

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2020.01.020

## 2015—2016 年安徽省 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10-2.5}$ 时空分布特征

裘 阅, 汪家权, 胡淑恒

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**为准确分析安徽省空气中致霾颗粒物(particulate matter, PM)的时空分布特点,文章对 2015—2016 年安徽省 16 个地级市环境空气监测数据  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10-2.5}$  按周、月、季、年均值进行了统计分析及横纵对比,结果表明:2016 年安徽省  $PM_{10-2.5}$  和  $PM_{2.5}$  年均质量浓度分别为  $24.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,相比上年有小幅下降,整体未出现持续恶化的局面,同时颗粒物在不同时间尺度上表现出了星期效应、月度规律和季节特征;利用 ArcGIS 和 SPSS 等分析统计软件,基于地形地貌特征获得了安徽省颗粒污染物的空间分布格局,解析了颗粒物与其他空气质量指数的相互关系。研究结果有利于从不同时空尺度辨析安徽省大气颗粒物污染的多变特征,为长三角区域颗粒物污染联防联控提供参考。

**关键词:** $PM_{2.5}$ ;  $PM_{10-2.5}$ ; 时空分布; 安徽省

中图分类号:X823

文献标识码:A

文章编号:1003-5060(2020)01-0113-06

## Spatial-temporal distribution of $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$ in Anhui Province, 2015-2016

QIU Yue, WANG Jiaquan, HU Shuheng

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to accurately analyze the spatial-temporal distribution of the particulate matter (PM) which caused haze in Anhui Province, a comprehensive statistical analysis and horizontal and vertical comparison were made on the weekly, monthly, seasonal and annual average values of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10-2.5}$  of state-controlled sites from 16 cities during 2015 and 2016 in Anhui Province. The annual average concentrations of  $PM_{10-2.5}$  and  $PM_{2.5}$  of Anhui Province were  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in 2016, respectively, showing a slight decrease compared with the previous year. There has been no continuous deterioration in the overall situation. They show different week effects, monthly regularities and seasonal features on different time scales. The spatial distribution of PM in Anhui Province was obtained based on topographical characteristics by using ArcGIS and SPSS analysis and statistical software. Meanwhile, the correlation between particulate matter and other air quality indices was explored. The results are helpful to distinguish the variable features of atmospheric particulate pollution in Anhui Province from different time scales and spatial scales, and provide a reference for the decision-making of joint prevention and control of the particulate pollution in the Yangtze River Delta.

**Key words:**  $PM_{2.5}$ ;  $PM_{10-2.5}$ ; spatial-temporal distribution; Anhui Province

收稿日期:2018-01-16;修回日期:2018-04-11

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2014BAC22B06)

作者简介:裘 阅(1993—),女,浙江舟山人,合肥工业大学硕士生;

汪家权(1957—),男,安徽太湖人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通讯作者, E-mail: jiaquan.wang@163.com.

## 0 引言

不同粒径的大气颗粒污染物经累积导致的健康损害直接关系到城市人群健康,寻找治理空气颗粒物污染的切入口,是创造绿色健康生活的起点。空气中粒径在  $10\ \mu\text{m}$  以上的颗粒物(particulate matter, PM)无法进入人体内部,粒径小于或等于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物能够进入人体并产生不利影响,并将其表示为  $\text{PM}_{10}$ <sup>[1]</sup>。粒径小于或等于  $2.5\ \mu\text{m}$  的颗粒物表示为  $\text{PM}_{2.5}$ ,称其细颗粒<sup>[2]</sup>。细颗粒物的直径还不到人头发丝粗细的  $1/20$ ,进入人体后会引发包括哮喘、支气管炎和心血管病等方面的疾病<sup>[3]</sup>,对人体健康的伤害很大。粒径在  $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$  之间的颗粒物表示为  $\text{PM}_{10-2.5}$ <sup>[4]</sup>,称其粗颗粒物,能够进入上呼吸道,但部分可通过痰液等排出体外,对人体健康危害相对较小。

