

## 合肥秋季气溶胶光学特性及来源分析

欧金萍<sup>1</sup>, 刘浩然<sup>1\*</sup>, 朱鹏程<sup>1</sup>, 徐恒<sup>1</sup>, 王状<sup>2</sup>, 田园<sup>1</sup>, 刘国华<sup>1</sup>, 李启华<sup>1</sup>

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230601

2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031

**摘要** 气溶胶通过吸收和散射效应与太阳辐射相互作用, 对地球辐射收支和气候造成扰乱, 对云凝结核形成和云的光学性质造成间接影响。利用黑碳仪和积分浊度计于2019年11月5日至12月10日在合肥市分别开展了气溶胶吸收系数( $\sigma_{ap}$ )、散射系数( $\sigma_{sp}$ )的外场观测, 结合气象数据, 分析了气溶胶吸收系数( $\sigma_{ap}$ )、散射系数( $\sigma_{sp}$ )的日变化特征及风依赖性。结果表明, 合肥市秋季  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  均值分别为  $(43 \pm 25) \mu g \cdot m^{-3}$ ,  $(238.70 \pm 161.52) Mm^{-1}$ ,  $(32.04 \pm 17.01) Mm^{-1}$ 。研究期间  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$  的时间变化趋势与  $PM_{2.5}$  较为一致。 $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  均具有显著的双峰日变化特征, 分别在早8点至10点和晚20点至21点出现峰值, 主要与交通排放和气象条件有关。合肥市气溶胶光学性质的风依赖性主要体现在  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{ap}$  与  $\sigma_{sp}$  的高值大多处在弱风(风速  $< 3 m \cdot s^{-1}$ ) 的区域, 低温高湿小风的天气条件有利于污染物的积累和形成, 但较高的风速也易输送周边的污染物,  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  部分高值主要受西北风向的污染气团影响。同时, 基于 HYSPLIT 后向轨迹模型, 通过聚类分析不同输送途径的空间特征, 并利用潜在源贡献法(PSCF)和浓度权重轨迹法(CWT), 探讨了研究期内合肥  $\sigma_{sp}$  的潜在源区分布及其贡献特性。结果发现污染气团主要来源于合肥的西北方向, 占比最高的气团1和3来自于内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区, 而对散射系数贡献较大的气团2来自于陕西省宝鸡市, 气团6源于内蒙古, 途径山西省、山东省、江苏省, 从安徽省的东南方向到达合肥, 携带较多的污染物。PSCF较大值( $> 0.5$ )主要分布在合肥的西北方向和西南方向。合肥冬季CWT高值主要分布在河南省东北部、山东省西南部、安徽省北部地区。尤其是山东济宁市、河南商丘市的污染物远距离传输是影响合肥地区秋季空气质量的重要源区。

**关键词** 气溶胶; 风依赖; 散射系数; 合肥; 潜在源区

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3014-07

### 引言

气溶胶是指悬浮于大气中的各种固态和液态细颗粒物总称, 因其在大气能见度、气候变化与人体健康等方面的重要影响而受到学者们的广泛关注<sup>[1]</sup>。气溶胶的时空分布不均匀性、气溶胶的理化性质与辐射强迫之间作用的复杂性, 是造成全球气候变化评估不确定性的的重要因素之一<sup>[2-3]</sup>。其中散射和吸收作用作为影响地-气系统辐射平衡和大气能见度的

两种主要方式<sup>[4]</sup>, 因此气溶胶光学性质的研究对于评估气溶胶环境效应具有重要意义。

目前在我国京津冀、长三角和珠三角等人口密集、经济发达且污染严重的地区已开展很多气溶胶光学性质方面的研究<sup>[5-6]</sup>。Wang等<sup>[2]</sup>对北京市连续三年的观测发现吸收系数主要受当地排放的影响, 而散射系数受当地排放和区域交通的共同影响, 其潜在源区分布于北京的南部和西部。Tan等<sup>[6]</sup>分析珠三角地区光学性质发现广州市2014年冬季气溶胶散射系数和单次散射反照率(SSA)均值是  $(149.33 \pm 89.73)$

**收稿日期:** 2020-08-04, **修订日期:** 2020-12-29

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0210002, 2018YFC0213104, 2016YFC0200404, 2016YFC0203302, 2017YFC0212800, 2019YFC0214702和2018YFC0213201), 安徽省科技重大专项(18030801111), 国家自然科学基金项目(41720501, 51778596, 41977184和41775025), 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020301), 国家大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0102和DQGG0205), 国家高分辨率对地观测重大科技专项项目(二期, 05-Y30B01-9001-19/20-3), 安徽省重点研究与开发计划项目(202004i07020002), 安徽省青年项目(2008085QD180)资助

