nantong in the past five years generally showed a downward trend from 2014 to 2018, but each annual concentration exceeded the China's Ambient Air Quality Standard Grade II (35 μg/m<sup>3</sup>) in China, with the exceeding rate of 11%~74%. These results indicated that urban haze pollution was still not negligible. 2) With respect to seasonal and monthly changes, PM<sub>2.5</sub> concentrations in Nantong was "highest in win-

收稿日期: 2019-11-16

基金项目: 南通市科技计划项目(MS12019054, MSZ19211);南通大学杏林学院科研基金项目(2018K113);南通大学博士启动基金(03082162)

第一作者简介: 娄彩荣(1977—),女,讲师,博士,主要研究方向为城市生态及环境地理。E-mail:loucairong@126.com

ter, followed by spring, and lowest in summer or autumn". Besides, the number of polluted days was most in winter, accounting for 54% of all polluted days. In a word, haze pollution in Nantong was not only serious but also occurred frequently in winter. Of 60 PM<sub>2.5</sub> monthly concentrations in the past five years, 75% exceeded 35 μg/m<sup>3</sup>. 3) In terms of daily changes, the PM<sub>2.5</sub> daily concentrations with the highest frequency in Nantong was from 20 μg/m<sup>3</sup> to 40 μg/m<sup>3</sup>, indicating that most of daily air quality was good. From 00:00 to 23:00 in a day, the change of PM<sub>2.5</sub> hourly concentration showed a "bimodal" curve, with the highest values at about 9:00 am and 10:00 pm, and the lowest pollution level at 4:00 pm. Considering the contributing factors, PM<sub>2.5</sub> pollution characteristics in Nantong are closely related to its geographical location, weather conditions, human activity pollution emissions and other factors. Especially, the relative humidity may aggravate the haze pollution.

**Key words:** characteristics of PM<sub>2.5</sub>; contributing factors; Nantong

大量研究证实细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 威胁着人类健康<sup>[1-3]</sup>, 并影响着生态环境和气候变化<sup>[3-4]</sup>, 因此, 由高浓度 PM<sub>2.5</sub> 导致的大气雾霾污染现象近年来引发了社会各界极大关注。当前, 国内外对 PM<sub>2.5</sub> 的研究主要关注其源解析、组分和结构、变化特征和模拟预测等方面<sup>[4-9]</sup>; 在研究范围上, 针对三大区域<sup>[4-5, 7-8]</sup>和大城市<sup>[9-11]</sup>等有较为详细的研究案例, 而对中等城市的研究比较薄弱, 比如对沿海城市南通的关注非常少。实际上, 国家环保局数据中心 (<https://datacenter.mee.gov.cn/>) 公布的空气质量数据显示, 南通也多次出现持续的、较为严重的空气霾污染现象。其中, 2013年南通市最高 PM<sub>2.5</sub> 小时质量浓度达 558 μg/m<sup>3</sup> (2013年12月6日), 当日均值为 307 μg/m<sup>3</sup>, 达到严重污染水平; 2018年最高的 PM<sub>2.5</sub> 小时质量浓度为 319 μg/m<sup>3</sup> (2018年1月30日), 当日均值为 262 μg/m<sup>3</sup>, 仍然为重度污染水平。在大力改善城市生态环境的新时代召唤下, 识别 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征及其主要影响因素, 对于南通市甚至长三角区域的空气污染联防联控, 以及对于提升沿江城市生态环境具有重要意义。

## 1 数据来源和研究方法

南通市 (北纬 31°41'~32°42', 东经 120°11'~121°54') 位于长江入海口, 南临长江, 东濒黄海。城市三面环水, 形似半岛, 境内除狼山、军山一带为山丘地貌外, 其余为平原地貌。属于亚热带季风气候, 受海洋性气候影响, 四季分明。依据中国天气网 (<http://www.weather.com.cn/>) 发布的气象数据统计, 2014—2018年南通市年平均气温 16℃左右, 年平均

日照时数 2 000 h 左右, 年平均降水量 1 322 mm 左右, 其中夏季降雨占全年的一半左右。南通市相对湿度较高, 年平均相对湿度为 77%, 冬季和春季较低, 分别为 73% 和 74%, 夏季和秋季较高, 分别为 82% 和 79%。综合来看, 南通市夏季高温、高湿、多降雨, 环境湿热; 冬季低温、少降雨、较高湿度, 环境湿冷。南通市区年平均气温 16.8℃, 市区内水体面积较大, 类型丰富, 水系发达。