随着社会经济的快速发展,我国大气污染呈现出明显的区域性特征,区域复合型大气污染成为我国今后一段时期所面临的主要大气污染问题<sup>[5]</sup>。近年来长三角区域雾霾频频发生,安徽省地处长三角区块,与长三角空气质量息息相关,因此研究安徽省的大气颗粒污染物的现状和发展趋势,对长三角乃至其他各个省市颗粒物污染治理都有指导和参考意义。文献[6]对安徽省 1968—2007 年霾的时空分布特征、变化趋势进行了分析,并探讨了霾变化的成因;文献[7]利用空气污染综合指数和 spearman 秩相关系数法得出安徽省 1999 年空气质量的优劣及变化趋势。

安徽省空气质量存在一定程度的南北空间差异,各地级市的空气质量整体呈现出随时间而提高的趋势<sup>[8]</sup>。目前关于安徽省空气质量的研究评价较多,但对于安徽省大气颗粒污染物较为系统的研究较少,本文对安徽省各地级市的颗粒物监测数据进行整理与分析,以期获得安徽省各地级市颗粒物的时空分布情况。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源及处理

本文  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  监测数据通过安徽省环境监测站内部获取,包括 2015 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日安徽省 16 个城市(合肥、淮北、亳州、宿州、蚌埠、阜阳、淮南、滁州、六安、马鞍山、宣城、芜湖、铜陵、池州、安庆、黄山)环境空气质量数据中的  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  日平均质量浓度,城市位置如图 1 所示。

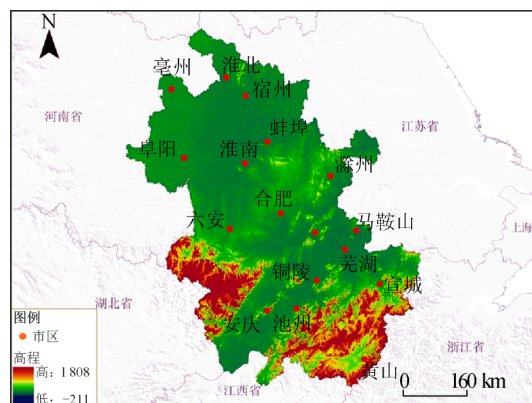


图 1 安徽省各市地理位置图

$\text{PM}_{10-2.5}$  日平均质量浓度是通过  $\text{PM}_{10}$  日平均质量浓度减去  $\text{PM}_{2.5}$  日平均质量浓度得来的,计算公式为:

$$\rho(\text{PM}_{10-2.5}) = \rho(\text{PM}_{10}) - \rho(\text{PM}_{2.5}) \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为平均质量浓度。

从理论上来说,监测的  $\text{PM}_{10}$  应该包含  $\text{PM}_{2.5}$ ,因此  $\text{PM}_{10}$  的平均质量浓度应该大于  $\text{PM}_{2.5}$  的平均质量浓度,得到的  $\text{PM}_{10-2.5}$  平均质量浓度应该为正值。但从实际监测数据来看,会出现  $\text{PM}_{2.5}$  的平均质量浓度高于  $\text{PM}_{10}$  的情况,从而出现计算  $\text{PM}_{10}$  日均值会小于  $\text{PM}_{2.5}$  的日均值,即“ $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  倒挂”。此现象在美国等其他国家的监测结果中时常发生,主要由监测原理监测仪器的不同和监测环境的影响引起<sup>[9]</sup>,因此在后期数据处理时会把  $\text{PM}_{10-2.5}$  中的倒挂数据剔除。

### 1.2 研究方法

利用 Excel 数据透视表对  $\text{PM}_{10-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  日均值数据进行统计,换算成周、月、季和年均值进行分析比较,并用 SPSS19.0 软件分别对 16 个地级市  $\text{PM}_{2.5}$  值进行聚类分析以及对各空气质量指标之间进行相关性分析,采用 ArcGIS 的 Kriging 插值法绘制安徽省年度  $\text{PM}_{10-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  分布图,并进行空间分析。从而对 2015—2016 年安徽省各地市  $\text{PM}_{10-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  周、月、季、年均值进行了全面的统计分析及横向、纵向对比,得出安徽省颗粒物污染的时空分布规律,并从多方面分析造成其规律性变化的成因。