**作者简介:** 欧金萍, 1992年生, 安徽大学物质科学与信息技术研究院博士研究生 e-mail: jpingcc@163.com

\* 通讯作者 e-mail: hrl@ahu.edu.cn

$\text{Mn}^{-1}$  和  $(0.80 \pm 0.06)$ 。黄聪聪等<sup>[1]</sup>发现受边界层高度及颗粒物浓度的影响,南京市冬季气溶胶吸收系数、散射系数日变化特征显著。周变红等<sup>[7]</sup>发现散射系数与相对湿度呈现出显著的正相关,与大气能见度呈现出显著的负相关。而且受到早晚高峰及机动车运行时间影响,散射系数和吸收系数呈现双峰双谷型变化特征。

合肥市作为安徽省的省会城市,随着经济的发展,空气中污染物浓度剧增,秋冬季灰霾现象时有发生<sup>[8]</sup>。本工作基于对合肥市 2019 年 11 月—12 月的气溶胶散射和吸收系数等数据的处理,分析气溶胶光学性质的时间变化特征,日变化规律,同时借助 HYSPLIT 模型,结合轨迹聚类、PSCF 和 CWT 分析方法,研究了气溶胶散射系数的轨迹输送和来源分布特征,这对于了解我国长三角地区气溶胶辐射强迫的不确定性具有参考意义,同时也为合肥市大气污染防治对策提供技术的支持。

## 1 实验部分

### 1.1 观测地点和时间

研究的观测地点位于安徽大学磬苑校区物质科学与技术研究院(117.19°E, 31.77°N)的楼顶方舱,观测高度约为 30 m。方舱所在位置处于该校园的北部区域,周边是教学楼和学生的生活区,周边没有大的污染源。具体的观测时间为 2019 年 11 月 5 日至 12 月 10 日。



图 1 观测点位置图

Fig. 1 Location map of observation points

### 1.2 所用仪器及数据来源

采用美国 Magee 公司生产的 AE33 型黑碳仪,其工作原理为利用滤纸带收集通过其上一部分气流中的气溶胶颗粒,通过测量包含滤带的一部分样品来测量气溶胶颗粒,参考区域是通过滤带的无载部分。Aethalometer 是通过颗粒物负载滤膜上透射光衰减率的变化率进而计算得到光学吸收气溶胶的瞬时浓度。该仪器可以每 1min 自动获得一个数据。采样时选用的气溶胶切割粒径为  $\text{PM}_{2.5}$ 。

采用澳大利亚 ECOTECH 公司生产的 Auroa-3000 型浊度仪可以连续并实时的测量环境大气中的颗粒物的光学散射(即  $\sigma_{\text{sp}}$ )。仪器内置温度和气压传感器,测量结果可以自动、实时地订正,测量波长 525 nm,测量周期 5 min,浊度仪配有智能加热进气管,以消除相对湿度对散射特性的影响。

其他气象数据(温度,相对湿度,风速,风向)来源于 1.8

km 处的合肥市生态环境局的观测结果。观测期间,仪器均按照操作规章开展日常的内标、外标、零点标定、跨度标定工作。

### 1.3 计算方法

气溶胶的吸收系数( $\sigma_{\text{ap}}$ )由式(1)计算得出<sup>[7]</sup>

$$\sigma_{\text{ap}} = 8.28\rho_{\text{BC}} + 2.23 \quad (1)$$

式(1)中, $\rho_{\text{BC}}$ 是指黑碳仪测量的黑碳(BC)质量浓度。

单次散射反照率(SSA)由式(2)计算得出

$$\text{SSA} = \sigma_{\text{sp}} / (\sigma_{\text{sp}} + \sigma_{\text{ap}}) \quad (2)$$

### 1.4 潜在来源分析方法

HYSPLIT (hybrid single particle lagrangian integrated) 是一种能反映气团空间运行轨迹的模型,该模型由美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室研发,在国内外分析污染物来源及传输路径等方面应用广泛<sup>[2,9]</sup>。本工作采用 500 m 作为轨迹起始高度,对研究区域进行 72 h 后向轨迹模拟,每天计算 24 个整数时次。继而利用 TrajStat 软件进行 PSCF 和 CWT 分析,分析过程中将气流轨迹覆盖的区域(38°E—128°E, 24°N—70°N)按  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  进行网格化处理。