### 1.1 数据来源和数据处理

本研究选取南通市区 5 个国控空气质量监测点 (紫琅学院、城中、虹桥、南郊、星湖花园), 收集在这些平台实时发布的逐时空气质量指标 (<http://www.cnemc.cn/>), 具体包括 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 CO 浓度, 时间范围为 2014-01-01—2018-12-31。分别按照日均、月均、季节均值和年均尺度计算 PM<sub>2.5</sub> 及其他污染物的对应浓度均值, 其中, 每年 1—2 月和 12 月为冬季, 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季。城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度为 5 个监测点的平均值。根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 规定, 我国二类地区 PM<sub>2.5</sub> 日均二级污染限值为 75 μg/m<sup>3</sup>, 年均二级污染限值为 35 μg/m<sup>3</sup>, 因此, 当日均质量浓度超过 75 μg/m<sup>3</sup> 时, 本文将此日认为是污染日。

另外, 在收录 PM<sub>2.5</sub> 数据的同时, 本文还收集了 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 等数据和对应时段气象要素中的温度、相对湿度、风速、降雨等数据, 作为分析各因素对城市 PM<sub>2.5</sub> 影响的基础数据。

### 1.2 PM<sub>2.5</sub> 影响因子体系构建

影响 PM<sub>2.5</sub> 浓度的因素多而复杂<sup>[12-14]</sup>, 本文选择

人类活动和气象要素两方面 8 个指标构建影响指标体系(如表 1 所示),来分析 PM<sub>2.5</sub> 的驱动机制。

表 1 影响 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的因子体系

Tab. 1 System of factors impacting PM<sub>2.5</sub> concentration

指标层	影响因子
人类活动	PM <sub>10</sub> 质量浓度(μg/m <sup>3</sup> )
	SO <sub>2</sub> 质量浓度(μg/m <sup>3</sup> )
	NO <sub>2</sub> 质量浓度(μg/m <sup>3</sup> )
	CO 质量浓度(mg/m <sup>3</sup> )
气象要素	温度(°C)
	相对湿度(%)
	风速(m/s)
	降水(mm)

### 1.3 等步长统计法

因数据样本较多,直接分析 PM<sub>2.5</sub> 浓度与影响因子的关系,趋势可能并不显著,所以,本文采用等步长统计法分析 PM<sub>2.5</sub> 浓度与某一影响因子之间的关系。以 PM<sub>2.5</sub> 浓度与相对湿度的关系为例,若相对湿度步长设为 5%,即统计每一个 5% 步长内所有 PM<sub>2.5</sub> 浓度的均值,具体流程如下:

设相对湿度变化范围为 0%~100%,取步长 = 5%,把相对湿度从 0% 到 100% 等距分为 20 个区间段,分别为 0%~5%、6%~10%、…、96%~100%。假设在第  $n$  ( $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ) 个区间内共统计到  $m$  个 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度,分别记为  $\rho(\text{PM}_{2.5})_1$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})_2$ 、…、 $\rho(\text{PM}_{2.5})_m$ ,其平均值即为该相对湿度区段内的质量浓度,记为  $\bar{\rho}(\text{PM}_{2.5})$ ,

$$\bar{\rho}(\text{PM}_{2.5}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \rho(\text{PM}_{2.5})_i \quad (1)$$

以此类推,计算步长 = 1% 和步长 = 2% 时每个区段对应的浓度均值,分析不同步长下影响因子与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的关系。

### 1.4 线性回归法

线性回归模型经常被用来分析 PM<sub>2.5</sub> 的影响驱动。其中一元线性回归主要分析单一自变量对因变量的影响,多元线性回归则是分析多个自变量对因变量的影响。模型使用的条件是数据样本较多,符合正态分布。本文所用有效数据为 1 827 个,数据量较大,基本符合正态分布,符合线性回归的条件要求。具体操作时,在 SPSS18.0 软件中直接运行数据

分析中的回归模块,选择一元和多元线性回归。

## 2 南通市区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征

### 2.1 年均浓度及变化趋势

根据年均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度计算结果(如表 2 所示),2014—2018 年南通市区 PM<sub>2.5</sub> 年均值介于 39.06~61.10 μg/m<sup>3</sup> 之间。根据 GB 3095—2012 中“年平均浓度 II 级污染限值为 35 μg/m<sup>3</sup>”的规定,5 年间南通市区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度全部超过这一标准。从变化趋势看,2014—2017 年南通市区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度处于下降状态,平均每年降低 7.35 μg/m<sup>3</sup>;2017—2018 年 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度略有上升。