## 2 结果分析

### 2.1 $\text{PM}_{10-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间分布特点

#### 2.1.1 $\text{PM}_{10-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的星期效应

安徽省各市颗粒物污染表现出星期效应,如图 2 所示。统计并计算安徽省 2015—2016 年

PM<sub>2.5</sub> 日均值数据中星期一至星期日的平均值,该平均值从大到小依次为:星期一/星期五、星期六、星期日、星期四、星期二、星期三,16 个地级市基本符合这一规律,其中,黄山市 PM<sub>2.5</sub> 值最优,池州次之,宿州最差,如图 2a 所示,图 2a 中数据为 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度,单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。安徽省 2015—2016 年 PM<sub>10-2.5</sub> 日均值数据从大到小依次为:星期四/星期五/星期六/星期日/星期一、星期二/星期三,数值基本接近,16 个地级市也基本与此规律相符,其中黄山最优,六安次之,淮南最差,如图 2b 所示。图 2b 中数据为 PM<sub>10-2.5</sub> 的质量浓度,单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。比较图 2a 和图 2b 发现 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10-2.5</sub> 的星期效应并不相同。

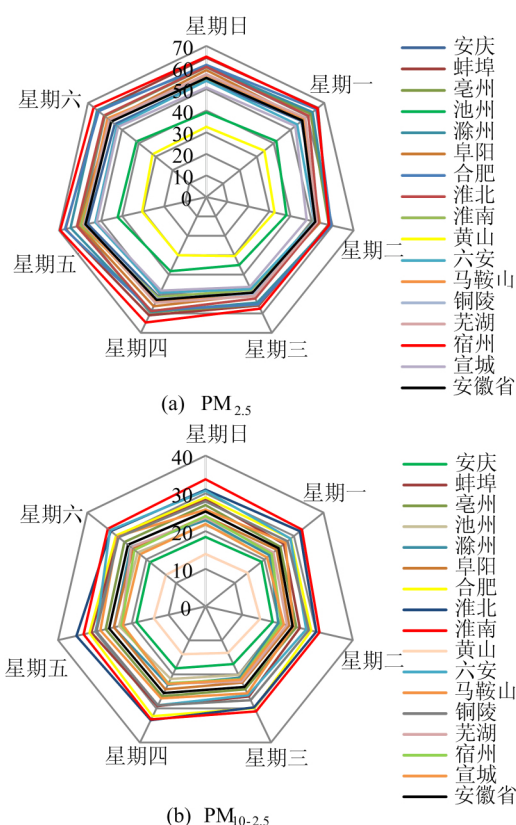


图 2 安徽省各市颗粒物污染的星期效应

PM<sub>2.5</sub> 的人为源包括固定源和流动源。固定源主要包括各种燃料燃烧源,如发电、冶金、石油、化学、纺织印染等各种工业过程和供热、烹调过程中燃煤与燃气或燃油排放的烟尘;流动源主要是各类交通工具在运行过程中使用燃料时向大气中排放的尾气。安徽省工业生产和生活排污<sup>[10]</sup>相对比较固定,对大气排放的 PM<sub>2.5</sub> 较为稳定,空气中 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化主要受流动源的影响。据安徽省统计局发布《2016 年安徽省国民经济和社会发展统计公报》,全省民用汽车拥有量  $598.1 \times$

$10^4$  辆,比上年增长 16.7%,每 11.7 人拥有 1 辆车,可见汽车是较为主要的交通出行工具。由图 2a 可知,星期一和星期五的 PM<sub>2.5</sub> 值较高,这主要受交通流动源影响,星期一、星期五比星期二至星期四交通拥堵,长期生活经验表明由于星期一、星期二是住校学生往返学校和长途上班族往返单位的高峰日<sup>[11]</sup>,市民通过小汽车出行接送学生和上班比较普遍;其次,周末景区爆满的社会现象表明周末放假有较大一部分市民选择出游,大规模的出行引起交通量增加,导致周末的 PM<sub>2.5</sub> 值相对较高,而星期二、三、四的交通出行量相对星期一、二小,产生的尾气自然少一些,对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献相对较低。总体上,PM<sub>10-2.5</sub> 的星期效应较不明显,7 d 的数值较为接近,表明粗颗粒物体的来源比较稳定,受流动源的影响较小。

