

· 公共卫生与预防医学研究 ·

南京江宁大学城春季PM_{2.5}污染特征及来源分析

刘璐¹, 朱欢欢¹, 吉贵祥², 袁琪³, 张正东¹, 储海燕^{1*}

¹南京医科大学公共卫生学院, 江苏 南京 211166; ²生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; ³南京市疾病预防控制中心, 江苏 南京 210003

[摘要] 目的: 了解南京江宁大学城春季PM_{2.5}的污染特征及来源。方法: 2018年3月15日—5月31日在南京医科大学江宁校区进行PM_{2.5}采样。分别使用热光碳分析仪、离子色谱仪、气相色谱串联质谱仪和能量色散X射线荧光光谱仪测定滤膜中碳质组分、水溶性离子、多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)和无机元素的含量。通过离子平衡分析、同分异构体比值法、主成分分析等方法进行源解析。结果: 采样期间PM_{2.5}日平均质量浓度为70.24 μg/m³。c[有机碳(OC)]/c[元素碳(EC)]比值集中于2.24~10.60, 提示PM_{2.5}来源于化石燃料燃烧, 且受二次污染影响较大。水溶性离子中SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺含量较高, PM_{2.5}整体偏碱性。c(NO₃⁻)/c(SO₄²⁻)平均比值为0.65, 表明采样点PM_{2.5}受煤炭燃烧等固定污染源的影响较大。中高环PAH在PM_{2.5}中含量较高, 主成分分析结果提示污染主要来源于化石燃料燃烧、机动车尾气排放。无机元素中Fe、Cl、K、Al和Zn占总质量的82.98%, 主成分分析结果提示化石燃料燃烧、机动车尾气排放、工业排放以及土壤扬尘是其主要来源。结论: 南京江宁大学城PM_{2.5}污染较为严重, 受化石燃料燃烧和机动车尾气排放影响最大。

[关键词] PM_{2.5}; 污染特征; 源解析; 南京江宁大学城

[中图分类号] R122.7

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2023)03-405-08

doi: 10.7655/NYDXBNS20230317

Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Jiangning university town of Nanjing during spring

LIU Lu¹, ZHU Huanhuan¹, JI Guixiang², YUAN Qi³, ZHANG Zhengdong¹, CHU Haiyan^{1*}

¹School of Public Health, Nanjing Medical University, Nanjing 211166; ²Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042; ³Nanjing Municipal Center for Disease Control and Prevention, Nanjing 210003, China

[Abstract] **Objective:** The current study aims to understand the characteristics and source apportionment of PM_{2.5} from Jiangning university town of Nanjing during spring. **Methods:** Ambient PM_{2.5} was collected from Jiangning campus of Nanjing Medical University between March 15th and May 31st in 2018. Thermal/optical carbon analyzer, ion chromatography, gas chromatography - mass spectrometer and energy dispersive X - ray fluorescence spectrometer were used to determine the concentration of carbonaceous components, water-soluble ions, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and inorganic elements, respectively. Source apportionment was conducted by ion balance analysis, diagnostic ratio method, principal component analysis (PCA), etc. **Results:** The average daily concentration of PM_{2.5} was 70.24 μg/m³. The ratios of c[organic carbon (OC)]/c[elemental carbon (EC)] mainly were 2.24~10.60, indicating fossil fuel combustion source and secondary pollution. Water soluble ions mainly included SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺. The average ratio of c(NO₃⁻)/c(SO₄²⁻) was 0.65, indicating a coal combustion source. PAHs with 4~6 benzene rings were the most abundant. The results of PCA suggested a mixed coal, petroleum combustion and automobiles emissions source. Fe, Cl, K, Al and Zn were predominant in inorganic elements. Coal and petroleum combustion, automobiles emissions, industrial emissions as well as soil dust contributed to inorganic elements. **Conclusion:** PM_{2.5} pollution is serious in the Jiangning university town of Nanjing. The main sources of PM_{2.5} were the fossil fuel combustion and automobile emissions.

[Key words] PM_{2.5}; pollution characteristics; source apportionment; Jiangning university town of Nanjing

[J Nanjing Med Univ, 2023, 43(03):405-412]

[基金项目] 江苏省高校自然科学研究项目(15KJB330002); 健康江苏研究院项目

*通信作者(Corresponding author), E-mail: chy_grape@njmu.edu.cn

大气污染是危害公共健康的重要环境问题^[1]。以细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})为首要污染物的灰霾污染事件频发^[2],PM_{2.5}污染已成为威胁我国人民健康的首要危险因素^[3]。在一系列大气污染防治举措下,我国PM_{2.5}污染状况虽有所改善,但仍维持在较高水平,由其所引起的疾病负担亦不可忽视^[4-5]。