从污染日数统计结果看,5 年污染日总数为 296 d,占总日数的 16.22%;2014 年污染日数最多(高达 90 d),2017 年最少。以上数据表明,5 年间南通市区大气霾污染程度处于缓解趋势,显示出人们对大气污染的治理初见成效,但 PM<sub>2.5</sub> 年均值均超出国家 II 级标准,说明大气霾污染治理是一项长期的任务,仍需给予较高关注。

表 2 2014—2018 年南通市区 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度和污染日数

Tab. 2 Annual PM<sub>2.5</sub> concentrations and pollution days in Nantong from 2014 to 2018

统计指标	年份				
	2014	2015	2016	2017	2018
PM <sub>2.5</sub> 年均质量浓度/(μg·m <sup>-3</sup> )	61.10	56.01	45.59	39.06	40.97
超出标准率/%	74.57	60.03	30.26	11.60	17.06
污染日数	90	76	61	30	39
占比/%	24.66	20.82	16.67	8.22	10.68

### 2.2 季节平均浓度及变化趋势

根据图 1 所示,2014—2018 年南通市区各季节 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化具有明显的规律性。春、夏、秋、冬四季 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈 U 型分布,“冬、春季高,夏、秋季低”,这一显著季节效应特点与其他很多城市类似<sup>[1,4,7]</sup>。具体地看,5 年春、夏、秋、冬四季的平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别为 49.54, 35.70, 40.71, 68.23 μg/m<sup>3</sup>。20 个季节中,仅 4 个季节 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度低于 35 μg/m<sup>3</sup>,其他均超出国家 II 级污染标准。

由图 2 可以看出,在 5 年间出现的污染日中,约 54%(159 d) 出现在冬季,春、秋两季次之,分别为 68 和 46 d,夏季最少(22 d)。尽管 2014—2018 年总污

染日数在减少,但是冬季污染日数仍居高不下,表明南通市区冬季的污染日出现概率远大于其他季节。

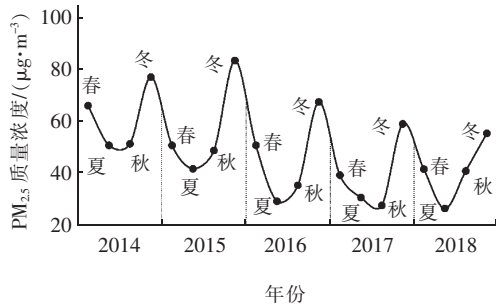


图1 2014—2018年各季节PM<sub>2.5</sub>平均质量浓度

Fig. 1 Average PM<sub>2.5</sub> concentrations of seasons in 2014–2018

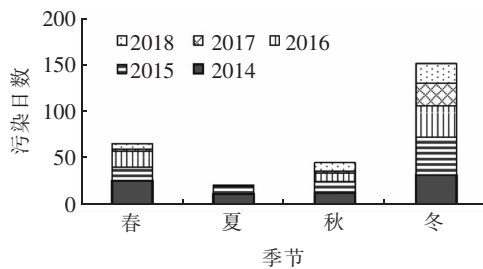


图2 2014—2018年各季节污染日数

Fig. 2 Polluted-day numbers of four seasons in 2014–2018

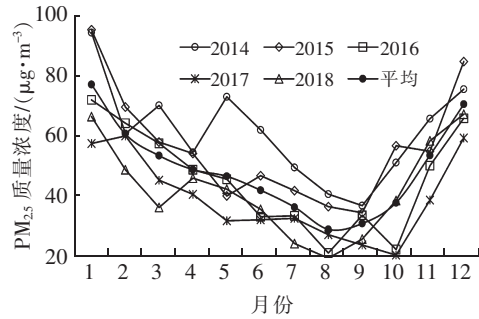
以上结果表明,南通市区冬季是PM<sub>2.5</sub>污染高发期,该季节不仅PM<sub>2.5</sub>浓度高,而且污染日数也多,其他季节的PM<sub>2.5</sub>污染相对较轻。这与南通市地处沿海、属于季风气候区域、夏季多雨有关。

