

DOI:10.11918/201905053

大城市城区黑碳气溶胶来源及其污染特性试验

兰 剑¹, 闫 莹¹, 乔利平²

(1. 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室(华东理工大学), 上海 200237;
2. 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室(上海市环境科学研究院), 上海 200233)

摘 要: 为了解大城市城区黑碳气溶胶(black carbon, BC)来源及其污染特性, 以上海城区为例, 通过2014年在线连续监测黑碳气溶胶、PM_{2.5}、主要污染气体的浓度及气象参数变化的实验研究, 获得相关参数以评估上海市城区BC污染特征、来源分布及对大气消光作用的影响。结果表明: 黑碳质量浓度年均值达(3.11 ± 2.40) μg/m³, 有典型的双峰型日变化; 黑碳质量浓度冬季高((3.82 ± 3.32) μg/m³), 夏季低((2.56 ± 1.37) μg/m³), 与PM_{2.5}有较好的相关性, 最高的BC与PM_{2.5}比7.37%出现在功能秋季。黑碳气溶胶的光学吸收系数为(44.8 ± 31.8) Mm⁻¹, 在消光作用中的比例为14.9%。低风速、低降雨量和低温都不利于黑碳气溶胶的扩散传输和沉降。此外, 研究结果表明, 上海北部及西北部地区的传输对黑碳质量浓度影响较大, 不同方向各类气团轨迹对应的黑碳质量浓度有季节性差异, 表明黑碳气溶胶污染为局地排放源和外来传输共同作用的结果。

关键词: 黑碳气溶胶; 吸收系数; 气象因子; 聚类分析

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)11-0053-10

Experimental analysis on sources and pollution characteristics of black carbon in metropolitan areas

LAN Jian¹, YAN Ying¹, QIAO Liping²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process (East China University of Science and Technology), Shanghai 200237, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex (Shanghai Academy of Environmental Sciences), Shanghai 200233, China)

Abstract: To understand the sources and pollution characteristics of black carbon (BC) aerosols in metropolitan areas, the mass concentration and meteorological parameters of BC, PM_{2.5}, and other pollutants in Shanghai urban areas in 2014 were experimentally studied. Relevant parameters were obtained to evaluate BC pollution characteristics, source distribution, and effects on atmospheric extinction in Shanghai urban area. Results show that the mass concentration of BC had typical diurnal double-peak variations, and the annual average value reached (3.11 ± 2.40) μg/m³. The mass concentration of BC also showed an obvious seasonal variation trend that the value was high in winter ((3.82 ± 3.32) μg/m³) and low in summer ((2.56 ± 1.37) μg/m³). In addition, it had a good correlation with PM_{2.5}, and the ratio of BC/PM_{2.5} was the highest in autumn (7.37%). The value of BC absorption coefficient was (44.8 ± 31.8) Mm⁻¹, and the ratio of absorption in extinction was 14.9%. Low wind speed, low rain frequency, and low temperature conditions were not conducive to the diffusion, transmission, and settlement of BC. Besides, it was found that the transmission in the north and northwest areas of Shanghai had a great influence on the mass concentration of BC, and the pollution trajectories of different air mass types accounted for the seasonal differences of BC concentration, indicating that the pollution of BC aerosols is the result of both local emission sources and external transmission.

Keywords: black carbon; absorption coefficient; meteorological factor; cluster analysis

黑碳气溶胶(black carbon, BC)是大气气溶胶的重要组成部分, 主要产生于化石燃料、生物质的不完全燃烧过程, 是对太阳光有吸收作用的含碳颗粒物^[1]。有研究指出: 黑碳对全球气候变暖贡献15%~30%, 成为导致全球变暖的第二影响因子^[2]。黑碳气溶胶对大气气溶胶的光学吸收作用有主要贡

献, 同时导致能见度的降低, 并改变地球的辐射平衡^[3-4]。黑碳气溶胶也可以通过加热空气, 改变大气气候循环稳定性^[5], 增加对太阳辐射的吸收, 并影响云的寿命和降水模式^[3]。PM_{2.5}和黑碳气溶胶的质量浓度变化受污染源排放强度和温度、相对湿度、风速大小^[6]、降雨频率^[7]等气象条件变化的共同影响, 再结合日变化和季节性^[8]黑碳污染特征, 定性分析黑碳气溶胶的参数变化。王月华等^[9]对苏州地区黑碳气溶胶在不同天气背景场、污染物输送轨迹

收稿日期: 2019-05-03

作者简介: 兰 剑(1994—), 男, 硕士研究生

通信作者: 闫 莹, wendy@ecust.edu.cn

以及不同降水条件下的扩散情况进行讨论. 龙时磊等^[10]分析上海冬季近地面逆温层对颗粒物的影响, 得出高相对湿度、低风速和低温会导致颗粒物质量浓度升高的结论. 黑碳气溶胶污染的形成除受本地污染源影响的, 还与外源传输有关. Wang 等^[11]通过分析气团后向轨迹研究 2013 年重污染期间到达上海颗粒物外源的传输特征, 石春娥等^[12]也对长三角地区中上海市、南京市、杭州市和合肥市的大气颗粒物的外来输送特征进行探讨. 一些学者^[13-16]也利用潜在源贡献因子法和浓度权重轨迹法来分析影响观测点污染物浓度的源区贡献差异. 朱晶等^[17]对抵达温州的气流后向轨迹进行聚类, 分析不同输送途径的空间特征及其对颗粒物聚集的贡献. 这些研究有利于分析大气中污染物的变化趋势和潜在来源, 也为多城市区域空气质量联合治理提供科学依据.