准确识别PM_{2.5}的来源是制定有效防制措施的关键。PM_{2.5}在空气中悬浮时间长,易于吸附各种有毒有害物质,其组成成分主要包括碳质组分、水溶性离子、多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)以及无机元素等^[6-7]。近年来,我国学者陆续探究了PM_{2.5}的时空分布特征^[8]、污染特征^[9-10]及来源^[11]。南京是中国重要的工业基地、国家综合交通枢纽,污染物来源多,污染成因复杂。江宁大学城地处南京南部,人口密集。目前,针对南京市PM_{2.5}的污染特征以及源解析研究虽已取得了一定成效,但局限于单一组分的检测及来源解析,且江宁大学城PM_{2.5}污染特征尚不明确^[12-13]。综合PM_{2.5}不同组分的来源解析有利于更全面地了解其污染特征,更准确地识别其来源。

春季是支气管哮喘、变异性鼻炎等疾病高发的季节。本研究采集2018年春季南京江宁大学城PM_{2.5},检测其碳质组分、水溶性离子、PAH以及无机元素含量,并利用离子平衡分析、主成分分析等方法对PM_{2.5}来源进行解析,从而全面了解南京江宁大学城春季PM_{2.5}的污染特征及来源,为PM_{2.5}污染的防制提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

大容量总悬浮颗粒物采样器TH-1000C II型(武汉天虹仪器有限公司),大容量超声波清洗机(深圳洁盟有限公司),双蒸水净化系统(Labconco公司,美国),DRI Model 2001A热光碳分析仪(沙漠研究所,美国),Dionex ICS-3000型离子色谱系统(Thermo公司,美国),气相色谱串联质谱仪(Agilent公司,美国),能量色散X射线荧光光谱仪(Malvern Panalytical公司,英国),水溶性离子混标(北京百灵威科技有限公司),PAH混标(北京百灵威科技有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 PM_{2.5}采集

在2018年3月15日—5月31日,将南京医科大学江宁校区学生宿舍楼(31.95°N, 118.90°E)作为

采样点,距地高度约18 m。该采样点位于南京市江宁大学城,周边有江宁高新区、居民住宅区、交通干道等,为典型的郊区站点。采用武汉天虹公司大容量总悬浮颗粒物采样器TH-1000C II型以1.05 m³/min的采样流量采集,每次24 h,共采样42次,并记录平均气温、湿度和标况体积。采样前后均需将滤膜置于恒温恒湿空间24 h,分析天平精确称重并记录采样前后滤膜质量差,计算PM_{2.5}质量浓度。从中选择在2018年5月11日—5月24日(5月13、14、20、21日采样膜缺失)采集的玻璃纤维滤膜和石英膜各10张进行组分分析。

1.2.2 碳质组分分析

使用DRI Model 2001A热光碳分析仪测定样品中有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)含量。采用两阶段IMPROVE程序升温法:第一阶段在纯氮气环境中,于140℃、280℃、480℃和580℃逐级加热石英膜,分别得到OC1、OC2、OC3和OC4;第二阶段在含氧(2%)的氮气环境中,于580℃、740℃和840℃逐级加热氧化分别生成EC1、EC2和EC3。最后,使用火焰离子化检测器定量检测CO₂在还原炉中被还原为CH₄的量。OC碳化生成裂解碳(organic pyrolytic carbon, OPC),使用633 nm He-Ne激光全程照射样品,测定OPC生成量。样品中OC含量为(OC1+OC2+OC3+OC4+OPC),EC含量为(EC1+EC2+EC3-OPC)。

1.2.3 水溶性离子分析

将采集有PM_{2.5}样品的石英膜或空白石英膜剪碎后置于50 mL离心管中,在15 mL去离子水中超声提取30 min。提取液经孔径为0.22 μm的滤膜过滤。重复上述步骤一次,两次滤液合并。采用离子色谱法(ion chromatography, IC)检测样品中NH₄⁺、Ca₂⁺、K⁺、Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、Cl⁻、NO₂⁻和F⁻的浓度。根据保留时间和峰面积分析样品中水溶性离子浓度。

1.2.4 PAH类有机组分分析

将采集有PM_{2.5}样品的玻璃纤维滤膜或空白玻璃纤维滤膜剪碎后置于150 mL三角瓶中,在100 mL正己烷与二氯甲烷(V_{正己烷}:V_{二氯甲烷}=1:1)的混合试剂中超声提取30 min。使用孔径为0.22 μm的滤膜过滤后重复上述步骤一次并将两次滤液合并。将提取液转移至鸡心瓶中,在40℃下浓缩至尽干,加入1 mL正己烷复溶后用气相色谱串联质谱仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)检测16种PAH(萘、苊烯、苊、芴、蒽、菲、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、

蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、茚并[1,2,3-c,d]芘、二苯并[a,h]蒽和苯并[g,h,i]芘的浓度。根据保留时间和峰面积分析样品中PAH浓度。