### 2.1.2 PM<sub>10-2.5</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的月度规律

安徽省的 PM<sub>2.5</sub> 月度变化呈现显著的“U”型变化规律,但黄山市“U”型特征不是很显著,整体质量浓度偏低,月度差异较小,这主要与当地优良的空气质量密不可分,如图 3 所示。安徽省整体在 7 月份 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度最低,12 月份质量浓度最高。一年之中,1—7 月份 PM<sub>2.5</sub> 值总体呈现下降的趋势,从 7—12 月份总体呈现上升的趋势,具有较强的规律性。

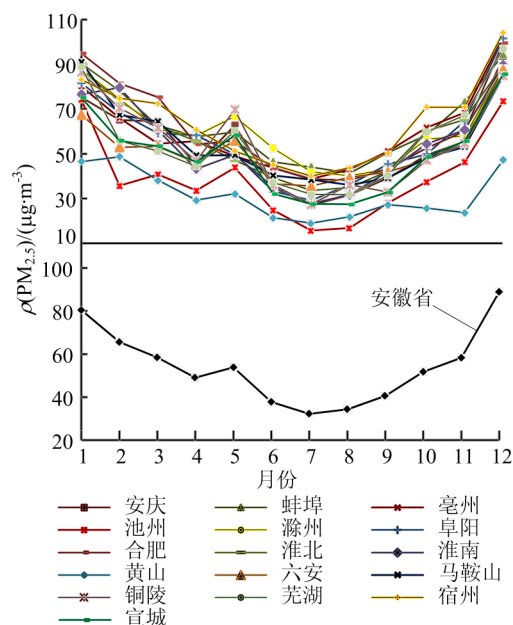


图 3 安徽省各市 PM<sub>2.5</sub> 污染的月度变化

安徽省的 PM<sub>10-2.5</sub> 污染的月度变化如图 4 所示,从图 4 可以看出,月度变化并没有呈现出显著的“U”型变化规律,但前 5 个月有小幅度的上升,从 5—7 月份有一个较大的下降幅度,7 月份达到

最低值,从 7—12 月份出现明显的上升趋势,12 月份达到最高值。最高值与最低值的月份与  $PM_{2.5}$  完全一样,这说明不管粗颗粒物还是细颗粒物都有月度变化规律,表现出最优月份和最差月份。在污染物较为严重的月份要做好相应的防范措施,从而有效控制和降低雾霾发生的概率。