上述研究多为对某短期重大污染事件进行后向轨迹的分析, 将黑碳质量浓度的变化特征和影响因素的描述与季节性聚类分析共同探讨的研究较少. 本研究根据 2014 年全年黑碳质量浓度的逐时在线监测数据, 讨论了季节、月均值、日均值的变化特征, 黑碳质量浓度在 $PM_{2.5}$ 中比例变化及与其他污染物的相关性. 此外, 根据黑碳质量浓度与地面气象数据的关系, 讨论不同季节风速对黑碳质量浓度分布的影响, 以及黑碳气溶胶对太阳光的吸收作用对大气总消光作用的贡献. 最后利用 HYPSPLIT (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) 后向轨迹模型和潜在源贡献 PSCF (potential source contribution function) 方法, 对气流的输送轨迹和浓度进行聚类计算和分析, 探究观测期间上海城区黑碳气溶胶的外来传输方向和潜在源区, 以期上海市城区局地空气治理政策的制定提供参考.

1 试 验

1.1 数据来源

观测时间为 2014 年全年, 观测点位于上海市环境科学研究院观测站 ($121.42^{\circ}E, 31.16^{\circ}N$), 主要受交通及生活源排污影响. 黑碳质量浓度的实时在线监测仪器为美国 Magee Scientific 公司生产的 AE-31 型黑碳在线监测仪, 仪器利用黑碳对光的吸收特性来测量光线透过滤膜时产生的衰减, 本试验采用的是黑碳仪在 880 nm 波段时间分辨率为 5 min 的监测数据. $PM_{2.5}$ 的质量浓度是通过 β 射线衰减原理的赛默飞世尔科技公司 FH62 C14 系列在线大气颗粒物浓度监测仪测得. 地面气象数据 (风速、风向、温度、湿度和降水量) 由美国 METONE 气象分析仪测得. 450, 550, 700 nm 3 个波长的总散射系数和后向

散射系数由美国 TSI 公司生产的 3563 型积分浊度仪测得. 同时, 气态污染物的吸收系数由观测的 NO_2 气体的体积分数经相关计算^[18]得到. 后向轨迹模式采用的气象资料为 NCEP (美国国家环境预报中心) 提供的全球资料同化系统 (GDAS) 数据.

1.2 光学参数的计算

大气能见度的变化与太阳辐射的散射和吸收作用有关^[19], 其中, 大气总消光系数定义为

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sp} + \sigma_{ap} + \sigma_{sq} + \sigma_{aq}. \quad (1)$$

式中: σ_{ext} 为大气总消光系数, σ_{sp} 为颗粒物的散射系数, σ_{ap} 为颗粒物吸收系数, σ_{sq} 为气体散射系数, σ_{aq} 为气体吸收系数, 单位均为 Mm^{-1} . σ_{ap} 由黑碳监测仪测得的黑碳质量浓度 ρ (BC) 通过式 (2) 计算得到, 即

$$\sigma_{ap} = 8.28 \times \rho(BC) + 2.23. \quad (2)$$

式中: $\rho(BC)$ 为黑碳质量浓度, $\mu g/m^3$, 同时将波长为 880 nm 处黑碳气溶胶计算得到的吸收系数转化为 532 nm 波长处的黑碳气溶胶吸收系数, 再通过波长订正到 550 nm 处吸收系数, 表达式为

$$\sigma_{ap, 550\text{ nm}} = \sigma_{ap, 532\text{ nm}} (532/550). \quad (3)$$

σ_{sq} 为洁净空气环境下的大气散射系数, 常取定值 $13 Mm^{-1}$. σ_{aq} 一般为仅考虑二氧化氮吸收作用的气态污染物吸收系数.

1.3 聚类分析和 PSCF 分析

聚类分析方法是多个参数之间距离远近关系以一种统计量的方式来表示, 以此将多个样本归类分成一定类数的方法. 再将该聚类方法在不同输送方向和速度的气团轨迹结合, 计算空间相似度后对所有气团轨迹进行分类. 为了解观测点黑碳的传输路径, 采用角距离算法^[20]得到不同气团的传输类型, 并对各传输类型气团输送轨迹所对应的黑碳质量浓度数值特征进行统计分析.