1.2.5 无机元素分析

剪取1个直径为47 mm、采集有PM_{2.5}样品或空白的石英滤膜片,通过能量色散X射线荧光光谱法测定石英膜上磷(P)、铝(Al)、氯(Cl)、钾(K)、钪(Sc)、钛(Ti)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镓(Ga)、砷(As)、硒(Se)、溴(Br)、锶(Sr)、铅(Pb)、镉(Cd)、锡(Sn)和锑(Sb)的含量。根据不同元素的X射线荧光强度计算其含量,计算公式如式(1)所示。

$$\rho = \frac{(I - I_0) \times A}{b \times V} \quad (1)$$

式中: ρ 代表样品中无机元素的含量($\mu\text{g}/\text{m}^3$); I 代表样品中无机元素X射线荧光强度(cps); I_0 代表空白滤膜中无机元素X射线荧光强度(cps); A 代表滤膜上负载有颗粒物的面积(cm^2); b 代表校准曲线斜率[$\text{cps}/(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$]; V 代表标况体积(m^3)。

1.3 统计学方法

本研究使用R软件(3.5.1版本)中的R包“psych”进行主成分分析。以特征值>1、累积方差贡献率>80%的原则提取主成分因子,通过方差极大旋转方法对成分去噪。

2 结果

2.1 PM_{2.5}污染特征

图1所示为采样期间PM_{2.5}浓度与气象条件变化趋势图。采样期间PM_{2.5}浓度及气象条件有一定波动。采样期间PM_{2.5} 24 h平均浓度为11.99~176.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均质量浓度为70.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。相关性分析结果显示,PM_{2.5}浓度与平均湿度($r=-0.14, P=0.370$)、平均温度($r=-0.27, P=0.082$)呈负相关趋势。

2.2 碳质组分污染特征

OC和EC的日平均质量浓度分别为36.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和5.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分别占PM_{2.5}质量浓度的61.37%和7.40%(表1)。EC主要来源于化石燃料或生物质的不完全燃烧,OC则来源于污染源排放的一次有机碳(primary organic carbon, POC)和有机气体在大气中发生光化学反应生成的二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)^[14]。OC与EC的比值可用于评估碳质组分的来源。 $c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值为1.0~4.2、2.5~10.5和8.1~12.7时分别指示机动车尾气、煤炭燃烧和生物质燃烧^[15]。结果显示,监测期间 $c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值主要集

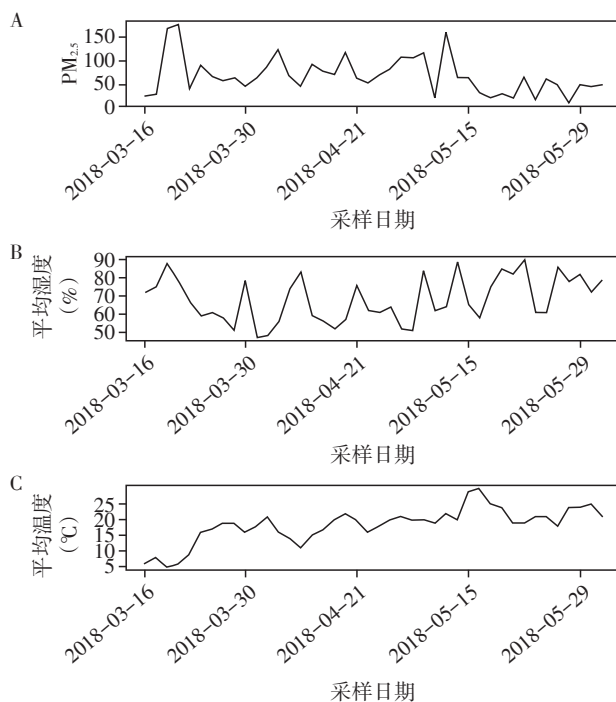


图1 采样期间PM_{2.5}浓度(A)与湿度(B)、温度(C)变化情况
Figure 1 Variation of PM_{2.5}(A), relative humidity (B) and temperature (C) during sampling

中于2.24~10.60,提示采样点PM_{2.5}受化石燃料燃烧影响较大。此外, $c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值最大为104.00,说明在个别时间生物质燃烧是PM_{2.5}的主要来源。

$c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值亦可指示颗粒物的二次来源。当 $c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值>2时,提示存在SOC^[16]。本研究监测期间 $c(\text{OC})/c(\text{EC})$ 值均>2,表明采样点PM_{2.5}中有SOC生成,SOC污染较为严重。

表1 采样期间大气PM_{2.5}中碳质组分质量浓度

Table 1 Mass concentrations of carbonaceous components in PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
化合物名称	均值±标准差	中位数	最小值	最大值
OC	36.07 ± 12.51	35.87	20.62	56.20
EC	5.10 ± 4.64	4.11	0.27	15.03
OC/EC	22.86 ± 33.37	8.89	2.24	104.00

2.3 水溶性离子污染特征

2.3.1 水溶性离子质量浓度

监测期间PM_{2.5}中水溶性离子的总质量浓度为11.14~45.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均质量浓度为26.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中,阴离子的贡献率从大到小分别为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{PO}_4^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$,阳离子的贡献率从大到小分别为 $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 占比最高,共占水溶性离子总质量浓度的84.38%(表2)。