后向轨迹聚类的原理是通过气流在传输速度及方向的空间相似度对众多轨迹进行分组,利用 Ward's 方方法和 Angle Distance 算法将计算的后向轨迹进行聚类,统计分析出主导气流方向<sup>[9]</sup>。而 PSCF 和 CWT 则是通过气流轨迹识别大气污染物来源。其中,PSCF 通过结合污染轨迹(本研究以气溶胶散射系数的均值对应轨迹为污染轨迹)和某污染物浓度来给出可能的污染源区,研究区域内经过某一网格( $i, j$ )污染气流轨迹端点数( $m_{ij}$ )除以经过该网格所有气流轨迹端点数( $n_{ij}$ )即得到 PSCF 值,具体的计算公式为

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (3)$$

引入权重因子  $W(n_{ij})$  降低 PSCF 随网格与采样点的距离增加而增加的误差<sup>[8-9]</sup>,计算公式为

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 3\text{Avg} \\ 0.70 & \text{Avg} < n_{ij} \leq 3\text{Avg} \\ 0.42 & 0.5\text{Avg} < n_{ij} \leq \text{Avg} \\ 0.17 & n_{ij} \leq 0.5\text{Avg} \end{cases} \quad (4)$$

进一步对 PSCF 进行加权计算

$$\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF}_{ij} \quad (5)$$

PSCF 法反映的是网格对受点污染程度的贡献大小,无法区分出相同  $P_{ij}$  的网格气溶胶散射系数的贡献。所以我们选择使用 CWT 法计算各个轨迹的权重浓度,确定各网格的平均权重浓度,进而定量得到不同轨迹的污染程度<sup>[9]</sup>。计算公式如式(6)

$$C_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (6)$$

式(6)中: $C_{ij}$ 为网格( $i, j$ )的平均权重浓度气溶胶散射系数,单位是  $\text{Mm}^{-1}$ ;  $l$ 为轨迹; $M$ 为轨迹个数; $C_l$ 为轨迹  $l$  到达网格时对应的散射系数,单位是  $\text{Mm}^{-1}$ ;  $\tau_{ijl}$ 为轨迹  $l$  在网格( $i, j$ )的停留时间,单位是 h。

同样地引用  $W_{ij}$  以降低  $C_{ij}$  的不确定性,WCWT(权重轨

迹污染程度)的计算公式为

$$WCWT = C_{ij} \times W_{ij} \quad (7)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 气溶胶光学特性

图 2 展示的是 2012 年 11 月 5 日—12 月 10 日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、气溶胶光学性质( $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$ )的小时变化序列。研究期间合肥市气溶胶散射系数和吸收系数的含量范围分别是 60.43~1 241.47 和 7.78~97.78 Mm<sup>-1</sup>, 平均含量分别为 (238.70±161.52) 和 (32.04±17.01) Mm<sup>-1</sup>。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度范围为 6~189 μg·m<sup>-3</sup>, 平均值为 (43±25) μg·m<sup>-3</sup>。整个研究期间  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  的变化趋势与 PM<sub>2.5</sub> 较为一致, 11 月 17 日和 11 月 24 日均出现较高值。与国内其他城市的气溶胶光学性质相比(表 1), 合肥市的散射系数、吸收系数低于京津冀地区的北京市<sup>[10]</sup>和天津市<sup>[11]</sup>, 长江三角洲的上海市<sup>[12]</sup>和南京市<sup>[1]</sup>, 但珠三角地区广州市<sup>[6]</sup>的散射系数低于合肥的,

吸收系数高于合肥的。SSA 是反映气溶胶光学特性的重要参数, 观测期间合肥市 SSA 平均值为 0.87, 该值高于北京、广州, 低于天津, 与上海、南京的相似, 表明在合肥秋季气溶胶中的散射性物质占主导地位。

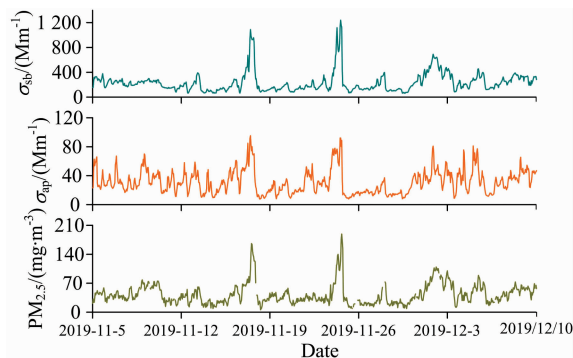


图 2 研究期间合肥市  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$  与 PM<sub>2.5</sub> 时间序列图  
Fig. 2 The variation tendencies of  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$  and PM<sub>2.5</sub> in Hefei during the research period