PSCF 算法是根据气流形成的轨迹分析推测污染传输源区, 能计算不同浓度污染物的后向轨迹的来源地位置和从该位置传输到观测点的气流轨迹上污染物超标的概率. 首先, 将轨道区域的网格预设为经度和纬度间隔为 0.5° 的网格, 该网格将落在第 (i, j) 格点的后向轨迹端点总数记为 n_{ij} , 将后向轨迹端点在该格点内且对应的黑碳质量浓度超过设定的临界值的端点数目设为 m_{ij} , 则 $PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij}$ 的值越大, 表示该位置输送到观测位置的气流轨迹所造成的高污染潜在概率也越大. 然而, PSCF 是一种条件概率, 并且随着网格与采样点之间距离的增加, 误差会增加. 为了减小这种不确定性, 参考王郭成等^[21]对于权重的定义, 引入了权重函数 $W(n_{ij})$ 减少较小的 n_{ij} 造成的影响, 即将 $PSCF_{ij}$ 乘以一个自由设

定的权重系数, W_{ij} 设定如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}, \tag{4}$$

$$\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF}, \tag{5}$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < n_{ij}, \\ 0.70, & 20 < n_{ij} \leq 80, \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20, \\ 0.05, & n_{ij} \leq 10. \end{cases} \tag{6}$$

使用 WPSCF 方法分析观察期间黑碳质量浓度, 可以获得黑碳质量浓度的 WPSCF 分布特征, WPSCF 分析图中网格颜色代表该网格点的空气质量, 该格点颜色越暖, 其对应格点的气团在到达上海城区后更容易造成严重污染.

2 结果与讨论

2.1 黑碳质量浓度变化特征

观测期间, 上海市城区黑碳质量浓度的日均值变化范围为 $0.41 \sim 11.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 年均值为 $(3.11 \pm 2.40) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 黑碳对 $\text{PM}_{2.5}$ 的占比为 $(6.99 \pm 5.17)\%$. 表 1 为观测期间不同季节黑碳质量浓度的季节平均值和 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的平均值, 其中, 根据气象学规定, 春季为 3 月—5 月, 夏季为 6 月—8 月, 秋季为 9 月—11 月, 冬季为 12 月、1 月和 2 月. 不同季节黑碳质量浓度均值的最小质量浓度和最大质量浓度分别出现在夏季 $(2.56 \pm 1.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和冬季 $(3.82 \pm 3.32) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 春季黑碳质量浓度均值为 $(3.32 \pm 2.40) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 秋季为 $(2.77 \pm 1.87) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中, 夏季黑碳质量浓度仅为冬季的 66.7%. 与春季和夏季 (6.12% 和 7.12%) 相比, 秋季和冬季 (7.37% 和 7.35%) 的每月相对标准偏差 (标准差除以当月平均值) 高出 20%.

表 1 不同季节黑碳质量浓度均值和 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的平均值的变化

Tab. 1 Average values of BC mass concentration and BC/ $\text{PM}_{2.5}$ ratio in different seasons

季节	$\rho(\text{黑碳})/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比/%
春季	3.32 ± 2.40	6.12 ± 2.93
夏季	2.56 ± 1.37	7.12 ± 4.09
秋季	2.77 ± 1.87	7.37 ± 3.47
冬季	3.82 ± 3.32	7.35 ± 6.33

图 1 为观测期间上海城区黑碳质量浓度和 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的月平均值变化趋势, 月平均黑碳质量浓度范围为 $2.34 \sim 4.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 冬季的平均黑碳质量浓度 $(3.82 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 比夏季 $(2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 高 49.22%. 冬季黑碳的质量浓度均值 $(3.82 \pm 3.32) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 比年

平均值 $(3.10 \pm 2.26) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 高 23.22%, 而秋季和春季平均质量浓度分别比黑碳质量浓度的年均值低 10.64% 和高 7.10%. 观测期间黑碳质量浓度分别在 1 月 $(4.01 \pm 3.59) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、3 月 $(3.67 \pm 2.88) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 12 月 $(4.82 \pm 3.42) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 出现 3 个月均值峰值. 黑碳气溶胶的季节性变化为春、冬季节高于夏、秋季节, 与肖秀珠等^[22] 研究中典型的季节性黑碳气溶胶变化规律相近. 黑碳质量浓度峰值主要出现在冬季, 区域静稳天气不利于污染物的扩散, 此外冬季盛行西北风, 将京津冀和西北部城市的黑碳传输上海^[23]; 秋季黑碳污染水平也有小幅上涨, 主要和上海周边地区农业收成时期秸秆焚烧有关; 夏季因为黑碳气溶胶排放强度的减少、降水频率和降雨量大, 有利于黑碳质量浓度普遍低于 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而且上海夏季盛行东南风, 带来海上的清洁气团也对黑碳有清除作用^[22].

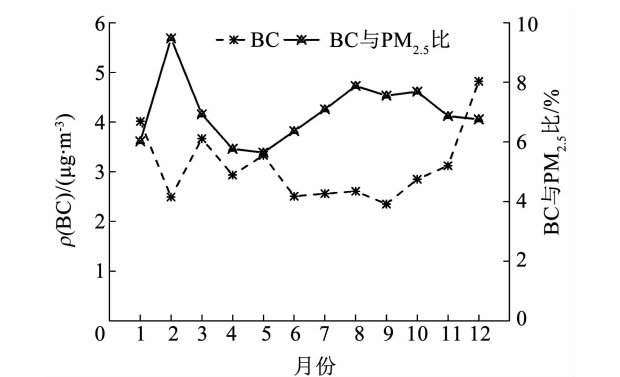


图 1 上海城区黑碳质量浓度和 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的月平均值变化

Fig. 1 Monthly variation of BC mass concentration and BC/ $\text{PM}_{2.5}$ ratio in Shanghai urban area

BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的月变化趋势与黑碳相反, 比值的月平均值为 6.98%, 范围为 6.05% ~ 9.03%. 秋季平均比例最高 (7.37%), 此时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较低 $(37.58 \mu\text{g}/\text{m}^3)$, 而最低的 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比 (6.11%) 出现在春季, 此时黑碳质量浓度较高 $(3.32 \mu\text{g}/\text{m}^3)$. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高, 即使 BC 质量浓度快速增加, BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比仍然较小, 特别是在 1 月 (6.01%) 最明显. 秋季 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比接近 8%, 可能受生物量燃烧的影响^[24]. 冬季 2 月 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比最高接近 10%, 而春季大部分低于 6%, 说明黑碳和 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放来源上有一致性^[25]. 但是, 清洁条件下的 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比高于污染时, 可能是随着污染的加重, $\text{PM}_{2.5}$ 中的二次成分发生化学反应而增高浓度^[26] 的同时, 主要来自一次源黑碳积累的速度较慢, 导致比值的降低.

图 2 为上海城区黑碳质量浓度在不同季节的日

际变化特征. 逐时黑碳质量浓度类似其他地区^[8,27]的典型昼夜质量浓度双峰特征,从早上 6:00 开始逐渐积累,并在上午 8:00—9:00 达到峰值 ($3.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$);郑庆锋等^[28]利用探空气象资料,得出上海地区 8 时和 20 时出现辐射逆温的频率最大,这与本研究中大气逆温现象发生规律以及机动车尾气排放特征符合. 随着气温和大气边界层高度的持续增大,更强的大气对流也有利于黑碳气溶胶在垂直方向上的扩散,黑碳质量浓度也缓慢下降并于 16:00 达到谷值 ($2.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$);18:00 以后伴随着大气混合层高度降低、大气对流减弱以及机动车尾气排放的增加,黑碳气溶胶在近地面形成堆积,导致在 21:00—22:00 出现第二个峰值 ($3.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$),且峰值倾向于比 16:00 的谷值高一倍. 午夜前后的人为活动和机动车尾气排放都减少,黑碳质量浓度逐渐下降,但在冬季仍维持在 $3.9 \sim 4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,秋季和春季维持在 $2.6 \sim 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,夏季维持在较低的 $2.1 \sim 2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 同时,冬季较其他季节的峰值和谷值出现时间晚 1 h,其原因主要为冬季在低温条件下逆温现象出现的频率高,不利于黑碳气溶胶在垂直方向的扩散,加重了黑碳的堆积. 另外,黑碳气溶胶日际变化早峰和晚峰值的大小差异也与近地面大气垂直扩散昼夜差异有关^[28]. 白天太阳辐射的增强有利于黑碳气溶胶在垂直方向运动并得到有效稀释,而夜晚太阳辐射减小,大气边界层高度降低,垂直对流扩散能力也减弱,因此,黑碳容易堆积^[27]. 春、夏、秋、冬白天黑碳峰值的小时质量浓度分别为 4.20 , 3.26 , 3.64 和 $4.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$,晚间黑碳峰值分别为 3.80 , 2.88 , 2.94 和 $4.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 从凌晨到第一个峰值的出现以及傍晚第二个峰值的出现,黑碳质量浓度的逐渐上升与下降趋势与通勤期间交通源排放强度的变化相对应,说明机动车尾气排放对城市黑碳气溶胶有重要来源贡献.

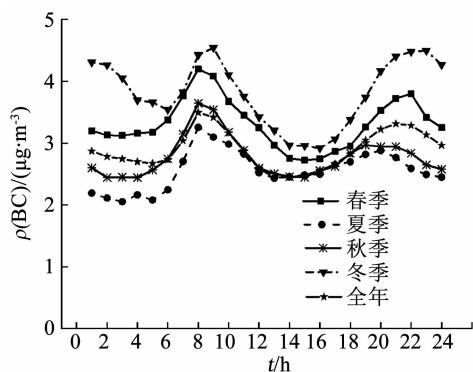


图2 上海市城区黑碳质量浓度在不同季节的日际变化

Fig. 2 Diurnal variation of BC mass concentration in Shanghai urban area in different seasons

观测期间黑碳日均值为 $(3.11 \pm 2.40) \mu\text{g}/\text{m}^3$,典型的双峰日变化趋势和季节变化特征与西安^[29]、天津^[30]、南京^[31]、北京^[32]等城市基本一致,黑碳排放水平与南京相当,低于其他城市,而且随气象参数和污染排放强度不同,峰值出现的时间有所不同.

2.2 黑碳气溶胶与其他污染物的关系

图3为黑碳气溶胶与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 污染物的日均值质量浓度的散点图. 黑碳气溶胶也是 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物的重要组成部分,因此,二者相关性较显著,对应相关性系数为 0.74. $\Delta\rho(\text{BC})/\Delta\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 0.048,该值高于南京北郊的 0.022^[31],可能与两地污染源和气象条件不同有关. 黑碳气溶胶与 CO 、 SO_2 的相关系数分别为 0.75 和 0.68,可见 CO 、 SO_2 与黑碳气溶胶也受部分来源的共同作用,尤其是黑碳气溶胶和 CO 都可由化石燃料和生物质燃料燃烧产生^[9],而且不同季节的污染物变化规律也相近. 观测期间 $\Delta\rho(\text{BC})/\Delta\rho(\text{CO})$ 比为 0.003 1,远高于南京的 0.001^[31],与杭州的 0.002 9^[33] 较接近. 而 SO_2 主要来源于观测点西南方化工园区化石燃料的燃烧,对黑碳污染也有贡献,而且 $\Delta\rho(\text{BC})/\Delta\rho(\text{SO}_2)$ 受不同季节风向的影响也有不同. 黑碳和 NO_x 的相关系数达 0.79,这是因为观测点附近二者共同的来源,即汽车尾气的排放会导致黑碳和 NO_x 质量浓度的升高.