表2 采样期间大气PM_{2.5}中水溶性离子质量浓度

Table 2 Mass concentrations of water soluble ions in PM_{2.5}

水溶性离子	均值±标准差(μg/m ³)	最小值(μg/m ³)	最大值(μg/m ³)	占总质量百分比(%)
阴离子				
SO ₄ ²⁻	11.40 ± 3.55	5.74	16.48	39.69
NO ₃ ⁻	7.54 ± 4.58	4.90	15.78	26.24
PO ₄ ⁻	1.22 ± 0.62	0.34	2.06	4.25
Cl ⁻	0.92 ± 0.60	0.28	2.02	3.20
NO ₂ ⁻	0.06 ± 0.04	0.02	0.12	0.21
F ⁻	0.05 ± 0.06	0.01	0.17	0.17
阳离子				
NH ₄ ⁺	5.30 ± 3.02	0.38	9.61	18.45
Ca ²⁺	1.17 ± 0.61	0.33	1.78	4.06
K ⁺	0.49 ± 0.22	0.17	0.79	1.71
Na ⁺	0.38 ± 0.44	0.13	1.26	1.32
Mg ²⁺	0.20 ± 0.11	0.03	0.37	0.71

2.3.2 离子平衡分析

本研究通过阴阳离子平衡分析评估PM_{2.5}的酸碱度^[17]。阴阳离子平衡公式如式(2)和式(3)所示。

$$AE = \frac{[SO_4^{2-}]}{48} + \frac{[NO_3^-]}{62} + \frac{[PO_4^-]}{95} + \frac{[Cl^-]}{35.5} + \frac{[NO_2^-]}{46} + \frac{[F^-]}{19} \quad (2)$$

$$CE = \frac{[NH_4^+]}{18} + \frac{[Ca^{2+}]}{20} + \frac{[K^+]}{39} + \frac{[Na^+]}{23} + \frac{[Mg^{2+}]}{12} \quad (3)$$

式中AE、CE分别代表阴、阳离子的电荷浓度(mol/m³)；[X]代表水溶性离子的质量浓度(μg/m³)。结果显示,采样期间AE/CE值集中于0.58~0.96,采

样点PM_{2.5}中阴离子被中和,PM_{2.5}总体偏碱性。此外,大气中SO₂主要来源于化石燃料燃烧(固定源),NO_x主要来自汽车尾气(移动源),大气中c(NO₃⁻)/c(SO₄²⁻)值常用于比较固定排放源和移动排放源的排放强度^[18]。若比值>1,则认为污染来源以移动源为主;反之,则以固定源为主。采样期间c(NO₃⁻)/c(SO₄²⁻)平均比值为0.65,采样点PM_{2.5}受煤炭燃烧等固定污染源的影响较大。

2.4 PAH污染特征

2.4.1 PAH质量浓度

监测期间PM_{2.5}中PAH的总质量浓度为14.50×10⁻³~51.77×10⁻³ μg/m³,平均质量浓度为31.34×10⁻³ μg/m³(表3)。根据环数进行划分,PAH可分为易挥发的低环(2,3环)PAH、半挥发性的中环(4环)PAH和挥发性较差的高环(5,6环)PAH,可用于初步评价PAH的来源。本研究中二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-c,d]芘、苯并[g,h,i]芘、苯并[b]荧蒽和苯并[a]芘的含量较高,均为中高环PAH,主要来源于化石燃料和木材燃烧^[19]。

2.4.2 同分异构体比值法

同分异构体比值法可用于定性评估PAH污染源^[20]。采样点PAH诊断比值见表4。蒽/(蒽+菲)<0.10代表石油来源,比值>0.10则代表燃烧源。本研究中,蒽/(蒽+菲)值为0.64~0.94,提示燃烧源的贡献。石油的芴/(芴+芘)值通常在0.40以下,而燃烧源的比值则>0.40。本研究芴/(芴+芘)值为0.02~