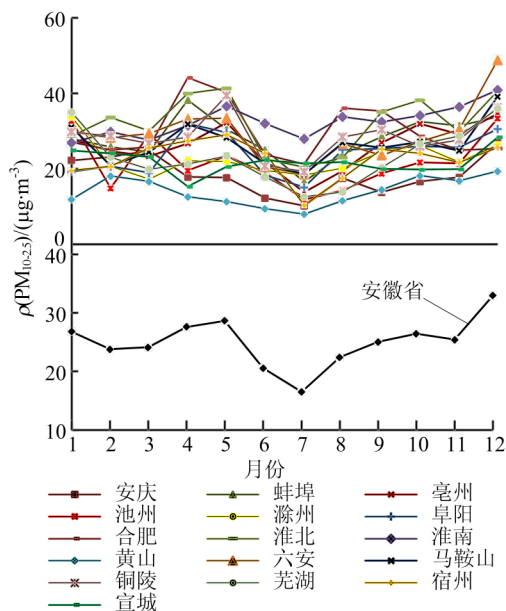


图 4 安徽省各市  $PM_{10-2.5}$  污染的月度变化

### 2.1.3 $PM_{10-2.5}$ 、 $PM_{2.5}$ 的季节差异

在气象部门,通常以 3—5 月份为春季,6—8 月份为夏季,9—11 月份为秋季,12 月—翌年 2 月份为冬季,并且常将 1、4、7、10 月份作为冬、春、夏、秋季的代表月份。安徽省各市颗粒物污染的季节变化如图 5 所示,从图 5a 可看出, $PM_{2.5}$  随着季节的变化具有明显的波峰和波谷, $PM_{2.5}$  质量浓度从大到小依次为冬季、春季、秋季、夏季。由此可见  $PM_{2.5}$  受季节的影响较大,图中 2015 年和 2016 年浅色区夏季出现明显的 2 个波谷,在深色区冬季出现了明显的波峰,夏季降雨充沛,空气中的  $PM_{2.5}$  将受到降雨的影响使其质量浓度明显降低,而秋冬季节,大量的秸秆焚烧和烟花爆竹的燃放以及冬季供暖需求产生的废气较多,加上受下沉气流控制,经常受到逆温层的影响,且冬季少雨干燥,致使空气流动较少污染物无法快速扩散,导致冬季的  $PM_{2.5}$  值居高不下,雾霾天气频发。从图 5b 可以看出,各城市的  $PM_{10-2.5}$  值基本沿着安徽省质量浓度上下均匀稳定波动,波动幅度较小,但存在个别城市春冬波动较大,总体上也受到季节的影响,夏季质量浓度较低,总体变化趋势稳定。比较图 5a 和 5b 可以得出, $PM_{2.5}$  受季节影响

较大,而  $PM_{10-2.5}$  受季节影响稍小。

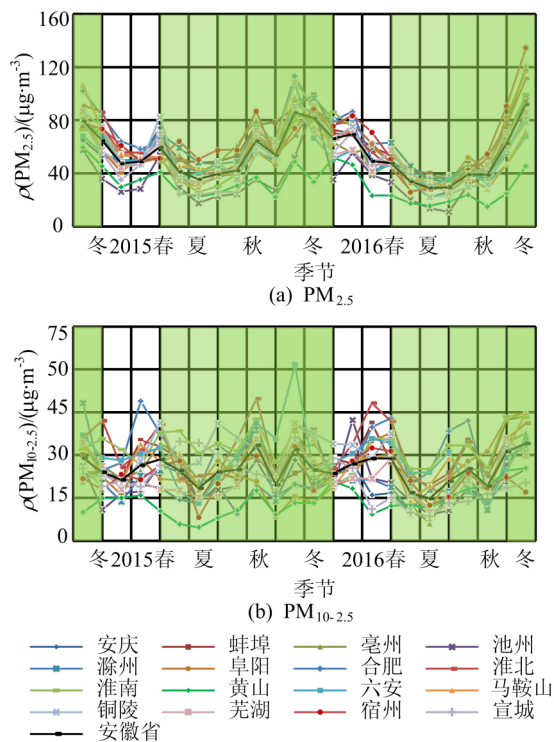
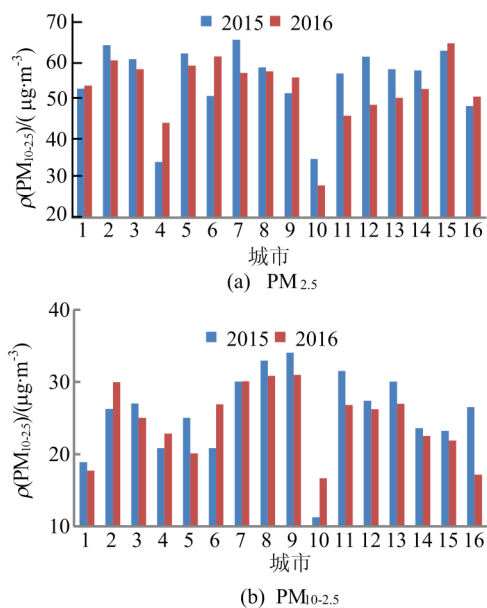


