

Temporal-Spatial Trends of Atmospheric Air Pollution of Anhui Province within the First Quarter of 2015-Based on the Analysis of Daily Average Concentrations

Xiufeng Ni¹, Haojie Dai¹, Zhao Wei¹, Shuchuan Peng^{1,2}, Tianhu Chen^{1,2}, Jizhong Wang^{1,2*}

¹School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

²Laboratory for Nanomineralogy and Environmental Material, Hefei University of Technology, Hefei Anhui
Email: *wangjzh@hfut.edu.cn

Received: Jan. 28th, 2017; accepted: Feb. 14th, 2017; published: Feb. 20th, 2017

Abstract

Hourly ambient observation data of the first quarter of 2015 were collected from 68 air quality monitoring stations in prefecture-level cities of Anhui Province to investigate the temporal-spatial trends and potential influence factor of daily average on PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO and O₃ concentrations. Air quality index (AQI) indicates that the overall air quality level in Anhui Province is dominantly good to moderate throughout the first quarter of 2015. Daily average concentrations were estimated at 68.7 ± 38.2 μg/m³ for PM_{2.5}, 94.5 ± 47.6 μg/m³ for PM₁₀, 25.6 ± 19.0 μg/m³ for SO₂, 30.1 ± 18.6 μg/m³ for NO₂, 1.23 ± 0.74 mg/m³ for CO and 42.1 ± 24.8 μg/m³ for O₃, respectively, and they fitted lognormal distribution. The air quality was predominantly impacted by fine particle (PM_{2.5}) with one third of daily average PM_{2.5} concentration over second-class threshold under national air quality standards. With the increasing of precipitation and surface temperature, atmospheric contaminants (except for O₃) concentrations appeared a decreasing trend from January to March, while the concentration of O₃ in January was significantly lower than those in February and March. Air quality of the cities with significant development of industry and mining including Bengbu, Bozhou, Tongling, Fuyang, Huainan, Suzhou, Hefei, Maanshan and Huaibei was more seriously polluted compared to other cities, and Chizhou and Huangshan cities were observed with the least pollution.

Keywords

Atmospheric Contaminants, PM_{2.5}, Correlation Analysis, Temporal-Spatial Trends, Anhui Province

*通讯作者。

安徽省2015年第一季度大气污染物 日均变化规律

倪秀峰¹, 戴豪杰¹, 韦 钊¹, 彭书传^{1,2}, 陈天虎^{1,2}, 王继忠^{1,2*}

¹合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥

²合肥工业大学纳米矿物与环境材料实验室, 安徽 合肥

Email: *wangjizh@hfut.edu.cn

收稿日期: 2017年1月28日; 录用日期: 2017年2月14日; 发布日期: 2017年2月20日

摘 要

本研究收集了安徽省16个地级市68监测站点的AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃逐时数据, 通过统计分析探讨了大气污染物日均值时空变化规律和影响要素。结果显示安徽省2015年第一季度空气质量以优良天气为主, PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃的日均值分别为 $68.7 \pm 38.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $94.5 \pm 47.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $25.6 \pm 19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $30.1 \pm 18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.23 \pm 0.74 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $42.1 \pm 24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 且呈对数正态分布。PM_{2.5}超标严重, 近1/3日均值超过二级限值。随温度和降雨量增加, 大气污染物(除O₃)均出现1至3月逐渐下降趋势, 但O₃呈现1月低于2和3月。以工矿业为主的城市(蚌埠、亳州、铜陵、阜阳、淮南、宿州、合肥、马鞍山和淮北)大气污染较为严重, 而其它城市污染较轻, 尤其皖南的池州和黄山污染最轻。