表3 采样期间大气PM_{2.5}中PAH质量浓度

Table 3 Mass concentrations of PAH in PM_{2.5}

PAH	均值±标准差(μg/m ³)	最小值(μg/m ³)	最大值(μg/m ³)	占总质量百分比(%)
二苯并[a,h]蒽	9.63×10 ⁻³ ± 5.28×10 ⁻³	2.35×10 ⁻³	1.98×10 ⁻²	30.72
茚并[1,2,3-c,d]芘	7.11×10 ⁻³ ± 3.88×10 ⁻³	2.55×10 ⁻³	1.38×10 ⁻²	22.69
苯并[g,h,i]芘	4.13×10 ⁻³ ± 1.94×10 ⁻³	1.56×10 ⁻³	7.51×10 ⁻³	13.18
苯并[b]荧蒽	3.55×10 ⁻³ ± 1.13×10 ⁻³	2.24×10 ⁻³	5.88×10 ⁻³	11.32
苯并[a]芘	1.39×10 ⁻³ ± 5.82×10 ⁻⁴	7.59×10 ⁻⁴	2.62×10 ⁻³	4.42
苯并[k]荧蒽	1.32×10 ⁻³ ± 5.97×10 ⁻⁴	4.96×10 ⁻⁴	2.66×10 ⁻³	4.21
蒽	1.32×10 ⁻³ ± 1.10×10 ⁻³	2.42×10 ⁻⁴	3.69×10 ⁻³	4.21
苯并[a]蒽	1.07×10 ⁻³ ± 5.84×10 ⁻⁴	3.65×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻³	3.40
芘	8.65×10 ⁻⁴ ± 6.01×10 ⁻⁴	1.59×10 ⁻⁴	1.94×10 ⁻³	2.76
荧蒽	5.35×10 ⁻⁴ ± 2.56×10 ⁻⁴	1.50×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻³	1.71
蒽	2.91×10 ⁻⁴ ± 1.52×10 ⁻⁴	9.59×10 ⁻⁵	5.04×10 ⁻⁴	0.93
菲	4.52×10 ⁻⁵ ± 1.64×10 ⁻⁵	2.74×10 ⁻⁵	7.43×10 ⁻⁵	0.14
蔡	3.33×10 ⁻⁵ ± 2.61×10 ⁻⁵	1.41×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁴	0.11
芘烯	2.69×10 ⁻⁵ ± 4.02×10 ⁻⁶	2.22×10 ⁻⁵	3.40×10 ⁻⁵	0.09
芴	2.61×10 ⁻⁵ ± 1.17×10 ⁻⁵	6.64×10 ⁻⁶	4.10×10 ⁻⁵	0.08
芘	1.01×10 ⁻⁵ ± 3.49×10 ⁻⁶	4.92×10 ⁻⁶	1.63×10 ⁻⁵	0.03

0.06。上述结果提示采样点PM_{2.5} PAH来源于石油类物质的挥发与泄露。苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽)值<0.20被认为是石油来源,比值>0.35是则为燃烧来源。本研究苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽)值为0.34~0.84,可认为主要为燃烧源的贡献。机动车、柴油、煤

炭及生物质燃烧的茚并[1,2,3-c,d]芘/(茚并[1,2,3-c,d]芘+苯并[g,h,i]芘)值分别为0.18、0.37、0.56和0.64。本研究茚并[1,2,3-c,d]芘/(茚并[1,2,3-c,d]芘+苯并[g,h,i]芘)值为0.54~0.69。上述结果提示采样点PM_{2.5}为煤炭和生物质燃烧的混合来源。

表4 采样期间PM_{2.5}中PAH诊断比值
Table 4 Diagnostic ratios of PAH in PM_{2.5}

计算公式	比值	污染物来源
蒽/(蒽+菲)	0.64~0.94	燃烧源
芴/(芴+芘)	0.02~0.06	石油类物质的挥发与泄露
苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽)	0.34~0.84	燃烧源
茚并[1,2,3-c,d]芘/(茚并[1,2,3-c,d]芘+苯并[g,h,i]芘)	0.54~0.69	生物质燃烧

2.4.3 主成分分析

为进一步分析大气PM_{2.5}中PAH来源,采用主成分分析进行源解析,共提取出4个主成分因子,累积贡献率为87%(表5)。因子1方差贡献率为24%,其中芴、蒽、苯并[b]荧蒽和芘载荷较高,提示因子1为煤炭燃烧源。因子2方差贡献率为24%,其中载荷较高的组分为芴烯、茚并[1,2,3-c,d]芘、二苯并[a,h]蒽和苯并[g,h,i]芘,代表汽车发动机、柴油机排放产物。因子3方差贡献率为23%,其中萘、苯并[a]蒽和蒽载荷较大,提示因子3为木材燃烧、柴油机和汽油发动机排放的混合来源。因子4方差贡献率为17%,荧蒽和芘的载荷较高,为石油燃烧来源^[21-22]。

结合同分异构比值法和主成分分析的结果可知,采样点PM_{2.5}中PAH主要来源为煤炭、石油和木材燃烧、汽车及柴油机尾气排放。

2.5 无机元素污染特征

2.5.1 无机元素质量浓度

采样期间PM_{2.5}中无机元素总质量浓度为0.86~5.29 μg/m³,平均质量浓度为2.41 μg/m³。其中,Fe、Cl、K、Al和Zn含量最高,所占比例达82.98%(表6)。

2.5.2 主成分分析

本研究进一步使用主成分分析评估PM_{2.5}中无机元素来源。对检测数据进行质量控制,选取Al、K、V、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As和Pb纳入主成分分析,其余元素因数据缺失严重、质量浓度低以及无源示踪性而未被纳入。本研究共提取出3个主成分因子,累积方差贡献率为83%(表7)。其中,因子1方差贡献率为33%,载荷较高的组分有Mn、Ni、Zn和Pb。Mn和Ni主要来源于燃煤和石油燃烧产生的烟尘,Zn和Pb主要来源于机动车磨损和尾气排放^[23-24],提示其为燃烧源和移动源。因子2方差贡献率为27%,V、

表5 方差极大旋转后16种PAH的主成分因子载荷

Table 5 Factor loadings for PAH on principle component analysis with varimax rotation