### 2.3 月均浓度及变化趋势

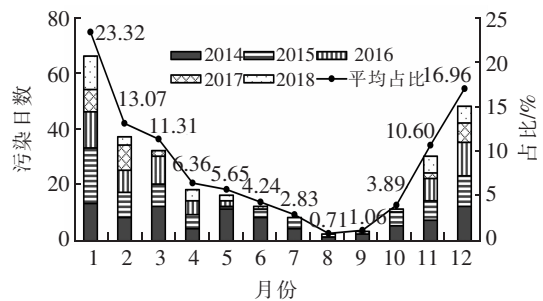
图3统计的是2014—2018年南通市区逐月PM<sub>2.5</sub>质量浓度及污染日数。从5年均值看(图3(a)),PM<sub>2.5</sub>月均质量浓度呈U型分布,“中间低、两端高”,其中:1、2月和12月较高,分别为76.99,60.57和70.44 μg/m<sup>3</sup>;3—8月在波动中保持下降趋势;8月达谷底(质量浓度为28.93 μg/m<sup>3</sup>),9—11月开始回升,至12月再次进入PM<sub>2.5</sub>月均质量浓度较高时期。各年份变化规律的细部差异在于,2014、2015和2018年在春季易出现颗粒物污染小高峰。另外,在60个月份中,有45个月PM<sub>2.5</sub>月均质量浓度超过35 μg/m<sup>3</sup>,占比高达75%。

从污染日数看(图3(b)):1—3月和11、12月出现的污染日较多,其中1月污染日占比23.32%;8、9月污染日占比较少,分别为0.71%和1.06%;4—7月

和10月占比介于2.83%~6.36%之间。这反映出南通市区在温度较低的冬季、春初和秋末雾霾容易暴发。



(a)PM<sub>2.5</sub>质量浓度



(b)污染日数

图3 2014—2018年各月份PM<sub>2.5</sub>质量浓度及污染日数

Fig. 3 Monthly PM<sub>2.5</sub> concentrations and polluted-day numbers in 2014–2018

### 2.4 日浓度特征

从直方图统计(图4)看,5年间城市PM<sub>2.5</sub>日质量浓度最高为237 μg/m<sup>3</sup>,是日均Ⅱ级限值(75 μg/m<sup>3</sup>)的3.16倍,最低日质量浓度为5 μg/m<sup>3</sup>。在1825个日数据中,空气优、良日分别占41.37%和42.41%,空气质量达标率超过80%。直方图显示该地区PM<sub>2.5</sub>日质量浓度出现频率最多的区间为20~40 μg/m<sup>3</sup>,表明南通市区大部分时段空气质量较好。在75~

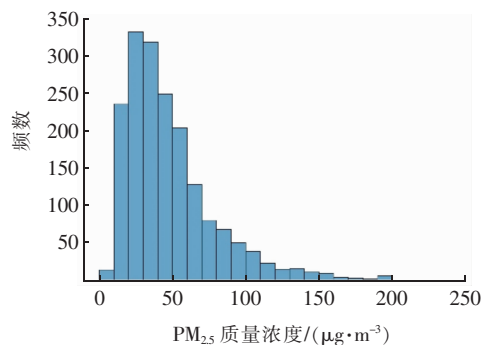


图4 2014—2018年南通市区PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度直方图

Fig. 4 Histogram of PM<sub>2.5</sub> daily concentrations in Nantong from 2014 to 2018

237  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  区间共统计到 296 个污染日, 其中 90% 的污染日属于轻度、中度污染(低于 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 重度污染日(介于 150~200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间)占比为 10.14%, 严重污染日(大于 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )的数量较少, 仅占污染日总数的 0.68%。

综合看, 南通市区大部分的  $\text{PM}_{2.5}$  日浓度达到优良水平, 即使在污染暴发时, 也多以轻度、中度为主, 但是重度和严重污染水平的雾霾也依然存在, 城市空气质量现状仍不容忽视。

### 2.5 24 时刻浓度及变化趋势

图 5 统计的是 2014—2018 年南通市区各站点 24 时刻(00:00—23:00)的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度(取均值)变化趋势。5 个站点的变化趋势基本一致, 呈“双峰型”曲线特征: 两个峰值分别出现在上午 9:00 和晚间 10:00 前后, 说明此时段细颗粒物浓度在一天中最高; 谷值出现在下午 4:00 左右, 意味着此时段大气  $\text{PM}_{2.5}$  污染最轻。