关键词

大气污染物, PM_{2.5}, 相关性分析, 时空分布, 安徽省

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气污染严重危害公共安全、工农业生产和人体健康, 甚至带来了全球气候变化问题。例如研究发现大气颗粒物污染不仅会导致呼吸系统疾病[1], 还会对心血管疾病[2]和死亡[3]产生影响, 同时近期研究亦表明, 大气污染可明显影响城市气温升高[4]和全球变化[5]。大气污染存在明显的时空差异性, 而这种差异性不仅取决于污染源的排放情况, 也与当时的气象因素息息相关。一般而言, 大气污染物来源包括固定源和移动源, 同时亦可分为直接排放的一次污染物和在大气中发生反应而生成的二次或多次污染物[6]。由于不同区域人为活动和社会经济发展程度存在差异性, 因此污染物排放和控制治理水平差异较大, 从而导致污染物排放具有时空差异性[7]。气象因素是影响污染物时空分布的另一个重要因素, 比如气温、气压、降雨和光照等因素都能影响污染物的扩散和残留时间[8]。同时由于气象条件的不同, 光化学反应不同, 从而导致污染物组成特征和成分不同[9]。例如研究表明, 气温增加可明显导致二次气溶胶的形成[10]。

近年来,我国以灰霾为主要形式的大气污染频繁发生,从传统的京津冀和华北地区逐步延伸到华东、华中以及华南地区[11],而灰霾污染中又以细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物[12],这使得大气污染引起了广泛关注。2012年我国颁发了新的环境空气质量标准(GB3095-2012) [13],并实时公布全国190多个城市945个在线连续监测系统的观测数据,填补了先前缺乏的高密度地面大气监测数据。这些监测数据的公布对于认识当地大气污染的时空分布及其来源具有重要的意义。然而,目前针对全国各地大气污染物的特征和机理的认识存在较大差异,一方面大尺度下研究我国大气污染的时空变化特征[11][14]缺乏对特定局部区域污染的认识,另一方面,相对于大城市如北京、上海、广州等地方,二线及以下城市的研究相对缺乏。

安徽位于华东地区,为典型的人口密集、近年来社会经济发展相对快速的省份之一,大气质量亦呈现逐年恶化状况,尤其近年来多次出现特大型雾霾天气。但对于安徽省的大气污染研究相对缺乏[15]。因此本研究在充分利用安徽省16个地级市68监测站点发布的实时监测数据,采用统计分析方法探讨大气污染物污染特征和时空变化规律,以期对安徽省大气污染控制和减排工作提供借鉴。

2. 数据收集和分析

2.1. 研究区域介绍

安徽省(东经114°54'~119°37',北纬29°41'~34°38')地跨长江和淮河,与江苏、江西、浙江、湖北、河南和山东接壤,土地面积13.94万平方公里,约占全国土地面积1.45%,由16个行政地级市组成,据统计2014年共计常住人口为6000万[16]。按地形地貌划分,全省可分成淮河流域平原区、江淮台地丘陵区、皖西丘陵山地区、沿江平原区、皖南丘陵山地五个地貌区。气候上属于暖温带与亚热带的过渡地区,多年年平均气温为14℃~17℃,呈现1月份平均气温最低、7月份气温最高的特点,且年平均降水量在773~1670毫米,有南多北少,山区多、平原丘陵少的特点,夏季降水丰沛,占年降水量的40%~60% [17]。

改革开放以来,当地经济有了快速发展,2014年全省GDP总值达20,000亿元以上,人均GDP超过34,000元[16],其中第一、二和三产业分别占GDP总值的11.4%、53.1%和35.4%,安徽省正从传统的农业大省逐渐转变到工业第三产业主导的省份。随着社会发展,当地环境污染问题逐渐严峻,尤其近年来以雾霾为主要污染特征的环境问题尤为突出[15]。