变量	因子1	因子2	因子3	因子4
萘	0.00	0.27	0.85	-0.27
芴烯	-0.39	0.85	0.19	0.12
芴	0.36	-0.08	0.52	0.72
芴	0.85	-0.02	0.11	0.10
蒽	0.82	-0.29	0.08	0.13
菲	0.60	0.04	-0.64	-0.35
荧蒽	0.58	0.14	0.59	0.50
芘	0.70	0.13	0.29	0.59
苯并[a]蒽	0.25	0.33	0.86	0.09
蒽	0.03	-0.04	0.93	0.14
苯并[b]荧蒽	0.80	0.25	-0.08	0.47
苯并[k]荧蒽	-0.11	-0.16	0.15	-0.89
苯并[a]芘	-0.24	0.56	-0.18	-0.51
茚并[1,2,3-c,d]芘	0.24	0.92	0.07	0.13
二苯并[a,h]蒽	-0.27	0.85	0.31	-0.07
苯并[g,h,i]芘	0.30	0.89	0.06	0.08
特征值	3.85	3.78	3.67	2.68
方差贡献率(%)	24	24	23	17
累积方差贡献率(%)	24	48	71	87

Cu和As具有较高的载荷值。其中V由电厂燃油产生,As和Cu主要来源于有色金属二次冶炼^[25]。因此,因子2可认为是工业排放源。因子3方差贡献率为23%,与典型的地壳元素K和Fe相关性最高,提示其为土壤扬尘源。综合主成分分析结果可知,采样点PM_{2.5}中无机元素主要来源于煤和石油的燃烧、机动车尾气排放、工业排放以及土壤扬尘。

3 讨论

本研究采样期间PM_{2.5}日平均浓度为70.24 μg/m³,

表6 采样期间大气PM_{2.5}中无机元素质量浓度

Table 6 Mass concentrations of inorganic elements in PM_{2.5}

无机元素	均值±标准差(μg/m ³)	最小值(μg/m ³)	最大值(μg/m ³)	占总质量百分比(%)
Fe	38.73×10 ⁻² ± 25.28×10 ⁻²	19.72×10 ⁻²	113.05×10 ⁻²	24.33
Cl	32.46×10 ⁻² ± 40.68×10 ⁻²	4.21×10 ⁻²	151.95×10 ⁻²	20.39
K	23.69×10 ⁻² ± 36.18×10 ⁻²	1.63×10 ⁻²	128.94×10 ⁻²	14.88
Al	22.11×10 ⁻² ± 8.62×10 ⁻²	6.97×10 ⁻²	34.82×10 ⁻²	13.89
Zn	15.10×10 ⁻² ± 12.58×10 ⁻²	3.88×10 ⁻²	48.07×10 ⁻²	9.49
Mn	4.87×10 ⁻² ± 5.48×10 ⁻²	1.30×10 ⁻²	20.41×10 ⁻²	3.06
Sn	4.11×10 ⁻² ± 1.33×10 ⁻²	2.50×10 ⁻²	6.45×10 ⁻²	2.59
Pb	2.33×10 ⁻² ± 0.86×10 ⁻²	1.15×10 ⁻²	4.21×10 ⁻²	1.47
P	2.31×10 ⁻² ± 1.49×10 ⁻²	0.57×10 ⁻²	6.17×10 ⁻²	1.45
Sc	2.01×10 ⁻² ± 1.41×10 ⁻²	0.69×10 ⁻²	6.08×10 ⁻²	1.26
Sb	1.90×10 ⁻² ± 0.65×10 ⁻²	0.89×10 ⁻²	3.15×10 ⁻²	1.20
Ti	1.73×10 ⁻² ± 1.39×10 ⁻²	0.34×10 ⁻²	5.73×10 ⁻²	1.09
Cu	1.68×10 ⁻² ± 0.97×10 ⁻²	0.49×10 ⁻²	3.29×10 ⁻²	1.06
Sr	1.63×10 ⁻² ± 1.96×10 ⁻²	0.04×10 ⁻²	7.17×10 ⁻²	1.03
Br	1.58×10 ⁻² ± 0.78×10 ⁻²	0.74×10 ⁻²	3.55×10 ⁻²	0.99
Cd	0.63×10 ⁻² ± 0.26×10 ⁻²	0.23×10 ⁻²	1.19×10 ⁻²	0.40
As	0.49×10 ⁻² ± 0.25×10 ⁻²	0.20×10 ⁻²	1.07×10 ⁻²	0.31
Ni	0.44×10 ⁻² ± 0.22×10 ⁻²	0.12×10 ⁻²	0.94×10 ⁻²	0.28
Cr	0.44×10 ⁻² ± 0.16×10 ⁻²	0.21×10 ⁻²	0.77×10 ⁻²	0.27
Se	0.31×10 ⁻² ± 0.12×10 ⁻²	0.14×10 ⁻²	0.49×10 ⁻²	0.20
V	0.24×10 ⁻² ± 0.15×10 ⁻²	0.09×10 ⁻²	0.55×10 ⁻²	0.15
Co	0.18×10 ⁻² ± 0.08×10 ⁻²	0.06×10 ⁻²	0.38×10 ⁻²	0.11
Ga	0.17×10 ⁻² ± 0.22×10 ⁻²	0.02×10 ⁻²	0.77×10 ⁻²	0.11