2.3 吸收系数对大气消光作用的影响

黑碳气溶胶对太阳辐射具有很强的吸附性,黑碳质量浓度的变化也会影响气溶胶对太阳光的吸收作用从而影响大气能见度^[34]. 观测期间上海市城区颗粒物(黑碳气溶胶为主要吸光成分)吸收系数 σ_{ap} 的日变化范围为 $25.1 \sim 179.1 \text{ Mm}^{-1}$,年均值达 $(44.8 \pm 31.8) \text{ Mm}^{-1}$,春、夏、秋、冬 4 个季节吸收系数分别为 (47.5 ± 31.8) , (37.5 ± 18.2) , (40.3 ± 24.8) 和 $(54.1 \pm 44.0) \text{ Mm}^{-1}$,即冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 其中夏季吸收系数与杜荣光等^[35]测得的 $(35.8 \pm 10.5) \text{ Mm}^{-1}$ 基本相同,冬季则高于其测得的 $(42.3 \pm 17.7) \text{ Mm}^{-1}$. 图4中, σ_{ext} 的变化趋势与 $\sigma_{\text{ap}}/\sigma_{\text{ext}}$ 不同,说明气溶胶吸收系数对消光系数有贡献但是不能完全反映其变化规律. 观测期间各月的消光系数 σ_{ext} 变化范围为 $228.9 \sim 663.4 \text{ Mm}^{-1}$,年均值则达 339.7 Mm^{-1} ,观测期间 $\sigma_{\text{ap}}/\sigma_{\text{ext}}$ 的日变化范围为 2.0% ~ 33.8%,平均值为 14.9%. 与其他城市比较,上海的吸收系数与消光系数比例高于太湖(约 10%)^[36]和天津冬季(约 10.2%)^[37],低于西安泾河(约 24%)^[19]、广州(约 19%)^[25]. σ_{ap} 在 12 月份达到峰值 (67.42 Mm^{-1}),最小值出现在 9 月份 (35.82 Mm^{-1}),而 $\sigma_{\text{ap}}/\sigma_{\text{ext}}$ 的峰值出现在 10 月份 (18.3%),谷值出现在 1 月份 (8.2%). 其中,2 月份

σ_{ap} 下降明显, 从 58.16 Mm^{-1} 下降到 36.78 Mm^{-1} , 主要因为该月降水较多, 黑碳质量浓度因湿沉降的作用而下降, 同时 σ_{ap}/σ_{ext} 仍有上升, 表明 σ_{ext} 下降幅度更大. 夏季因降水和良好的边界层条件, σ_{ap} 保持在 37.26 Mm^{-1} 左右, 但是 σ_{ap}/σ_{ext} 从 13.12 Mm^{-1}

上升到 14.68 Mm^{-1} , 这可能因为颗粒物散射消光受相对湿度影响较大, 较高的湿度有助于散射组分吸湿增长, 从而增加了散射对消光作用的贡献^[38]. 上海位于东部沿海地区, 雨季较多的降水和较湿润的空气也会导致吸收作用对消光作用比例较低^[39].