2.2. 数据来源

本次研究数据来源于网络平台提供(<http://www.pm25x.com/city/hefei.htm>),共收集了全省16个地级市68个监测站点2015年1月1日0:00~3月31日23:00第一季度内空气质量指数(AQI)和6个污染物指标包括PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃的逐时数据,其中各市站点数分别为安庆市4个、蚌埠市6个、亳州市2个、池州市3个、滁州市3个、阜阳市3个、合肥市10个、淮北市3个、淮南市6个、黄山市3个、马鞍山市5个、铜陵市6个、芜湖市4个、宣城市3个和宿州市3个。

2.3. 数据分析和处理

所有数据按日期进行日均值计算,记录标准为某一站点一天24h某一污染物有效数据大于18个后方计算该天日均值浓度,否则作为缺失数据。由此最终获得68个站点2015年第一季度AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃日均浓度数据分别为5956、5956、5905、5869、5956、5954和5955个。根据计算获得的日均值浓度分别计算月均值浓度、季度均值浓度、区域均值浓度以及全省总均值浓度。通过Kolmogorov-Smirnov法检验PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃日均值浓度分布特征;采用季度均值浓度绘制空间分布图(Kriging插值法, Surfer 9.0中完成)。所有相关性分析均采用Pearson相关性分析(SPSS

16.0 中完成), 检验水平设为 0.01。不同城市间聚类分析在 JMP 10.0 中完成。

3. 结果与讨论

3.1. 全省总体污染特征

AQI 值是定量描述空气质量状况的一个无量纲化参数, 利用计算 AQI 值可以明确一个区域空气污染总体特征。16 个市区 68 个监测站点统计的 AQI 日均值显示, 87.8% 的记录数据低于 III 空气污染指数(即 $AQI < 150$), 其中属于优良的空气质量状况占总 AQI 数据的 64.3%, 即反映了 2015 年第一季度安徽省整体空气质量良好, 而 23.5% 的数据则反映了该季度安徽省主要城市空气质量属于轻度污染(即 AQI 值为 101~150); 9.4% 的 AQI 数据反映安徽省主要城市第一季度空气质量为中度污染; 3.1% 的数据揭示为重度污染; 仅有 2 个记录数据揭示 AQI 值大于 300, 反映了严重污染。不同市区间 AQI 值亦存在差异, 旅游城市如池州和黄山, 空气质量达优的 AQI 值近 40%。同时经济较为发达的城市如合肥、马鞍山和铜陵)以及淮河以北城市(淮北、蚌埠、淮南和宿州)等城市空气质量为 IV 和 V 级的比例明显增加(图 1)。

3.2. 全省主要城市大气污染物的统计特征

获取的 16 个市区 68 个监测站点 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 的日均值浓度均符合对数正态分布(Kolmogorov-Smirnov, p 值均大于 0.01), 因此计算得到全省 6 种污染物日均值的算术均值浓度分别为 $68.7 \pm 38.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $94.5 \pm 47.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $25.6 \pm 19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $30.1 \pm 18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $1.23 \pm 0.74 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $42.1 \pm 24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 几何均值分别为 $57.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $82.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.00 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $35.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。(图 2)我国 2016 年 1 月 1 日实施的新《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中明确指出 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 的一级日均值浓度限值(24h 均值浓度)分别为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 则有 80.6% 的 $PM_{2.5}$ 日均值超过此一级限制, 而 83.3% 的 PM_{10} 日均值超过一级限制, 而 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 日均值分别超过一级标准的数据分别占总记录数据的 9.0%、2.5%、0.9% 和 2.7%。另外六种空气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3)二级日均值限值则分别为 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 则有 33.9%、13.0%、0.1%、2.45%、0.9% 和 0.2% 的日均值记录数据分别超过它们的二级限值浓度。由此可见, 2015 年第一季度安徽省主要城市的大气污