表 1 不同地区气溶胶散射系数( $\sigma_{sp}$ )、吸收系数( $\sigma_{ap}$ )和单次散射反照率(SSA)比较  
Table 1 The comparison of scattering coefficient ( $\sigma_{sp}$ ), absorption coefficient ( $\sigma_{ap}$ ) and single scattering albedo (SSA) of aerosol in different regions

地点	时间	$\sigma_{sp}/Mm^{-1}$	$\sigma_{ap}/Mm^{-1}$	SSA	文献
南京	2016 年 1 月	454.68.70±238.71	64.19±35.28	0.87±0.03	[1]
广州	2014 年 2 月—3 月	149.33±89.73	45.67±30.39	0.80±0.06	[6]
北京	2009 年 5 月—2010 年 6 月	360±405	64±62	0.82±0.09	[10]
天津	2011 年 4 月—5 月	369.93	36.32	0.91	[11]
上海	2010 年 12 月—2011 年 3 月	292.81±206.39	65.81±46.8	0.81±0.04	[12]
合肥	2019 年 11 月—12 月	238.70±161.52	32.04±17.01	0.87±0.04	本文

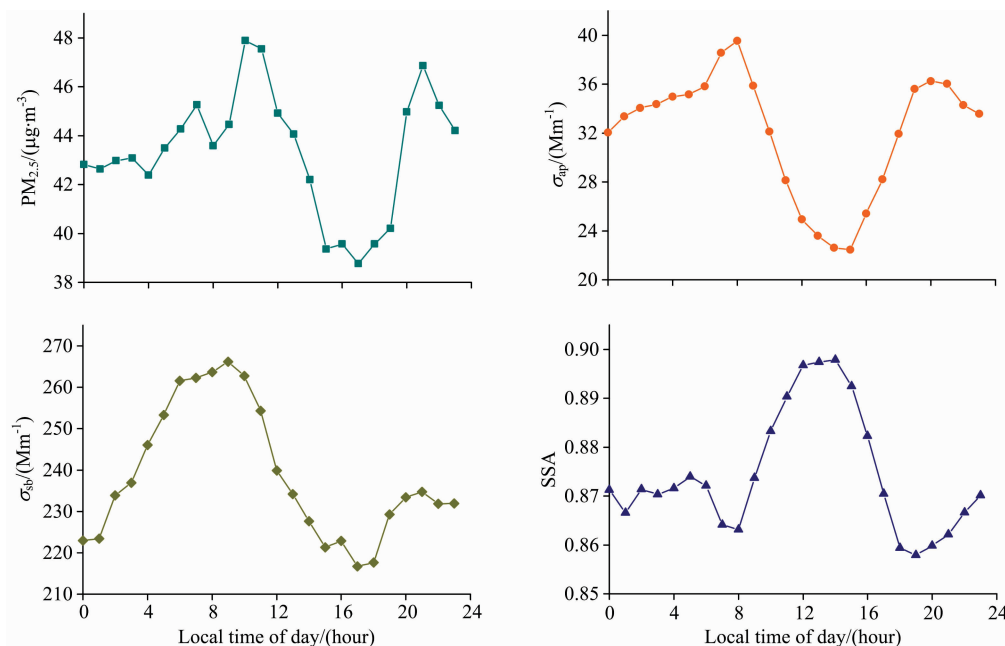


图 3 PM<sub>2.5</sub>、吸收系数( $\sigma_{ap}$ )、散射系数( $\sigma_{sp}$ )和 SSA 的日变化特征

Fig. 3 Average diurnal cycles of PM<sub>2.5</sub> mass concentration, absorption coefficient ( $\sigma_{ap}$ ), scattering coefficient ( $\sigma_{sp}$ ) and SSA

## 2.2 消光系数的日变化特征

图 3 为合肥市 2019 年 11 月 5 日—12 月 10 日  $PM_{2.5}$ 、吸收系数  $\sigma_{ap}$ 、散射系数  $\sigma_{sp}$  和 SSA 的日变化规律。各变量具有明显的日变化特征，均呈明显的双峰变化，波峰到波谷的日变化规律与上海市冬季<sup>[12]</sup>观察到的是相似的。其日变化特征主要与局地排放特征和气象条件有关<sup>[13]</sup>。图 4 呈现的气象条件(温度, 相对湿度和风速)的日变化图可以看出,  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{ap}$  与  $\sigma_{sp}$  的日变化相似, 第一个峰值发生在清晨 8:00 至 10:00, 这与早高峰时段交通活动和人类活动的积累, 低温、低风速、低行星边界高度的气象条件下, 大量气溶胶的排放和次级气溶胶的形成相一致<sup>[2]</sup>。