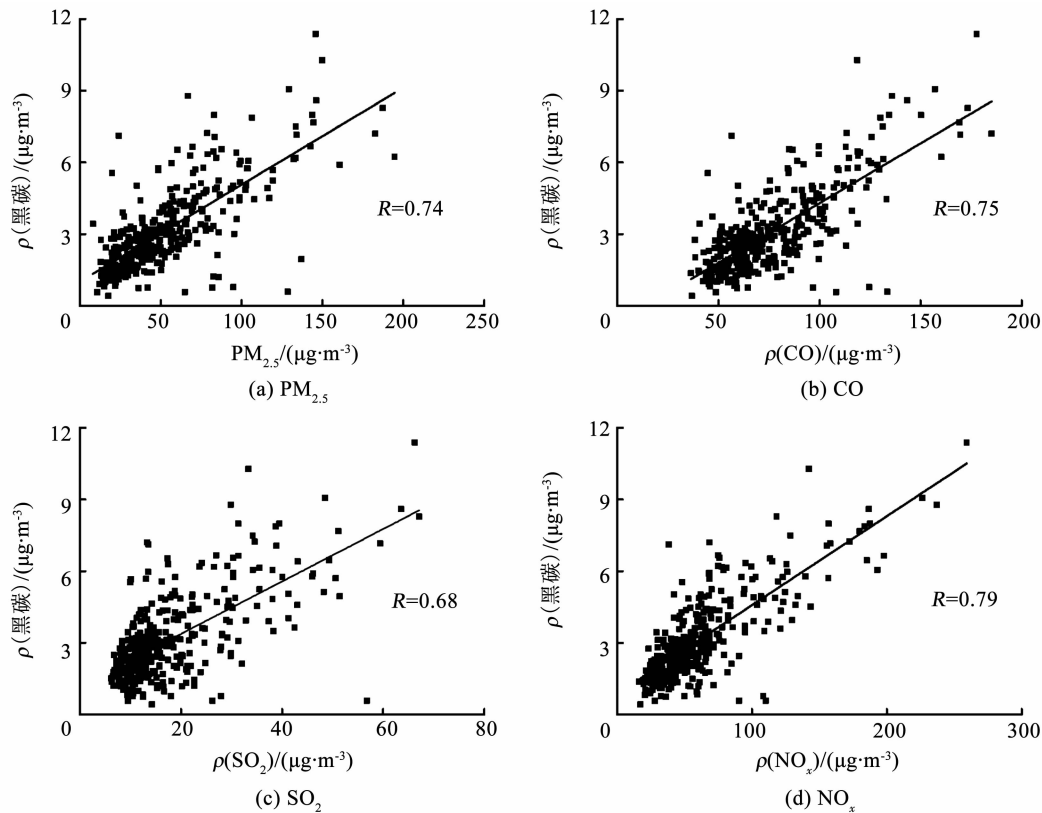


图 3 黑碳气溶胶与其他污染物日均值质量浓度的相关性

Fig. 3 Correlation between daily average mass concentration of BC and other pollutants

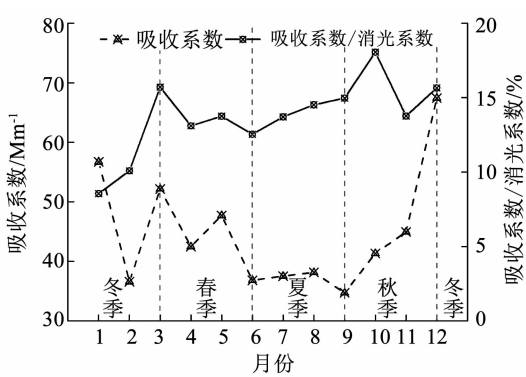


图 4 观测期间吸收系数及吸收系数占消光系数比值的月变化
Fig. 4 Monthly variation of absorption coefficient and ratio of absorption coefficient to extinction coefficient during observation

2.4 气象条件对黑碳质量浓度的影响

黑碳的季节变化主要受污染源排放强度和气象因素的共同影响^[40], 图 5 给出了黑碳和主要气象因子日变化趋势. 冬季上海温度较低, 燃烧采暖等活动增多的同时, 机动车燃料燃烧效率也有下降^[41], 导致污染物排放强度的增加. 排除 2 月大量降水的影

响, 比较夏季和冬季黑碳质量浓度随温度和相对湿度的变化, 相对湿度较高时, 夏季较高的温度造成湍流扰动增强比冬季的低温强, 而较低的温度也易在夜间形成逆温层^[42]. 气态污染物的扩散能力受边界层高度变化的影响^[43], 白天边界层高度的增加, 黑碳气溶胶在垂直方向扩散带来的稀释效果更充分, 这有利于降低黑碳气溶胶质量浓度.

不同季节黑碳质量浓度的日平均值与风速的关系不同, 当春季和冬季风速大于 5 m/s 时, 黑碳质量浓度下降明显, 但当风速在 3 m/s 以下时, 黑碳质量浓度变化较缓和. 这是由于空气流动减慢, 污染物扩散输送较慢, 容易形成堆积. 对每小时黑碳质量浓度和风速进行分类和计算, 可以获得不同风速下黑碳质量浓度的平均值, 当风速为 $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ m/s}$ 时, 黑碳质量浓度分别为 $5.9, 4.8, 3.7, 3.0, 2.5, 2.4, 2.3 \text{ μg/m}^3$, 大于 6 m/s 风速下黑碳质量浓度为 2.2 μg/m^3 . 风速增大到一定程度后, 黑碳气溶胶质量浓度不会出现明显的下降, 主要是由于地面扬尘被吹入空气, 同时较远距离污染源的黑碳也会被传

输过来,此时,黑碳质量浓度和风速之间没有明显的相关性. 因此,当本研究中风速低于 5 m/s 时,黑碳质量浓度与风速呈较明显的负相关性关系,此时大气扩散能力较弱,黑碳质量浓度主要受观测点附近排放源的影响;此外,当风速大于 5 m/s 时,黑碳质量浓度除受局地源排放强度影响外,也受垂直扩散条件和远距离外来传输共同的作用,这与朱厚玲等^[44]得出的结论一致.

2.5 聚类分析

为进一步了解观测期间黑碳在大气中的输送过

程,本研究利用后向轨迹模式和美国国家环境预报中心的气象资料,结合四季黑碳的质量浓度数据,对上海市城区 2014 年的黑碳输送过程进行模拟,通过聚类分析确定黑碳的外来传输路径. 分析观测期间几类气团,并结合实测数据,将气流轨迹分为 4 类. 图 6 分别给出了不同季节相应黑碳质量浓度的聚类轨迹,表 2 显示了不同季节各类轨迹占总轨迹数的比例,以及该类轨迹上黑碳气溶胶的平均质量浓度和标准差.