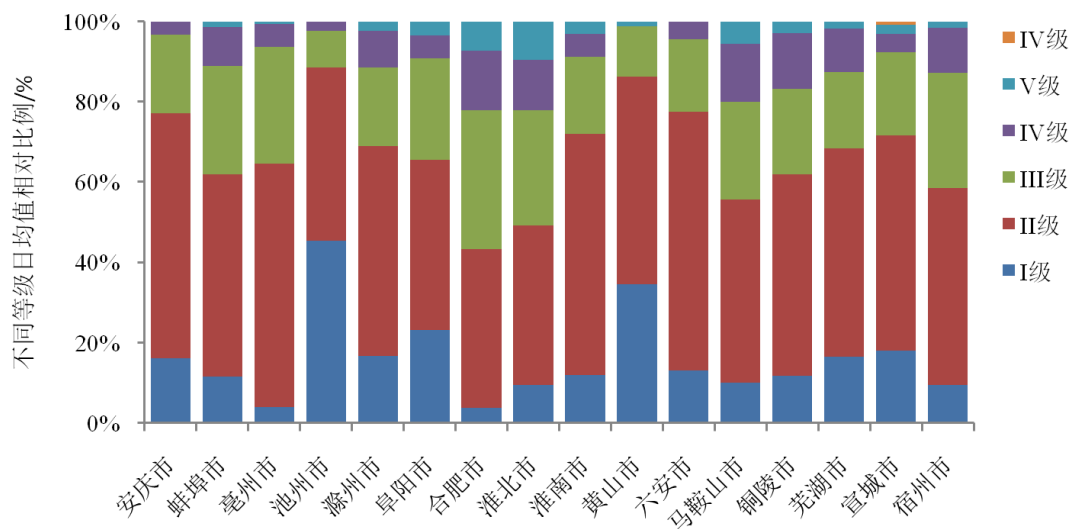


Figure 1. Relative percentage of air quality levels of AQI for the prefecture-level cities of Anhui Province during the first quarter of 2015

图 1. 安徽省主要城市 2015 年第一季度大气污染 AQI 污染级别比例

染以大气颗粒物污染为主。由于监测站点主要分布于居住商业交通混合区以及文化、工业和农村地区，这些区域适用于二级浓度限值。在此限值下，安徽大气污染主要以细颗粒物(PM_{2.5})为主要污染物，近三分之一的日均值浓度超过二级限制。《2015年安徽省环境状况公报》指出16个设区的市空气质量达标天数比例范围为67.1%(淮北)~94.7%(黄山)，首要污染物为细颗粒物[18]。

3.3. 时间变化特征

图3描述了2015年第一季度安徽省主要城市六种大气污染物日均值变化曲线，总体而言，除O₃外其它污染物1月份浓度最高，并依次降低，3月份最低(图3)。统计结果显示1月份PM_{2.5}浓度(83.4±42.1 μg/m³)显著高于2月份(68.7±38.0)和3月份(50.1±24.1 μg/m³)(所有p均小于0.01)，且2月份亦显著高于

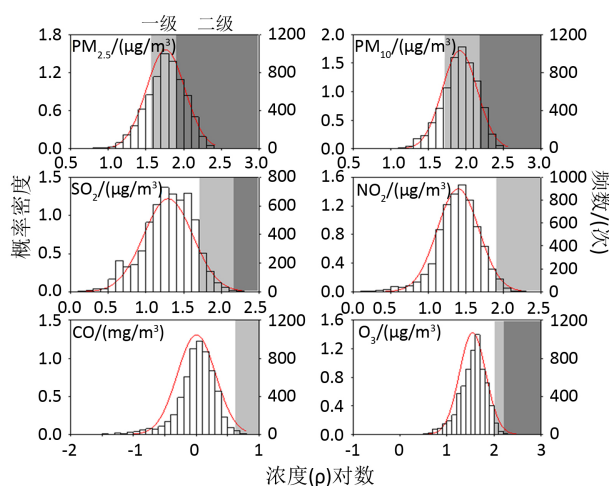


Figure 2. The distribution of log-transformed concentration of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO and O₃ for the prefecture-level cities of Anhui Province during the first quarter of 2015