值得说明的是,  $\sigma_{ap}$  与  $\sigma_{sp}$  第一个峰值有一个时间上的延迟, 这可能是由于气态前体物形成二次气溶胶需要一定的时间, 而吸收系数的主要来源是交通源排放的黑碳物质。到达第一个峰值之后, 随着太阳辐射的增强, 大气边界层升高, 大气湍流运动开始活跃, 污染物易于扩散, 导致  $PM_{2.5}$  含量降低, 同时  $\sigma_{ap}$  逐渐下降, 15:00 降至谷值, 而  $\sigma_{sp}$  在 18:00 降至谷值。日落后随着交通排放量的增加,  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{ap}$  与  $\sigma_{sp}$  再次呈现增加趋势, 第二个高峰出现在 20:00—21:00, 这主要是由于夜晚交通源和烹饪源引起的<sup>[2]</sup>。同时, 混合高度和风速的降低以及环境温度比下午相对较低, 导致污染物易于在近地面处积累<sup>[2, 13]</sup>, 可能加剧了这些影响。随着夜晚来临, 人类活动减少,  $\sigma_{ap}$  与  $\sigma_{sp}$  再次逐渐下降。SSA 的日变化特征刚好与  $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{sp}$  的相反, 表现出早晚低, 白天高的规律, SSA 最大值出现在 14:00, 这与南京市的 SSA 规律是一致的<sup>[1]</sup>, 午后光散射气溶胶增强, 反映了在强烈的太阳辐射和高温条件下的光化学过程中次生气溶胶的形成。

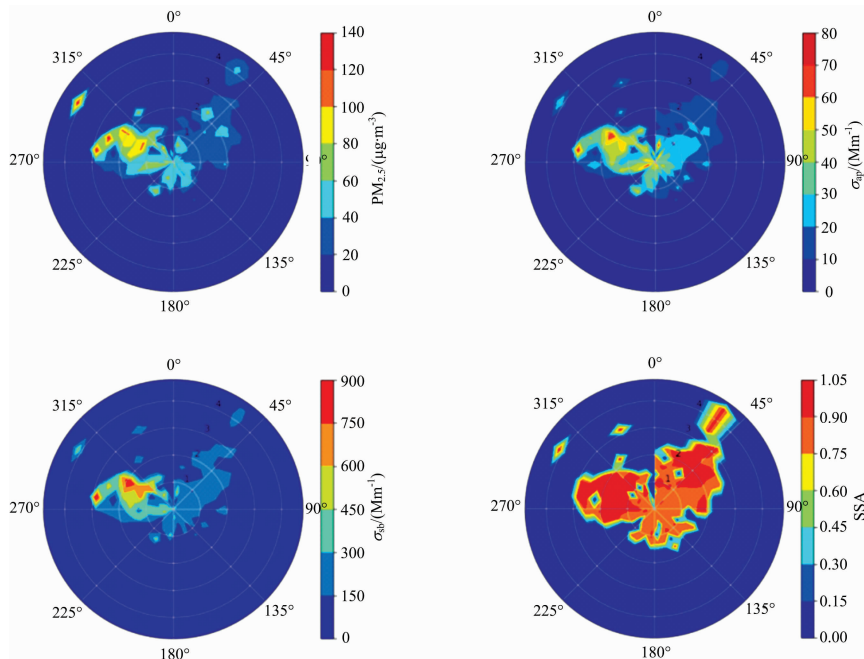


图 5  $PM_{2.5}$  质量浓度、吸收系数 ( $\sigma_{ap}$ )、散射系数 ( $\sigma_{sp}$ )、SSA 的风向依赖图  
Fig. 5 Wind speed and direction dependence maps of  $PM_{2.5}$  mass concentration, absorption coefficient ( $\sigma_{ap}$ ), scattering coefficient ( $\sigma_{sp}$ ) and SSA

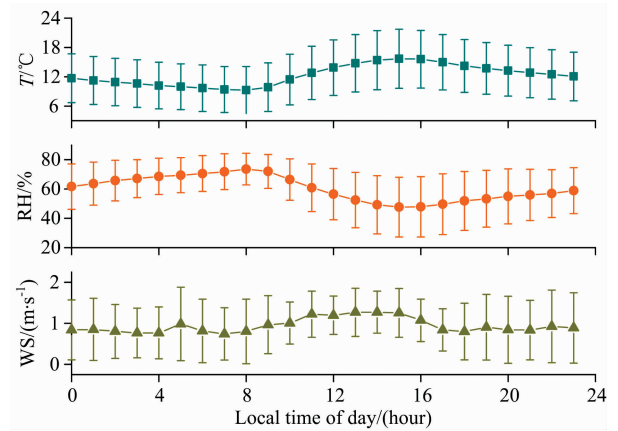


图 4 平均温度 ( $T$ )、相对湿度 (RH) 和风速 (WS) 的日变化  
Fig. 4 Diurnal variations of temperature ( $T$ ), relative humidity (RH), and wind speed (WS)