表7 方差极大旋转后10种无机元素的主成分因子载荷

Table 7 Factor loadings for inorganic elements on principle component analysis with varimax rotation

变量	因子1	因子2	因子3
Al	0.03	-0.11	0.57
K	0.25	0.02	0.93
V	0.36	0.83	-0.27
Mn	0.97	0.13	0.09
Fe	0.05	0.11	0.96
Ni	0.87	0.07	0.03
Cu	0.22	0.89	0.13
Zn	0.94	0.23	0.21
As	0.00	0.88	-0.03
Pb	0.72	0.59	0.15
特征值	3.34	2.70	2.28
方差贡献率(%)	33	27	23
累积方差贡献率(%)	33	60	83

显著高于WHO 2005年制定的日平均标准(25 μg/m³)^[26]。在2021年,WHO进一步将PM_{2.5}日平均标准调低至15 μg/m³^[27],这一举措也表明空气污染没有绝对的

安全限值,低浓度的PM_{2.5}暴露仍然会增加各种疾病发生和死亡风险。本研究发现PM_{2.5}浓度与温、湿度间存在负相关趋势,可能是随着气温的升高,大气对流运动加剧,便于PM_{2.5}扩散^[28]。而湿度的增加可导致PM_{2.5}被吸附到液滴上而沉降于地面,使空气中PM_{2.5}浓度降低^[29]。

本研究中采样点PM_{2.5}碳质组分中以OC为主,与徐足飞等^[30]对2015年秋季南京PM_{2.5}源解析的结果一致,表明南京PM_{2.5}在大气中易发生光化学反应而产生二次污染。采样点PM_{2.5}水溶性离子中SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺占主导,浓度低于2018—2019年冬季,但主要离子构成一致^[31]。与2016—2017年南京市城区PM_{2.5}相比^[32],本研究采集的江宁大学城PM_{2.5}c(NO₃⁻)/c(SO₄²⁻)略低,可能由于城区机动车更多,尾气污染更为严重。此外,采样点PM_{2.5}中有机组分及无机元素构成也与既往研究类似,但总质量浓度呈降低趋势^[32-33]。这些结果提示南京PM_{2.5}组分在一段时期内变化不显著,整体污染水平有所降低。

源解析结果显示,江宁大学城PM_{2.5}污染主要来

源于煤炭燃烧和机动车尾气排放。其中,交通污染源可能主要源自采样点附近的交通干道。鉴于采样点所在区域无明显的工业污染源,南京春季主导风向为南风,推测采样点可能受到大气污染物远距离传输的影响。因此,开展区域大气污染联防联控是大气污染防制的有效举措。

本研究的优势在于较为全面地解析了南京江宁大学城PM_{2.5}的污染特征并分析其来源,结果具有较高的可靠性。但是,本研究监测周期较短,未设置多点采样。后续研究有必要在不同季节、不同污染时期进行PM_{2.5}多点采样,从而更加全面地了解PM_{2.5}的污染特征,有针对性地制定相关管控措施。

综上所述,本研究分析了2018年春季南京江宁大学城PM_{2.5}的污染特征,发现其各组分浓度虽较既往显著降低,但是污染水平仍较高;主要污染来源为煤炭燃烧和机动车尾气排放。

【参考文献】

- [1] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 367-71
- [2] HU J L, WANG Y G, YING Q, et al. Spatial and temporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmos Environ*, 2014, 95: 598-609
- [3] COHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. *Lancet*, 2017, 389(10082): 1907-1918
- [4] 王跃思,李文杰,高文康,等. 2013—2017年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. *中国科学(地球科学)*, 2020, 50(4): 453-468
- [5] LIM C H, RYU J, CHOI Y, et al. Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998-2016) [J]. *Environ Int*, 2020, 144: 106011
- [6] ZHANG Y, LANG J, CHENG S, et al. Chemical composition and sources of PM₁ and PM_{2.5} in Beijing in autumn [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 630: 72-82
- [7] 赵孝囡,王申博,杨洁茹,等. 郑州市PM_{2.5}组分、来源及其演变特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3633-3643
- [8] 依再提古丽·外力,王明力,杨建军,等. 2015—2018年乌鲁木齐市PM_{2.5}及PM₁₀时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1749-1757
- [9] 苏莎,杨珍,汪琼,等. 长沙市某区域大气PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征分析[J]. *中南医学科学杂志*, 2021, 49(4): 393-396
- [10] ZENG Y, CHEN S, FAN Y, et al. Effects of carbonaceous materials and particle size on oral and inhalation bioaccessibility of PAHs and OPEs in airborne particles [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(44): 62133-62141
- [11] ZENG H, ZHANG L, SUN F, et al. Inhalation bioaccessibility, health risk assessment, and source appointment of ambient PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Caofeidian, China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(34): 47574-47587
- [12] 邱晨晨,于兴娜,丁铨,等. 南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 529-536
- [13] 纪源,赵秋月,陈凤,等. 新冠肺炎疫情期间南京市PM_{2.5}中碳质组分污染特征分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(8): 992-1000
- [14] 吴琳,冯银厂,戴莉,等. 天津市大气中PM₁₀、PM_{2.5}及其碳组分污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(11): 1134-1139
- [15] 徐建伟,王晓丽,于高峰,等. 西宁冬季PM_{2.5}中碳质组分与水溶性离子特征分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(8): 98-101, 112
- [16] 刘琼玉,谈静,钟章雄,等. PM_{2.5}中OC/EC测定的离线分析法与在线分析法比较[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(4): 123-130
- [17] 黄凡,陈楠,周家斌,等. 2016—2017年武汉市城区大气PM_{2.5}污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(1): 17-25
- [18] LAI S C, ZOU S C, CAO J J, et al. Characterizing ionic species in PM_{2.5} and PM₁₀ in four Pearl River Delta Cities, South China [J]. *J Environ Sci (China)*, 2007, 19(8): 939-947
- [19] 许安,刘威杰,胡天鹏,等. 新疆阿勒泰地区土壤中多环芳烃含量水平及来源解析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 619-626
- [20] 郭志明,刘頔,林田,等. 太原城区PM_{2.5}中多环芳烃、硝基多环芳烃的污染特征、来源解析和健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1102-1108
- [21] LARSEN R K, BAKER J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(9): 1873-1881
- [22] ZOU L Y, ZHANG W D, ATKISTON S. The characterisation of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from burning of different firewood species in Australia [J]. *Environ Pollut*, 2003, 124(2): 283-289
- [23] 陈旭华,杨玉军,袁福的,等. 安阳市大气PM_{2.5}中无机元素污染特征分析及来源解析[J]. *绿色科技*, 2021(6): 122-124
- [24] 赵晓亮,岳阳霞,许端平,等. 阜新市秋冬季节PM_{2.5}中