图2. 安徽省主要城市2015年第一季度PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃日均值统计分布特征

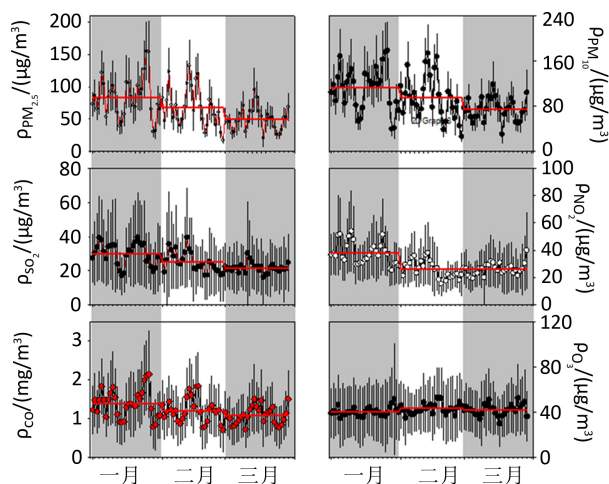


Figure 3. Daily variations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO and O₃ for the prefecture-level cities of Anhui Province during the first quarter of 2015

图3. 安徽省主要城市2015年第一季度PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃日均值时间变化特征

3月($p < 0.01$)。1月份 NO_2 浓度明显高于2月和3月份(p 均小于0.01),但2月份和3月份浓度无显著差异性($p = 0.57$),同时 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 亦存在同样的时间变化特征。大气污染物的月份变化主要原因在于当时气象要素,1月至3月期间,安徽省气温逐渐回升,受东南风影响逐渐明显,降雨和风速亦逐渐增加。以合肥为例,2015年1月至3月,东南风为主导风向的日数分别为14、13和17天,风力小于3级的天数分别为25、17和10天,出现雨雪天数9、8和10天,并在3月份期间出现中到大雨天气[19]。因此随着风速和降雨增加,空气对流旺盛,大气扩散能力增强,易于污染物的消除和扩散[15][20]。同时,研究结果亦揭示2015年第一季度安徽省主要城市大气颗粒物呈现两个波峰,第一个波峰期在2015年1月24~26日,第二次波峰则发生在2015年2月12~17日。1月24~26日为农历腊八节(1月27日星期二)前周末,出现了明显的大气颗粒物污染,这可能归于当地的祭祖活动[21]。而2月2月12~17日为2016年春节前(2月18日),可能主要原因在于返乡春运机动车排放。 SO_2 、 NO_2 和 CO 呈现相似的时间变化特征,主要原因在于这些污染物在空气中不稳定,易于扩散和转化[22]。先前的研究揭示春节期间由于燃放烟花爆竹导致大气污染[23][24],但本研究并未发现明显的烟花炮竹燃放影响。一方面是因为烟花爆竹燃放后可影响的时效范围有限[25],同时安徽省是我国重要的劳动力输出大省,春节期间大量人口返乡,因此机动车排放明显增加[26]。另一方面,2015年2月18~27日,连续出现多天阴雨天气,大气湿度增加,加快大气污染物浓度下降,有效减轻大气污染状况[27]。

与其它污染物不同, O_3 在1月份中浓度最低,明显低于2月份和3月份(p 值均小于0.01),但2月份和3月份浓度无显著差异($p = 0.43$)。同时 O_3 浓度并未呈现明显的波峰与波谷,大致呈现波浪状。 O_3 是大气光化学反应产物之一,其地面浓度与气象要素密切相关[28],先前研究表明[29],日间最高气温是影响地面高浓度 O_3 的关键因素,而太阳辐射的贡献相对较小,地面风速影响最小,因此在高温、高湿和高辐射下容易产生高浓度 O_3 。由于1月份气温最低,因此 O_3 浓度最低,而2、3月份气温回升,导致高浓度 O_3 。