## 2.3 气溶胶光学特性的风依赖性

气象条件对光学性质有重要影响, 特别是风速风向对大气中颗粒物的扩散和输运有很大影响<sup>[2, 13]</sup>。图 5 给出了  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{sp}$  和 SSA 的风依赖关系, 其中  $r$  坐标代表风速、角度坐标代表风向。由于静稳的天气有利于污染物积累和形成,  $PM_{2.5}$ 、吸收系数  $\sigma_{ap}$ 、散射系数  $\sigma_{sp}$  的高值大多处在弱风 (风速  $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的区域。浓度值超过  $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的  $PM_{2.5}$  除了在低风速下分布较多, 在风速  $> 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下  $PM_{2.5}$  浓度也会出现高值, 说明较高的风速也容易输送周边的污染物。不同风向造成污染气团传输路径不同, 从图 5 可以看出, 合肥盛行风主要是东北风和西风, 这两个方向的

气团主要来自于内陆污染较重的地区,因此在此风向下  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  浓度容易出现高值。在整个研究期间,  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$  和  $\sigma_{ap}$  的低值大多出现在东北风向,  $1\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速区域内,原因是北风通常伴随着冷锋系统和高风速出现<sup>[14]</sup>,清洁的气团可以清除空气污染物,稀释效应导致各参数数值较低。SSA 的风依赖性 with 西北风区出现高值的散射系数非常相似,同时,东北风在低速吹时,SSA 值也较低,表明周边污染羽流的影响显著。

#### 2.4 合肥气溶胶的潜在源区

利用 PSCF 法和 CWT 法识别对合肥秋季散射系数有贡

献的潜在排放源。图 6 为观测期间合肥 72 小时后向轨迹聚类分析、PSCF 法和 CWT 法的分析结果,可以看出气团主要来源于合肥的西北方向,结合表 2 可知,占比最高的气团 1 和 3 分别来自于内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区,而 2 和 6 类气团占比不高,但散射系数含量是较高的,2 类气团来自于陕西省宝鸡市,工业污染严重,6 类气团源于内蒙古,途径山西省、山东省、江苏省,从安徽省的东南方向到达合肥,携带较多的污染物。4 类气团源于新西伯利亚地区,5 类气团占比最低,源于浙江省,途径江西省,从安徽省的东南方向到达合肥。

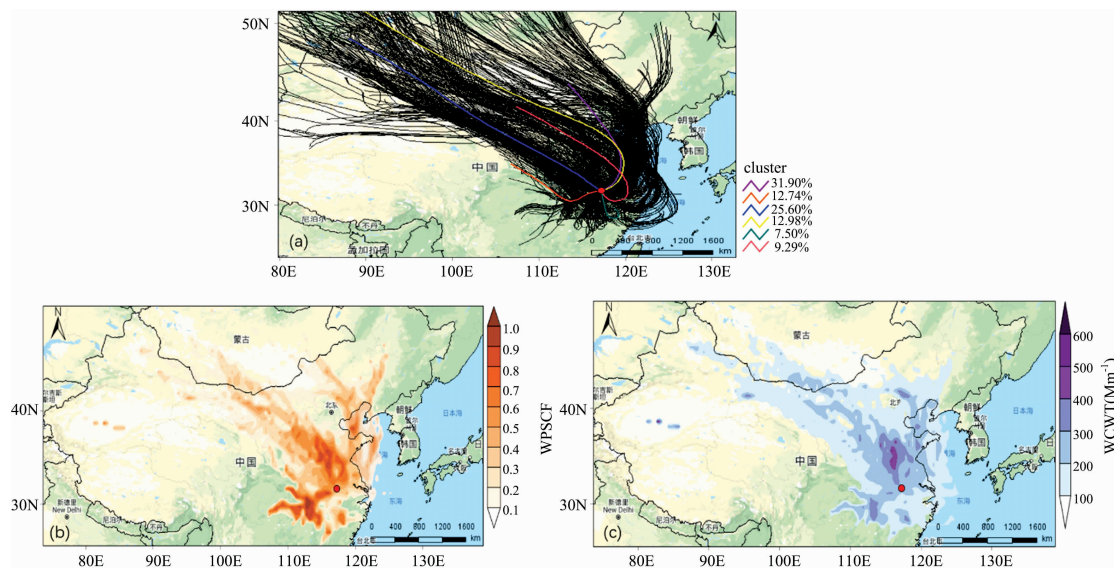


图 6 合肥市后向轨迹聚类分析 (a), PSCF (b) 和 CWT (c) 分析

Fig. 6 Analysis of backward trajectory distributions (a), PSCF (b) and CWT (c) in Hefei