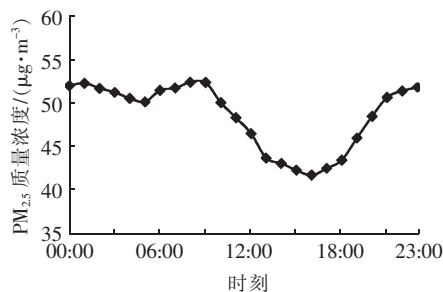


图 5 南通市区 00:00—23:00 时刻  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度

Fig. 5 Average  $\text{PM}_{2.5}$  hourly concentrations in Nantong from 00:00 to 23:00

## 3 南通市区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响因素

### 3.1 人类活动排放的污染物与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系

#### 3.1.1 $\text{PM}_{10}$ 的影响

由表 3 的相关系数可知,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与  $\text{PM}_{10}$  浓度呈 0.01 水平上的显著正相关关系, 相关系数高达 0.92, 说明  $\text{PM}_{10}$  浓度越高,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度就越高。一元线性拟合结果显示,  $\text{PM}_{10}$  质量浓度每升高 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度增加 0.68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结果反映出南通市区城市建设和人类其他生产、生活排放的一次颗粒物对城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响十分显著。

#### 3.1.2 气体前体物的影响

$\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  是形成细颗粒物的气体前体物, 如表 3 所示,  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  浓度与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均呈正相关关系( $P < 0.01$ ), 意味着  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$  每一种污染物浓度增加时,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度都随之增加。一元线性拟合系数也说明能源燃烧时释放的气体对城市细颗粒物的影响也比较明显。比较看, 3 种污染物增加相同单位时,  $\text{CO}$  促进霾污染作用更强, 说明  $\text{CO}$  对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响效应高于另两种污染物。

### 3.2 气象要素与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系

城市的天气条件时刻影响  $\text{PM}_{2.5}$  的存在状态和扩散的方式<sup>[11,15-16]</sup>。分气象因子看:

1) 温度、风速和降水 表 3 统计的结果显示, 温度、风速、降水与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均呈负相关关系( $P < 0.01$ ), 意味着温度越高、风速越大、降水越强

表 3  $\text{PM}_{2.5}$  与各因子之间的相关关系

Tab. 3 Relationship of  $\text{PM}_{2.5}$  with various factors

影响因子	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度				
	相关系数		一元线性拟合		
	<i>R</i>	<i>P</i>	拟合方程	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>Sig.</i>
$\text{PM}_{10}$ 质量浓度	0.92**	0.00	$y = 0.68x - 2.23$	0.85	0.00
$\text{SO}_2$ 质量浓度	0.63**	0.00	$y = 1.47x + 14.69$	0.40	0.00
$\text{NO}_2$ 质量浓度	0.63**	0.00	$y = 1.02x + 12.90$	0.40	0.00
$\text{CO}$ 质量浓度	0.80**	0.00	$y = 83.05x - 14.32$	0.64	0.00
温度	-0.31**	0.00	$y = -1.21x + 74.00$	0.09	0.00
相对湿度	-0.26**	0.00	$y = -0.63x + 97.80$	0.07	0.00
风速	-0.40**	0.00	$y = -11.59x + 81.70$	0.16	0.00
降水	-0.18**	0.00	$y = -9.81x + 50.10$	0.03	0.00

注:\*\*表示 0.01 水平上显著相关。

时,PM<sub>2.5</sub>浓度越低。一元线性拟合结果也反映出上述3个气象因子对PM<sub>2.5</sub>浓度的反向作用。

2)相对湿度 相对湿度与PM<sub>2.5</sub>浓度呈负相关关系( $P < 0.01$ ),表明相对湿度越大PM<sub>2.5</sub>浓度越低。根据已有研究成果看,相对湿度对PM<sub>2.5</sub>的影响极为复杂<sup>[17-19]</sup>。为进一步分析相对湿度与PM<sub>2.5</sub>的统计关系,本文采用相对湿度步长 = 1%、2%、5%对PM<sub>2.5</sub>浓度进行等步长统计,结果如图6所示,3类步长统计结果均显示相对湿度与PM<sub>2.5</sub>浓度呈非线性关系。步长越大,倒U型曲线关系越明显。具体地看,当相对湿度 < 45%时,相对湿度较低,PM<sub>2.5</sub>浓度波动较大,但图6(c)仍显示出PM<sub>2.5</sub>浓度随湿度增加而增加的趋势,表明此时增湿可促进颗粒物吸湿分解,加剧霾污染;当相对湿度介于45%~75%之间