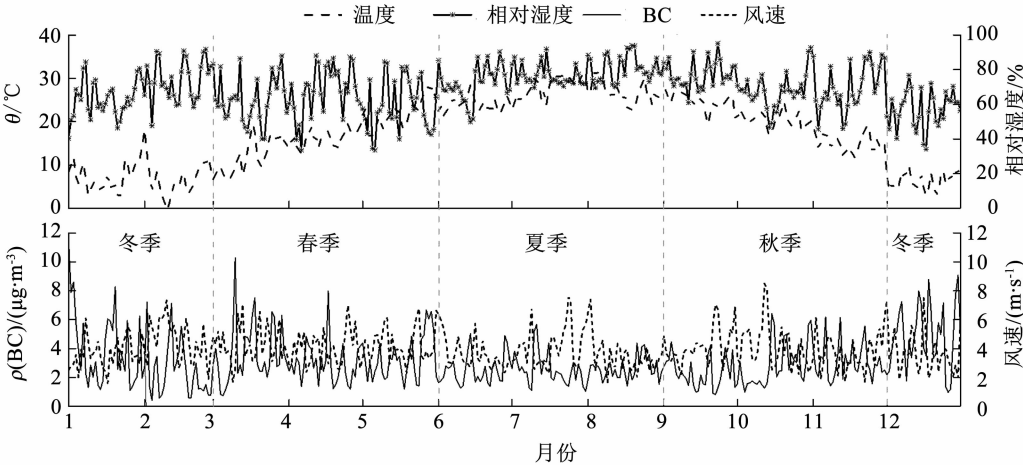
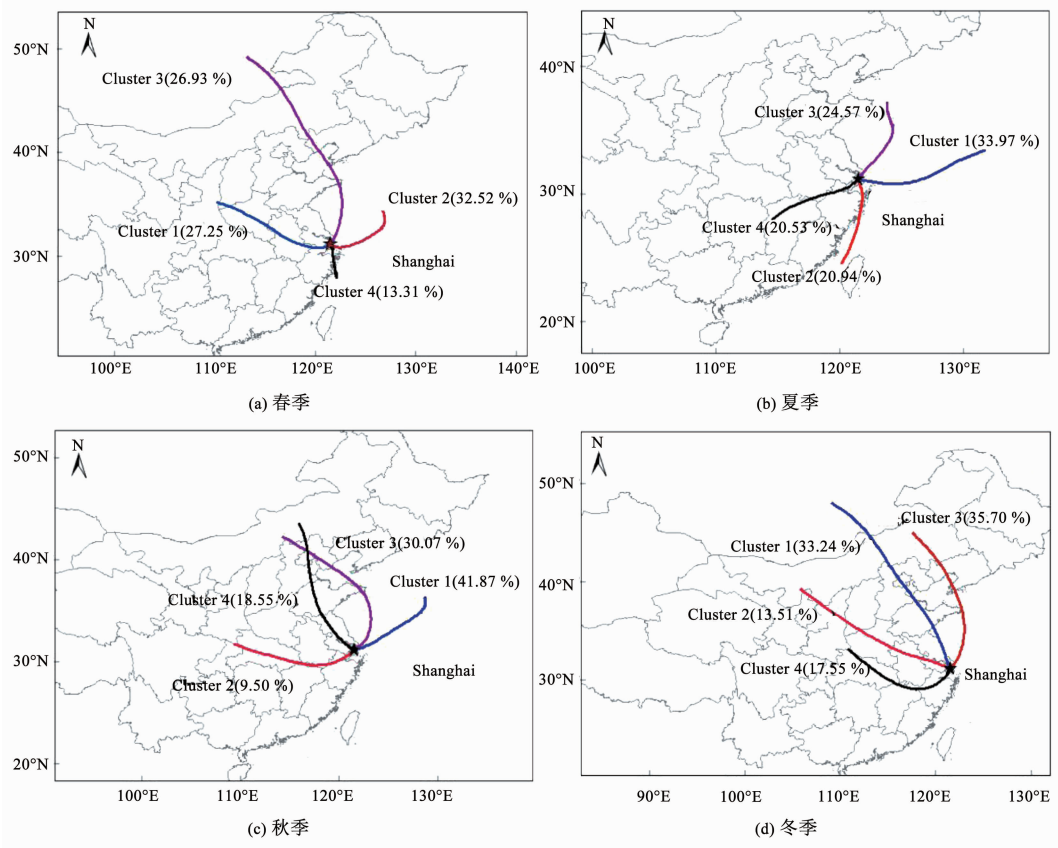


图 5 黑碳气溶胶及主要气象参数的日均值变化
Fig. 5 Daily variation of BC and major meteorological factors



括号内数字表示该轨迹数占轨迹总数的百分比

图 6 四季各类轨迹 72 h 的后向轨迹

Fig. 6 72-h backward trajectories of each trajectory cluster in different seasons

表 2 2014 年上海市不同季节黑碳质量浓度轨迹聚类结果的汇总统计

Tab.2 Summary of BC mass concentration of different trajectory clusters in Shanghai in different seasons in 2014