图 5 安徽省各市颗粒物污染的季节变化

### 2.1.4 $PM_{10-2.5}$ 、 $PM_{2.5}$ 的年度变化

安徽省各地级市微颗粒物污染年度变化如图 6 所示。



1. 安庆 2. 蚌埠 3. 亳州 4. 池州 5. 滁州 6. 阜阳 7. 合肥 8. 淮北 9. 淮南  
10. 黄山 11. 六安 12. 马鞍山 13. 铜陵 14. 芜湖 15. 宿州 16. 宣城

图 6 安徽省各地级市颗粒物污染的年度变化

安徽省颗粒物从 2015—2016 年整体呈现下降的优良态势,2016 年全省  $PM_{2.5}$  年均质量浓度



为  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 高于全国 338 个地级及以上城市平均值 ( $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。PM<sub>2.5</sub> 从 2015 年的  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  下降到 2016 年的  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 降幅 3.6%, PM<sub>10-2.5</sub> 从  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  下降到  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 降幅 4%, 虽然下降不显著, 但至少颗粒物污染没有持续恶化。其中, 安庆、池州、阜阳、淮南、宿州 5 个城市 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度有所上升, 其余 11 个城市的 PM<sub>2.5</sub> 均有一定程度的下降。蚌埠、池州、阜阳、黄山这 4 个城市的 PM<sub>10-2.5</sub> 值有所上升, 其余 12 个城市 PM<sub>10-2.5</sub> 持平或下降。

## 2.2 PM<sub>10-2.5</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的空间分布特点

地形地貌是影响安徽省颗粒物的另外一个重要原因<sup>[12]</sup>, 安徽省地处全国的中部地区, 从南向北可划分为皖南山区、江淮丘陵和皖北平原 3 个地形单元。各市颗粒物污染的地理分布如图 7 所示。

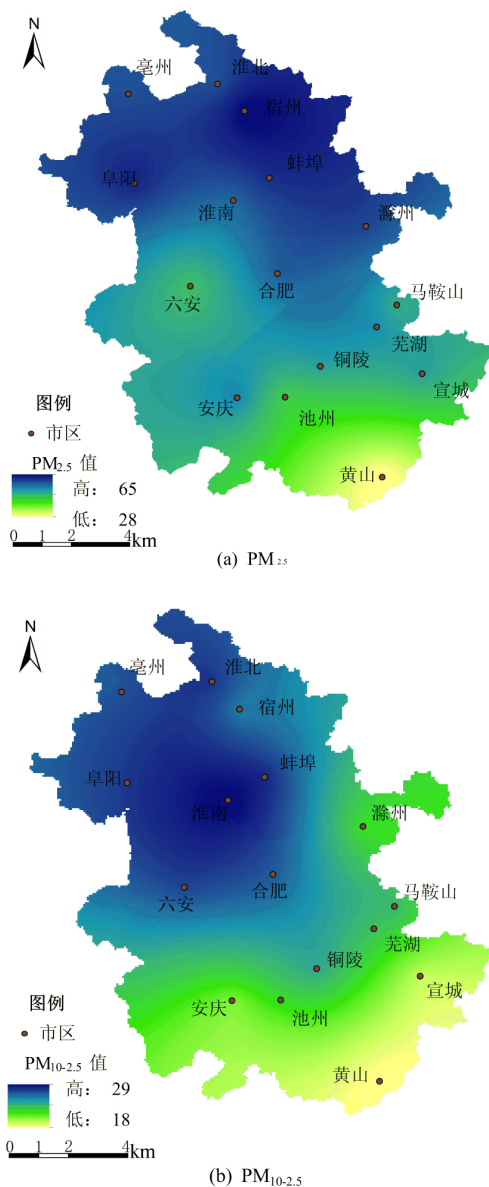


图 7 安徽省各市颗粒物污染的地理分布规律

从图 7 可以看出, 黄山、安庆、池州等市的颗粒物质量浓度较低, 另外六安位于大别山腹地, 素有“七山一水、两分田”的美称, 植被覆盖率也较好, 因此 PM<sub>2.5</sub> 较低; 而皖北地区以平原为主, 对于近地面大气环流的阻碍较弱, 使得受到北部空气影响较大, 经常受到重污染天气输送影响; 江淮地区主要以低山丘陵为主, 大气环流季节变化明显, 尤其在春秋季节容易形成逆温, 在一定程度上降低了大气环流对污染物扩散作用。因此皖北地区和江淮地区的颗粒物质量浓度要高于皖南山区, 呈现出“北高南低”的地理质量浓度特征。