表 2 合肥各气团在 500 m 处的轨迹数和平均散射系数含量

Table 2 Trace number and average scattering coefficient content of each air mass in Hefei at 500 m

Cluster	Number	Mean $\pm$ SD/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Ratio/%
1	268	367.51 $\pm$ 280.64	31.90
2	121	524.19 $\pm$ 309.33	12.74
3	225	422.50 $\pm$ 248.07	25.60
4	109	464.39 $\pm$ 122.77	12.98
5	63	384.67 $\pm$ 71.82	7.50
6	78	536.49 $\pm$ 170.31	9.29

从图 6(b)可以看出研究期间 PSCF 较大值 (>0.5) 主要分布在合肥的西北方向和西南方向,西北方向包括山西省的中部、山东省的西南部、河南省的东部、江苏省的西北部、安徽省的北部地区,西南方向包括武汉市、湖南省的东北部,还有部分 PSCF 高值分布在黄海水域。总的来说,散射系数具有长距离迁移的趋势,其来源具有区域性,远源的气溶胶可以在适宜条件下对合肥气溶胶散射系数产生深远的影响<sup>[15]</sup>。从图 6(c)分析出合肥秋季 CWT 高值主要分布在河南省东北部、山东省西南部、安徽省的北部地区。尤其是山东省济宁市,河南省商丘市的污染物通过远距离传输至合肥,

导致气溶胶散射系数值大于  $400\text{ Mm}^{-1}$ 。总的来说,本地排放对散射系数的贡献值不明显,外源输入是造成合肥市大气气溶胶散射系数含量超标的重要原因。

### 3 结论

研究期间合肥市  $PM_{2.5}$  浓度、气溶胶散射系数和吸收系数平均值分别为  $(43\pm 25)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $(238.70\pm 161.52)\text{ Mm}^{-1}$ ,  $(32.04\pm 17.01)\text{ Mm}^{-1}$ , 气溶胶光学特性的时间变化趋势与  $PM_{2.5}$  较为一致。吸收系数和散射系数的日变化均呈现双峰特征,第一个峰值出现在早上 8 点至 10 点,与早高峰时段交通和人类活动的积累,低温、低风速、低边界高度的有关,第二个峰值出现在晚上 20 点至 21 点,主要受夜晚交通源和烹饪源影响。光学性质对风速和风向有明显的依赖性。当从合肥东南方向吹来的强风时,较清洁的气团显著清除了空气污染物,导致  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$  值偏低。当风向为西北风时,携带二次气溶胶的气团被输送到合肥,造成较高的  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$ 。  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$ ,  $\sigma_{ap}$  的高值大多处在弱风(风速 <  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的部分,但较高的风速也易输送周边的污染物。结合 2019 年秋季气溶胶散射系数的数据,使用聚类分析、PSCF 和 CWT 方法,对运输途径、区域排放源和量化的贡献

进行了评估,结果显示在影响合肥市的气流轨迹中,污染轨迹多来自合肥市的西北方向。山东省济宁市、河南省商丘市等外源输入的污染物对合肥气溶胶散射系数值贡献较大,本地排放对散射系数的贡献值相对不明显。

## References

- [1] HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun(黄聪聪, 马 嫣, 郑 军). *Environmental Science(环境科学)*, 2018, 39(7): 2057.
- [2] Wang T T, Du Z F, Tan T Y, et al. *Atmospheric Environment*, 2019, 206: 293.
- [3] Xing C Z, Liu C, Wang S S, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(23): 14275.
- [4] XIANG Hong, YU Jia-yan, WANG Jun, et al(向 洪, 余家燕, 王 军, 等). 2018, 41(7): 110.
- [5] Xing C Z, Liu C, Wang S S, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(6): 3289.
- [6] Tan H B, Liu L, Fan S J, et al. *Atmospheric Environment*, 2016, 131: 196.
- [7] ZHOU Bian-hong, CAO Xia, ZHANG Rong-rui, et al(周变红, 曹 夏, 张容瑞, 等). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报)*, 2020, 15(3): 196.
- [8] Hong Q Q, Liu C, Hu Q H, et al. *Atmospheric Research*, 2019, 228(1): 206.
- [9] GUO Qian, WANG Jia-yang, ZHOU Zi-hang, et al(郭 倩, 汪嘉杨, 周子航, 等). *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2018, 38(2): 629.
- [10] Jing J S, Wu Y F, Tao J, et al. *Particuology*, 2015, 18: 144.
- [11] YAO Qing, HAN Su-qin, CAI Zi-ying, et al(姚 青, 韩素芹, 蔡子颖, 等). *China Environmental Science(中国环境科学)*, 2012, 32(5): 795.
- [12] Xu J, Tao J, Zhang R, et al. *Atmospheric Research*, 2012, 109-110: 25.
- [13] Zhang C X, Liu C, Hu Q, et al. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 100.
- [14] Ma N, Zhao C S, Nowak A, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 5959.
- [15] ZHANG Xin, LI Zhong-qin, MING Jing, et al(张 昕, 李忠勤, 明 镜, 等). *Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报)*, 2019, 39(1): 212.