3.4. 城市间变化规律

不同城市地理位置、社会经济发展和人口存在一定差异,因此大气污染程度不同。图4揭示了6种大气污染物在2015年第一季度中空间分布特征。结果显示合肥大气颗粒物污染最为严重, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 季度均值分别为 86.2 和 $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其次淮北、马鞍山和铜陵市颗粒物污染亦较为严重,池州地区大气颗粒物污染最轻, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别为 42.4 和 $58.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 SO_2 污染最为严重的城市为铜陵,为 $48.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,达到全省主要城市中最大值,其次宿州、亳州和阜阳等地污染亦较为严重,黄山地区 SO_2 污染最轻。淮北市 NO_2 污染最为严重,季度均值为 $42.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其次马鞍山、铜陵、蚌埠、亳州和阜阳等地区 NO_2 污染亦较为严重,黄山地区其污染最轻。 CO 污染最为严重的城市为安庆,季度均值可达 $2.07 \text{mg}/\text{m}^3$,铜陵、宣城和马鞍山等地区污染较为严重,黄山地区污染最轻。而宿州地区 O_3 浓度最高,季度均值可达 $74.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,明显高于其他地区,比如明显高于次污染区域如阜阳($56.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、亳州($47.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和蚌埠($46.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。大气污染的空间差异性与当地社会经济发展和能源消耗息息相关,合肥是安徽省省会城市,人口密集,因此各种商业、餐饮和机动车排放是大气污染的重要因素,从而导致大气颗粒物污染最为严重。而铜陵、马鞍山、淮北以及淮河以北的蚌埠和阜阳地区,由于当地的工业活动和家庭取暖,燃煤排放可能对当地大气污染有明显影响[15]。但工业活动不同,导致的 SO_2 污染和 NO_2 污染不同。例如淮北以 NO_2 污染为主,但铜陵地区则以 SO_2 污染为主,因为淮北为典型的煤矿开采区,而铜陵则是安徽省重要的矿产开采地[15]。安庆地区有较高浓度 CO 可能与当地的石油化工生产有关[30]。

聚类分析结果显示安徽省16个主要城市可以归为两大类(图5),第一类主要包括蚌埠、亳州、铜陵、阜阳、淮南、宿州、合肥、马鞍山和淮北,这些地方主要为淮河以北的城市或工业发展较为发达的城市

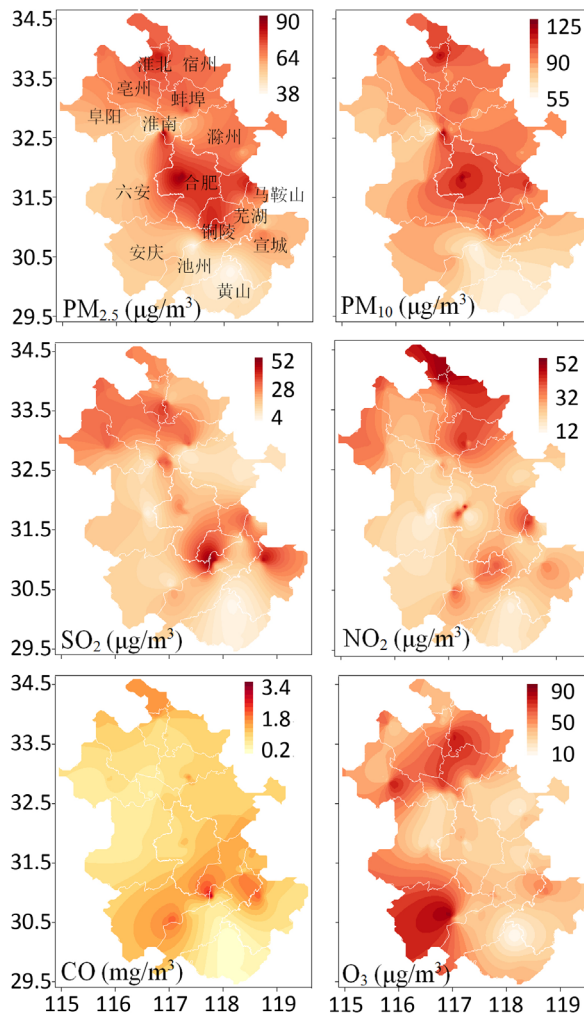


Figure 4. Spatial distribution of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3 for the prefecture-level cities of Anhui Province during the first quarter of 2015