为了进一步比较安徽省颗粒物的空间差异, 对 16 个地级市的 PM<sub>2.5</sub> 月均值借助 SPSS19.0 软件基于 ward 法进行城市之间的聚类分析, 结果如图 8 所示。基于 PM<sub>2.5</sub> 月均质量浓度聚类树形图, 结合各城市地理位置, 大致可以将全省划分成 4 个颗粒物污染城市群, 分别是以合肥为中心 1+3 城市群, 包括蚌埠、合肥、滁州和马鞍山; 以淮北为中心 1+2 城市群, 包括亳州、淮北和宿州; 以六安和安庆串联的 2+5 城市群, 包括六安、安庆、淮南、阜阳、铜陵、芜湖和宣城; 以及池州和黄山 2 个城市组成的城市群。

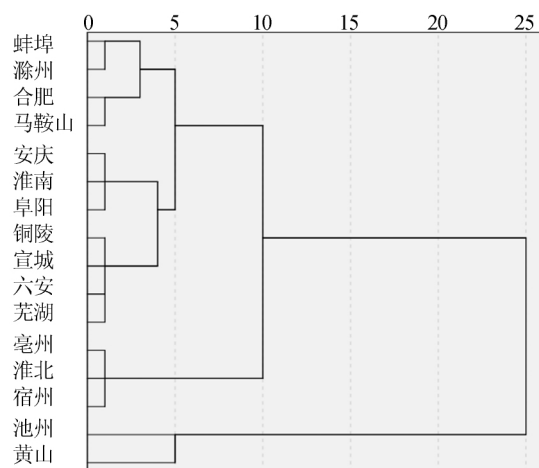


图 8 城市 PM<sub>2.5</sub> 聚类树形图

## 2.3 PM<sub>10-2.5</sub>、PM<sub>2.5</sub> 与其他空气质量指数的关系

为探讨安徽省颗粒物与其他空气质量指数的关系, 本文利用 SPSS19.0 中的 spearman 相关系数, 基于 16 个地级市的 PM<sub>10-2.5</sub>、PM<sub>2.5</sub> 月均值与其他空气质量指数 (包括取整 SO<sub>2</sub> 平均质量浓度, 取整 NO<sub>2</sub> 平均质量浓度, 取整 PM<sub>10</sub> 平均质量浓度, 取整 CO 95 百分位, 取整 O<sub>3-8H</sub> 90 百分位) 进行相关关系分析, 结果见表 1 所列。由表 1 可

知,  $PM_{10-2.5}$  与  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $CO$  成正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 其中与  $PM_{10}$  呈现较强相关关系,  $PM_{10-2.5}$  与  $O_{3-8H}$  弱相关 ( $P < 0.05$ );  $PM_{2.5}$  与  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $CO$  成正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 且与  $PM_{10}$  呈现强相关关系, 与  $NO_2$ 、 $CO$  呈现较强相关性关系, 与  $O_{3-8H}$  呈现较强负相关关系 ( $P < 0.01$ )。由此可见,  $PM_{2.5}$  和各空气质量指数相互影响较大。

表 1  $PM_{10-2.5}$ 、 $PM_{2.5}$  与其他空气质量指数相关系数分析

指标	$SO_2$	$NO_2$	$PM_{10}$	$CO$	$O_{3-8H}$
$PM_{10-2.5}$	0.220**	0.306**	0.658**	0.285**	0.108*
$PM_{2.5}$	0.460**	0.600**	0.945**	0.629**	-0.371**

注: 相关性用 spearman 相关系数表示; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

### 3 结 论

本文基于安徽省 2015—2016 年的 16 个地级市的空气监测数据, 探讨了颗粒物  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10-2.5}$  的时空分布特征及其与其他空气质量指数之间的相关关系, 得出以下结论:

(1)  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10-2.5}$  在时间序列上有明显的规律特征<sup>[13]</sup>,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10-2.5}$  年平均值有小幅度的下降, 在季节分布和月度分布上,  $PM_{2.5}$  呈现出季节性规律, 从大到小依次为冬季、春季、秋季、夏季,  $PM_{10-2.5}$  季节变化不大, 但夏季最优;  $PM_{2.5}$  月度变化呈现“U”型变化特征, 而  $PM_{10-2.5}$  在 7 月份达到最低值。2a 年内  $PM_{2.5}$  呈现出了一定的星期效应, 从大到小依次为星期一/星期五、星期六、星期日、星期四、星期二、星期三, 受流动源影响较显著, 而  $PM_{10-2.5}$  星期效应较不明显。

(2)  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10-2.5}$  在空间上的差异主要受到安徽省地形地貌特征的影响, 皖北地区和江淮地区的颗粒物质量浓度要高于皖南山区, 呈现出“北高南低”的地理质量浓度特征。全省大气污染呈现典型的区域分布特征, 可划分成 4 个大气污染城市群, 分别是以合肥为中心 1+3 城市群, 包括蚌埠、合肥、滁州和马鞍山; 以淮北为中心 1+2 城市群, 包括亳州、淮北和宿州; 由六安和安庆串联的 2+5 城市群, 包括六安、安庆、淮南、阜阳、铜陵、芜湖和宣城; 以及池州和黄山 2 个城市组成的

城市群。

(3) 安徽省颗粒物的污染受到其他空气质量指数的影响,  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  呈现强相关关系, 与  $NO_2$ 、 $CO$  呈现较强相关性关系 ( $P < 0.01$ ), 与  $O_{3-8H}$  呈现较强负相关关系 ( $P < 0.01$ )。  $PM_{10-2.5}$  与  $PM_{10}$  呈现强相关关系, 与其他指标相关性较低。

传统产业不断在改型升级, 致使安徽省空气污染类型由煤烟型逐渐向颗粒物区域复合型污染转变, 颗粒物对人体健康影响不容小觑, 因此做好颗粒物的防范治理是当下热门研究问题之一。

### [参 考 文 献]

- [1] BIGI A, GHERMANDI G. Long-term trend and variability of atmospheric  $PM_{10}$  concentration in the Po Valley[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014, 14(10): 4895-4907.
- [2] 曹军骥.  $PM_{2.5}$  与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 14-45.
- [3] 夏艺, 范丽, 管宇, 等. 环境空气  $PM_{2.5}$  与肺部疾病关系的进展[J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(7): 993-996.
- [4] BIGI A, GHERMANDI G. Trends and variability of atmospheric  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10-2.5}$  concentration in the Po Valley, Italy[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2016, 16(24): 1-19.
- [5] 程进. 长三角城市群大气污染格局的时空演变特征[J]. 城市问题, 2016(1): 23-27.
- [6] 张浩, 谢伟, 石春娥, 等. 安徽省霾天气变化特征及影响因素[C]//中国气象学会年会大气成分与天气气候及环境变化分会场. [S. l. : s. n.], 2009: 53-59.
- [7] 韩福敏. 安徽省城市空气质量状况评价[J]. 黑龙江环境通报, 2001, 25(4): 55-57.
- [8] 吕鑫, 郝连秀, 郭庆彪. 安徽省空气质量时空分布特征分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(12): 144-147.
- [9] 刘晓蓉. 试析环境空气监测中  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  监测数据的“倒挂”现象[J]. 工程技术(全文版), 2016(8): 240.
- [10] 黄亚林, 刘超, 曾克峰, 等. 2013—2014 年武汉市  $PM_{2.5}$  的时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1330-1335.
- [11] 徐佳妮. 城市公共交通拥堵治理研究[D]. 上海: 华东政法大学, 2016.
- [12] 王传兵. 安徽省空气质量时空演变特征研究[J]. 合肥师范学院学报, 2015, 33(5): 69-75.
- [13] 王飞, 韩业林, 赵颖. 太原市大气颗粒物  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  多时间尺度变化规律研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1521-1528.

(责任编辑 马国锋)