时,PM<sub>2.5</sub>浓度持续保持高值或变化平稳,处于倒U型峰顶状态;直至相对湿度超过80%时,空气逐渐达到高湿环境,增湿带来PM<sub>2.5</sub>浓度稳定下降。

### 3.3 南通市区PM<sub>2.5</sub>浓度变化的驱动分析

从多元回归结果看(表4),进入回归方程的污染物因子系数排序为“PM<sub>10</sub> > CO > NO<sub>2</sub> > 0”,表明3种污染物的增加对PM<sub>2.5</sub>起加剧作用,其中PM<sub>10</sub>的影响最明显。而4个气象因子的系数排序为“相对湿度 > 0 > 降水 > 风速 > 温度”,其中温度、风速和降水3个指标的系数为负值,表明其增加对PM<sub>2.5</sub>浓度有降低作用。值得注意的是,相对湿度的系数为正值,这也反映了相对湿度对PM<sub>2.5</sub>的作用并不是简单的线性关系,增湿对于雾霾污染既有减弱作用也有加剧作用。

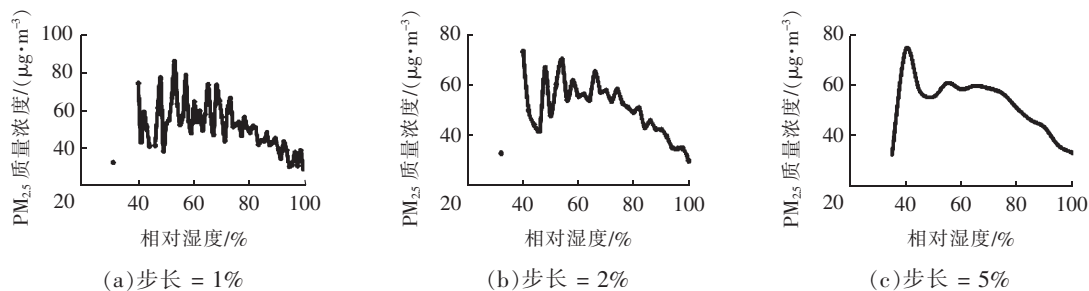


图6 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与相对湿度的不同步长统计关系

Fig. 6 Statistical relationship of PM<sub>2.5</sub> concentration and relative humidity based on different steps

表4 PM<sub>2.5</sub>与各因子之间的多元线性回归(逐步)

Tab. 4 Multiple linear regression of PM<sub>2.5</sub> with various factors (stepwise)

影响因子	标准化系数	t	P
PM <sub>10</sub> 质量浓度	0.81	63.51	0.00
SO <sub>2</sub> 质量浓度			
NO <sub>2</sub> 质量浓度	0.06	5.22	0.00
CO质量浓度	0.21	15.39	0.00
温度	-0.10	-11.30	0.00
相对湿度	0.13	14.36	0.00
风速	-0.06	-7.13	0.00
降水	-0.02	-2.04	0.04

#### 3.3.1 人类活动对PM<sub>2.5</sub>浓度的驱动

根据一次、二次细颗粒物形成过程可知:PM<sub>10</sub>等粗颗粒物主要来源于人类活动(如城市建设带来的扬尘、生物质燃烧等)的一次排放,湿度较大时,

这些粗颗粒物吸湿分解可形成细颗粒物<sup>[5,15]</sup>;SO<sub>2</sub>主要来自煤燃烧排放;NO<sub>2</sub>、CO主要来源于汽车尾气以及化石燃料等的不充分燃烧。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等在化学作用、光化学作用及臭氧的强氧化作用下,由气态污染物通过盐化过程转为硫酸盐、硝酸盐等颗粒物,形成二次颗粒物<sup>[5,15]</sup>。因此,人类活动释放的污染物是霾污染的物质来源和主导因素<sup>[5,12-14]</sup>。

2014—2018年是南通市快速发展的5年,根据南通市统计年鉴(2015—2019)可知:城市建成区面积从2014年的118 km<sup>2</sup>增至2018年底的232 km<sup>2</sup>;房地产开发施工面积每年平均为2 800万m<sup>2</sup>;城市地铁建设相继展开,城市建设活动丰富;2018年城市能源消耗达2 432万t标煤;机动车保有量195.65万辆;港口吞吐量达26 702万t。交通建设等给城市带来便利的同时,也带来较多污染物的释放;快速城市化导致人类活动多而集中;这是城市污染频发的主要原因。