图 4. 安徽省主要城市 2015 年第一季度 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO 和 O_3 污染空间分布特征

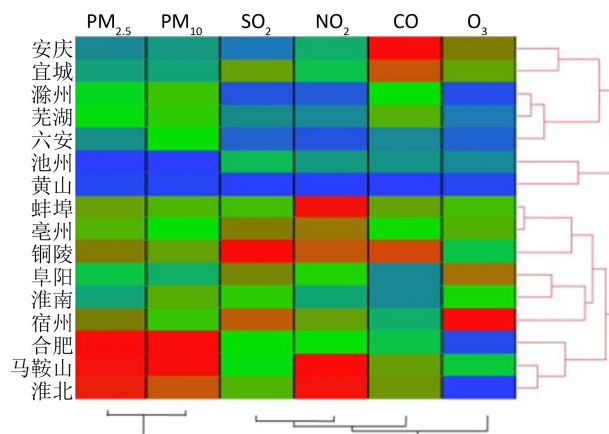


Figure 5. Hierarchical clustering analysis for spatial variation

图 5. 大气污染物的空间聚类分析热图

以及人口密集的城市,其污染物以大气颗粒物、SO₂和NO₂污染为主。这些地区主要为燃煤取暖或工业生产,从而导致大气污染较为严重。第二类地区主要包括安庆、宣城、滁州、芜湖、六安、池州和黄山,这些地区经济发展相对缓慢,因此污染较轻,其中安庆和宣城的CO污染较为严重,可能与当地的石油工业有关。

4. 结论

(1) 2015年第一季度安徽省各地级市空气质量状况以优良为主。

(2) 所有污染物均符合对数正态分布,其中大气颗粒物污染超标严重,80.6%的PM_{2.5}和83.3%的PM₁₀日均值超过此一级限制,33.9%的PM_{2.5}和13.0%的PM₁₀日均值超过二级限值。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015HGCH0002和201510359051)和国家自然科学基金项目(41390244)资助。

参考文献 (References)