## Characteristics of Aerosol Optical Properties and Their Potential Source in Hefei in Autumn

OU Jin-ping<sup>1</sup>, LIU Hao-ran<sup>1\*</sup>, ZHU Peng-cheng<sup>1</sup>, XU Heng<sup>1</sup>, WANG Zhuang<sup>2</sup>, TIAN Yuan<sup>1</sup>, LIU Guo-hua<sup>1</sup>, LI Qi-hua<sup>1</sup>

1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China

2. Key Lab of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract** Aerosols directly disturbs the earth's radiation budget and climate by absorbing and scattering solar radiation, indirectly affecting the formation of cloud condensation nuclei, and further changing the optical properties. A field study was carried out using an aethelometer and nephelometer from 5 November to 10 December 2019 in Hefei. Based on the meteorological data, diurnal variation and wind dependence of the optical properties of aerosols were analyzed. The average  $PM_{2.5}$ , aerosol scattering coefficient ( $\sigma_{sp}$ ), absorption coefficient ( $\sigma_{ap}$ ) in autumn in Hefei were  $(43 \pm 25) \mu g \cdot m^{-3}$ ,  $(238.70 \pm 161.52) Mm^{-1}$ , and  $(32.04 \pm 17.01) Mm^{-1}$ , respectively, and the trend of time variation of  $\sigma_{sp}$  and  $\sigma_{ap}$  was consistent with  $PM_{2.5}$ . The contents of  $PM_{2.5}$ ,  $\sigma_{sp}$ , and  $\sigma_{ap}$  have significant double-peak daily variation characteristics, peaking at 8:00—10:00 and 20:00—21:00, which was mainly related to traffic emissions and meteorological conditions. The wind dependence of aerosol optical properties in Hefei mainly reflects that the weather conditions of low temperature, high humidity and low wind are conducive to the accumulation and formation of pollutants, but the higher wind speed is also easy to transport pollutants around. The  $\sigma_{ap}$  and  $\sigma_{sp}$  were mainly affected by the pollution air mass in the northwest wind direction. Based on the HYSPLIT backward trajectory model, the spatial characteristics of different transport pathways were analyzed by cluster analysis, and the potential source contribution method (PSCF) and concentration weight trajectory method (CWT) were used to investigate the potential source area distribution of Hefei. The results showed that the polluted air masses mainly originated from the northwest of Hefei. The highest proportion of air masses 1 and 3 were from Inner Mongolia Autonomous Region and Xinjiang Uygur Autonomous Region. Air mass 2, which contributes more to the scattering coefficient, comes from Baoji City, Shaanxi Province, and air mass 6, which originates from Inner Mongolia, passes through Shanxi, Shandong and Jiangsu Provinces, and arrives at Hefei from the

southeast of Anhui Province, carrying more pollutants. PSCF larger value was mainly distributed in the northwest and southwest of Hefei. The high CWT values in autumn in Hefei were mainly distributed in northeast Henan Province, southwest Shandong Province and North Anhui Province. In particular, Jining city in Shandong Province and Shangqiu city in Henan Province are the potential sources of air quality in Hefei.

**Keywords** Aerosol; Wind dependence; Scattering coefficient; Hefei; Potential source region

(Received Aug. 4, 2020; accepted Dec. 29, 2020)

\* Corresponding author

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

## 《光谱学与光谱分析》2022年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN码：GYGFED，国内外公开发行人，大16开本，332页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价95元，全年1140元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的CJCR, CNKI, CSCD, SCI, AA, CA, Ei, AJ, PJK, MEDLINE, Scopus等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海市监广登字20170260号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路76号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070, 62182998

电子信箱：chnghpxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：http://www.gpxygpfx.com