- 无机元素污染特征及来源[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4247-4258
- [25] 杨麒, 傅致严, 刘湛, 等. 郴州市大气PM_{2.5}中无机元素污染特征及来源分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 133-140
- [26] WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO global air quality guidelines: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide[M]. Geneva: World Health Organization, 2005: 217-305
- [27] WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [M]. Geneva: World Health Organization, 2021: 74-89
- [28] 王佳佳, 夏晓圣, 程先富, 等. 合肥市PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1413-1421
- [29] 刘骥艳, 张更宇, 董湘军. 吉林市雾霾天气成因及PM_{2.5}源分析[J]. 黑龙江环境通报, 2017, 41(3): 22-24
- [30] 徐足飞, 曹芳, 高嵩, 等. 南京北郊秋季PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3033-3041
- [31] 陈新星, 李洁, 张良瑜, 等. 南京市冬季PM_{2.5}中水溶性离子污染特征研究[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 12-15
- [32] 刘军, 陆晓波, 陈新星, 等. 南京市城区PM_{2.5}中化学组分演变特征[J]. 环境监控与预警, 2020, 12(4): 40-44
- [33] 周俊, 袁琪, 张正东, 等. 大气PM_{2.5}暴露对健康人群尿液中多环芳烃羟基代谢产物水平的影响[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(6): 515-518
- [收稿日期] 2022-08-31
(本文编辑: 陈汐敏)

(上接第400页)

- [9] XU J Y, MAVRANEZOULI I, KUZNETSOV L, et al. Management of acne vulgaris: summary of NICE guidance[J]. BMJ, 2021, 374: 1880
- [10] CONFORTI C, ZALAUDEK I, VEZZONI R, et al. Chemical peeling for acne and melasma: current knowledge and innovations[J]. G Ital Dermatol Venereol, 2020, 155(3): 280-285
- [11] 翟燕, 高瑾, 高艳. CO₂点阵激光联合果酸治疗凹陷性痤疮瘢痕的疗效观察[J]. 中国医疗美容, 2017, 7(11): 43-46
- [12] 石云, 丁大鹏, 姜鹏爽. 复合酸联合超脉冲CO₂激光治疗轻中度痤疮的疗效[J]. 中国激光医学杂志, 2021, 30(5): 291-293
- [13] 中华医学会皮肤性病学会, 中国医师协会皮肤科医师分会, 中国中西医结合学会皮肤性病专业委员会. 中国化学剥脱术临床应用专家共识(2022)[J]. 中华皮肤科杂志, 2022, 55(11): 949-955
- [14] HOLZ C, BENNING J, SCHAUDT M, et al. Novel bioactive from *Lactobacillus brevis* DSM17250 to stimulate the growth of *Staphylococcus epidermidis*: a pilot study [J]. Benef Microbes, 2017, 8(1): 121-131
- [15] 李向花, 郭静, 杨璐, 等. 复合酸治疗中度痤疮临床疗效及安全性观察[J]. 皮肤病与性病, 2020, 42(5): 645-648
- [16] ELATTAR Y, MOURAD B, ALNGOMY H A, et al. Study of interleukin-1 beta expression in acne vulgaris and acne scars[J]. J Cosmet Dermatol, 2022, 21(10): 4864-4870
- [收稿日期] 2022-12-27
(本文编辑: 陈汐敏)