### 3.3.2 气象因子对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的驱动

1) 温度和风速 温度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响主要体现在季节效应上。冬季、春初和秋末空气温度低,大气活动相对弱,风速小,污染物容易集聚并产生累积效应,当累积效应达到一定程度、遇到弱天气系统时,PM<sub>2.5</sub> 浓度持续增高便可能暴发为霾污染。而夏季、秋初、春末季节相反,温度较高,大气流动增强,空气易于流动和扩散,容易出现大风天气,霾污染暴发频率显著降低。

2014—2018年,南通冬季平均温度为 5.3℃,其中 47.8% 的日温度低于 5℃;进入 4—5月,气温上升至 10~20℃;夏季平均温度为 26.7℃,尤其是 8月平均气温高达 29℃;全年 40% 的日均温度超过 20℃。温度变化导致天气系统活动强度差异较大,冬、春、夏、秋四季的平均风速分别为 2.6, 3.1, 3.0 和 2.9 m/s, 1月风速最小。冬季的弱天气系统是城市雾霾污染频发的直接诱发因素,因此,每年的 11月开始,雾霾污染频率逐渐增加,持续到次年的 3—4月份,5—9月污染物浓度普遍较低。

2) 降水 降水主要通过湿沉降使细颗粒物加速沉降于地表。细颗粒物因为粒径小、重力小,可以长期持续滞留在大气中。降水可增加空气湿度,颗粒物附着在雨滴、雾滴和雪花等上面,这些水滴在自身重力的作用下携带颗粒物沉降,从而降低空气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度。南通市濒江临海,降水量大,市年均降水量约 1 300 mm, 其中春、夏、秋、冬四季分别占 17.8%、50.3%、21.3%、10.5%,夏季降水最多,冬季最少,因此冬季湿沉降作用对 PM<sub>2.5</sub> 的影响比夏天弱。

3) 相对湿度 根据 5 年数据统计,南通市全年平均相对湿度为 77%,夏季的平均相对湿度为 82%,这类极高湿环境可以促进颗粒物的湿沉降<sup>[17-19]</sup>,降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度。秋季的相对湿度仅次于夏季,平均为 79%。但冬季、春季的相对湿度分别为 73%、74%,这一湿度范围内,空气湿度的持续或微小增加均导致霾污染加剧,南通市冬季和春季的霾污染频发与其特定的湿度环境也关系密切<sup>[5, 12, 20]</sup>。

### 3.3.3 影响因子综合驱动

影响 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的因子多而复杂,PM<sub>2.5</sub> 浓度表现出的时空特征实际上是各类因子综合作用的结果。南通市区每日 24 时刻 PM<sub>2.5</sub> 浓度的双峰曲

线特征是人类活动和气象因子综合影响的体现。晨起,人们开始活动,准备早饭及上班,早班的交通高峰来临,污染物排放增多,而此时温度较低,大气活动弱,容易形成逆温,污染物在一定空间内不断积聚。随着太阳升起,光化学作用增强,温度逐渐升高,二次颗粒物形成速度加快,PM<sub>2.5</sub> 浓度升高,至上午 9:00 前后抵达第 1 个 PM<sub>2.5</sub> 浓度峰值。温度进一步升高,气流活动变强,风速增大,午间交通压力较小,污染物在一定程度上得以扩散,下午 3:00—4:00 达到一天中的浓度低谷。随着晚上下班后的交通高峰和人类户外活动的增多,污染物再次大量释放,此时空气温度下降,风速减小,大气相对稳定,颗粒物继续累积,加上晚 9:00 左右工业用电费用降低,工业活动持续,至晚 10:00 前后迎来一天中的第 2 个 PM<sub>2.5</sub> 浓度峰值。

另外,沿海的地理区位和亚热带季风气候,使得城市空气环境冬季受内陆影响大,夏季受海洋影响大,海洋性气流对 PM<sub>2.5</sub> 污染有一定减缓作用,南通市夏季和秋季的 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低即受此影响较大。当然,基于空气自身的流动性、扩散性和污染物的空间自相关性,南通市空气霾污染状况与周边城市密切相关。尤其是冬季,南通市主导风向为西北风,位于西北上风向的泰州市一直是长三角城市群中 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高的城市之一。尽管大风速一方面可促进细颗粒物扩散,但另一方面也可导致细颗粒物传输入境,这也是南通市冬季雾霾容易发生的原因之一。

## 4 结论

基于 2014—2018 年南通市区大气环境监测点发布的数据,分析了南通市区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的各种时间尺度变化特征及污染程度,得出以下结论:

1) 2014—2018 年,南通市区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度出现逐年递减的变化趋势,但仍超出污染限值标准,表明大气治理初见成效,仍需特别关注。冬季、秋末和春初是霾污染最易暴发的季节,不仅 PM<sub>2.5</sub> 浓度高,且每年一半以上的污染日都出现在这一时段。5 年平均看,上午 9:00 和晚间 10:00 左右是一天中 PM<sub>2.5</sub> 浓度的两个高峰时段;下午 4:00 前后是 PM<sub>2.5</sub> 浓度的低谷时段,污染相对最轻。

2) 无论是 PM<sub>2.5</sub> 浓度的“季节效应”还是一天中

的“双峰曲线”,都表明人类活动是造成雾霾污染的主要驱动力,尤其是建设活动排放的一次颗粒物与PM<sub>2.5</sub>的变化趋势密切相关。人们社会经济活动中释放的SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和CO等也对PM<sub>2.5</sub>的增加起重要促进作用。

3)弱天气系统可能是雾霾污染暴发的诱发条件,但是强降雨、大风天气也是“除霾”的有效条件。强对流天气对霾污染的“缘起缘散”仅起瞬时作用,从大气环境长期治理的角度看,仍需对人类活动中污染物的减排问题和土地利用的优化问题加以关注。

#### 参考文献:

- [1] NAEHER L P, HOLFORD T R, BECKETT W S, et al. Healthy women's PEF variations with ambient summer concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sup>+</sup>, and O<sub>3</sub>[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1999, 160(1):117-125.
- [2] JANSSEN N A H, FISCHER P, MARRA M, et al. Short-term effects of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> on daily mortality in the Netherlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464:20-26.
- [3] PUI D Y H, CHEN S C, ZUO Z L. PM<sub>2.5</sub> in China:measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. *Particuology*, 2014, 13:1-26.
- [4] CHENG Z, WANG S X, JIANG J K, et al. Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182:101-110.
- [5] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J].*中国科学:地球科学*, 2014, 44(1):15-26.
- [6] CHELANI A B. Estimating PM<sub>2.5</sub> concentration from satellite derived aerosol optical depth and meteorological variables using a combination model[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(3):847-857.
- [7] HU J L, WANG Y G, YING Q, et al. Spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95:598-609.
- [8] YAN D, LEI Y L, SHI Y K, et al. Evolution of the spatiotemporal pattern of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China;a case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 183:225-233.
- [9] WU J B, XU J M, PAGOWSKI M, et al. Modeling study of a severe aerosol pollution event in December 2013 over Shanghai China:an application of chemical data assimilation [J]. *Particuology*, 2015, 20:41-51.
- [10] 张雨梦,钱鹏,查书平. 南京市一次大气污染事件时空演化特征及影响因素[J]. *南通大学学报(自然科学版)*, 2018, 17(4):48-55.
- [11] TAN J H, DUAN J C, ZHEN N J, et al. Chemical characteristics and source of size-fractionated atmospheric particle in haze episode in Beijing[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167:24-33.
- [12] LOU C R, LIU H Y, LI Y F, et al. Socioeconomic drivers of PM<sub>2.5</sub> in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(10):928.
- [13] 江琪,王飞,张恒德,等. 北京市PM<sub>2.5</sub>和气态前体物相关关系分析[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(4):77-84.
- [14] ZHANG Y, SHUAI C Y, BIAN J, et al. Socioeconomic factors of PM<sub>2.5</sub> concentrations in 152 Chinese cities:decomposition analysis using LMDI[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218:96-107.
- [15] LOU C R, LIU H Y, LI Y F, et al. Relationships of relative humidity with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11):582.
- [16] 张淑平,韩立建,周伟奇,等. 冬季PM<sub>2.5</sub>的气象影响因素解析[J]. *生态学报*, 2016, 36(24):7897-7907.
- [17] SUN R H, CHEN A L, CHEN L D, et al. Cooling effects of wetlands in an urban region:the case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20:57-64.
- [18] 崔丽娟,康晓明,赵欣胜,等. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(1):212-218.
- [19] 朱春阳,曾元梓,陈奕汝,等. 城市湖泊湿地对空气PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>的影响:以武汉为例[J]. *中国园林*, 2016, 32(11):88-93.
- [20] LIU Z R, HU B, ZHANG J K, et al. Characteristics of aerosol size distributions and chemical compositions during wintertime pollution episodes in Beijing[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168:1-12.

(责任编辑:张燕)