- [1] Ostro, B., Roth, L., Malig, B., et al. (2009) The Effects of Fine Particle Components on Respiratory Hospital Admissions in Children. *Environmental Health Perspectives*, **117**, 475-480. <https://doi.org/10.1289/ehp.11848>
- [2] Peng, R.D., Bell, M.L., Geyh, A.S., et al. (2009) Emergency Admissions for Cardiovascular and Respiratory Diseases and the Chemical Composition of Fine Particle Air Pollution. *Environmental Health Perspectives*, **117**, 957-963. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800185>
- [3] Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., et al. (2015) The Contribution of Outdoor Air Pollution Sources to Premature Mortality on a Global Scale. *Nature*, **525**, 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- [4] Huang, Y., Dickinson, R.E. and Chameides, W.L. (2006) Impact of Aerosol Indirect Effect on Surface Temperature over East Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 4371-4376. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504428103>
- [5] Dawson, J.P., Adams, P.J. and Pandis, S.N. (2007) Sensitivity of PM_{2.5} to Climate in the Eastern US: A Modeling Case Study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, 4295-4309. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4295-2007>
- [6] Liao, H., Chang, W.Y. and Yang, Y. (2015) Climatic Effects of Air Pollutants over China: A Review. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 115-139. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-0013-x>
- [7] Gomišček, B., Hauck, H., Stopper, S., et al. (2004) Spatial and Temporal Variations of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and Particle Number Concentration during the AUPHEP-Project. *Atmospheric Environment*, **38**, 3917-3934. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.056>
- [8] 魏玉香, 银燕, 杨卫芬, 等. 南京地区PM_{2.5}污染特征及其影响因素分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(9): 29-34.
- [9] Guo, S., Hu, M., Guo, Q.F., et al. (2012) Primary Sources and Secondary Formation of Organic Aerosols in Beijing, China. *Environmental Science and Technology*, **46**, 9846-9853. <https://doi.org/10.1021/es2042564>
- [10] Wang, D.F., Zhou, B., Fu, Q.Y., et al. (2016) Intense Secondary Aerosol Formation Due to Strong Atmospheric Photochemical Reactions in Summer: Observations at a Rural Site in Eastern Yangtze River Delta of China. *Science of the Total Environment*, **571**, 1454-1466.
- [11] 王振波, 方创琳, 许光, 潘月鹏. 2014年中国城市PM_{2.5}浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [12] 李令军, 王占山, 张大伟, 陈添, 姜磊, 李云婷. 2013~2014年北京大气重污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 27-35.
- [13] 环境保护部和国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准(GB 3095-2012)——环境空气质量标准[S]. 北京: 标准出版社, 2012: 3.
- [14] Rohde, R.A. and Muller, R.A. (2015) Air Pollution in China: Mapping of Concentrations and Sources. *PLoS ONE*, **10**, e0135749. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135749>
- [15] 张浩, 石春娥, 谢伟, 邱明燕. 安徽省1955-2005年城市大气能见度变化趋势[J]. 气象科学, 2008, 28(5): 515-520.
- [16] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴-2014. 合肥: 安徽省统计局, 2015.

- [17] 张红, 黄勇, 刘慧娟. 安徽省近 30 年气候变化的空间特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 1935-1942.
- [18] 安徽省环保厅. 2015 年安徽省环境状况公报.
- [19] <http://lishi.tianqi.com/hefei/201501.html>
- [20] 张浩, 石春娥, 邱明燕. 合肥市气象条件对大气能见度影响分析[J]. 大气科学研究与应用, 2007(2): 92-99.
- [21] Navasumrit, P., Arayasiri, M., Hiang, O.M.T., et al. (2008) Potential Health Effects of Exposure to Carcinogenic Compounds in Incense Smoke in Temple Workers. *Chemico-Biological Interactions*, **173**, 19-31.
<https://doi.org/10.1016/j.cbi.2008.02.004>
- [22] 余淑苑, 张隽, 彭朝琼, 等. 深圳市气象因素对 SO₂ 等大气污染物的影响研究[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(6): 483-486.
- [23] 赵金平, 徐亚, 张福旺, 陈进生. 泉州郊区春节燃放烟花时段大气污染特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1224-1230.
- [24] 金军, 王英, 李令军, 李金香, 魏强. 北京春节期间大气颗粒物污染及影响[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(3): 229-232.
- [25] 李令军, 李金香, 辛连忠, 李海军, 魏强. 北京市春节期间大气污染分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 537-541.
- [26] 张苏北, 朱宇, 晋秀龙, 田盼盼. 安徽省内人口迁移的空间特征及其影响因素[J]. 经济地理, 2013, 33(5): 24-30.
- [27] 冯建军, 沈家芬, 梁任重, 莫测辉. 广州市 PM₁₀ 与气象要素的关系分析[J]. 中国环境监测, 2009, 25(1): 78-81.
- [28] 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 王普才, 宣越健. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2615-2619.
- [29] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 孙扬, 申双和, 石立庆. 北京大气中 NO, NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 706-711.
- [30] 闫鸿远, 陈俊. 安庆市城区主要大气污染物时空特征分析[J]. 资源开发与市场, 2008, 24(4): 321-323.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org