类别	春季		夏季		秋季		冬季	
	比例/	平均值 ± 标准	比例/	平均值 ± 标准	比例/	平均值 ± 标准	比例/	平均值 ± 标准
	%	差/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	%	差/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	%	差/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	%	差/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	27.25	3.65 ± 1.14	33.97	2.13 ± 1.34	41.87	2.02 ± 0.79	33.24	3.91 ± 2.08
2	32.52	2.29 ± 1.07	20.94	3.19 ± 1.47	9.50	4.19 ± 1.67	13.51	4.44 ± 2.54
3	26.93	1.76 ± 0.93	24.57	1.81 ± 1.05	30.07	2.64 ± 1.67	35.70	5.65 ± 2.46
4	13.31	3.63 ± 1.54	20.53	1.67 ± 0.88	18.55	3.73 ± 1.59	17.55	2.48 ± 1.78

注:比例表示对应轨迹数占总轨迹数的比例,平均值对应该类轨迹的黑碳质量浓度均值.

春季到达上海的气团主要来自西北部、北部及东北部,第 1 类和第 3 类轨迹共占 51.48%. 平均黑碳质量浓度最高(3.65 ± 1.14) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的第一类轨迹占总轨迹数的 27.25%,由北方的京津冀地区、山东省等地转移到上海. 此外,上海春季和冬季的主导风向是蒙古高压下的西北季风,而观测点位于污染轨迹下风地带的上海南部地区,更容易形成黑碳气溶胶的堆积. 因此,在冬季和春季,北方高质量浓度的黑碳气溶胶对观测的黑碳质量浓度结果有很大贡献. 另外,一些研究表明,在冬季和春季,来自某些地区的空气团可能携带着灰尘,而且该路径上山东和河北等地,大量的煤炭被用于采暖而产生的污染物也会到达上海^[13].

夏季上海市主导风向是来自海洋的东南季风,因此,该方向的第 1,2,3 类的轨迹占比较大,共占 79.48%. 此外,这些轨迹比第 4 类轨迹(1.67 ± 0.88) $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 带来更低的黑碳质量浓度,分别为(2.13 ± 1.34), (3.19 ± 1.47) 和 (1.81 ± 1.05) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 船舶交通的污染有一定的影响,但大多数来自海洋的轨迹都较为干净. 同时,第 4 类轨迹上的浙江和江西省的污染物也容易对观测点的黑碳水平有不利影响.

秋季以第 4 类(18.55%) 和第 2 类(9.5%) 为代表的轨迹污染更严重,黑碳质量浓度分别为(3.73 ± 1.59), (4.19 ± 1.67) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 秋季生物质燃烧现象在江苏、安徽等地依然存在,因此,在秋季盛行风向为西北风时,也会造成黑碳质量浓度的提高,而第 1 类和第 3 类轨迹中更多的是通过东部海洋短距离传输而来的黑碳气团,不易形成黑碳的污染.

冬季的 4 类轨迹中,来自江西、江苏和安徽等地的第 2 类轨迹传输来的黑碳气溶胶污染水平较高,轨迹占总轨迹的 13.51%. 第 2 类轨迹和第 3 类轨

迹平均黑碳质量浓度分别为(4.44 ± 2.54) 和 (5.65 ± 2.46) $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均远高于其他季节. 此外,第 4 类轨迹是来自京津冀、安徽和江苏等地的一条短程轨迹,对应黑碳质量浓度为(2.48 ± 1.78) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 同时,第 1 类比第 3 类具有更短的输送轨迹和更高的污染水平,这可能与较低的风速和逆温条件等不利气象因素以及局地大气污染物排放强度的增加有关,这也导致了黑碳气溶胶在冬季形成积累.

2.6 黑碳的潜在源分析

通过计算后向轨迹和观测的黑碳质量浓度获得其潜在源的空间分布如图 7 所示. 因为局地污染源的排放和不利的气象条件,全年黑碳的主要潜在源区主要分布在上海周边,包括京津冀、长三角和华东地区也有低水平的贡献,说明局地污染源对黑碳的贡献更大,此结论与 Du 等^[45]的发现一致. 高于 0.6 的 WPSCF 暖色点分散在观测点西北部,主要因为上海城区西北部化工园区的污染和华东地区其他城市的远距离传输都会对黑碳气溶胶的堆积产生影响^[46]. 春季和冬季,上海周边地区主要潜在污染源区包括浙江、江苏、安徽和京津冀地区. 同时,在夏季东风为主导风向,来自海洋的轨迹贡献较低的黑碳质量浓度. 而秋冬季上海主导北风,上海北部和西北部城市在秋季对观测点位的黑碳有主要贡献. 此外,春季 WPSCF 的较大值主要集中在江苏、山东和安徽等地,上海东部海域也有较小面积的深红色区域,可能主要是春季沙尘由西北向东部输送时造成污染. 夏季 WPSCF 较其他季节低,主要因为夏季主导的东风从海洋上吹来洁净空气的同时,较大的风速提供较好的水平扩散条件,有利于污染物的扩散. 秋季和冬季 WPSCF 的较大值主要集中在安徽、江苏和京津冀地区,可能是由于秋季主导的北风将上述地区产生的黑碳气溶胶传输到上海.

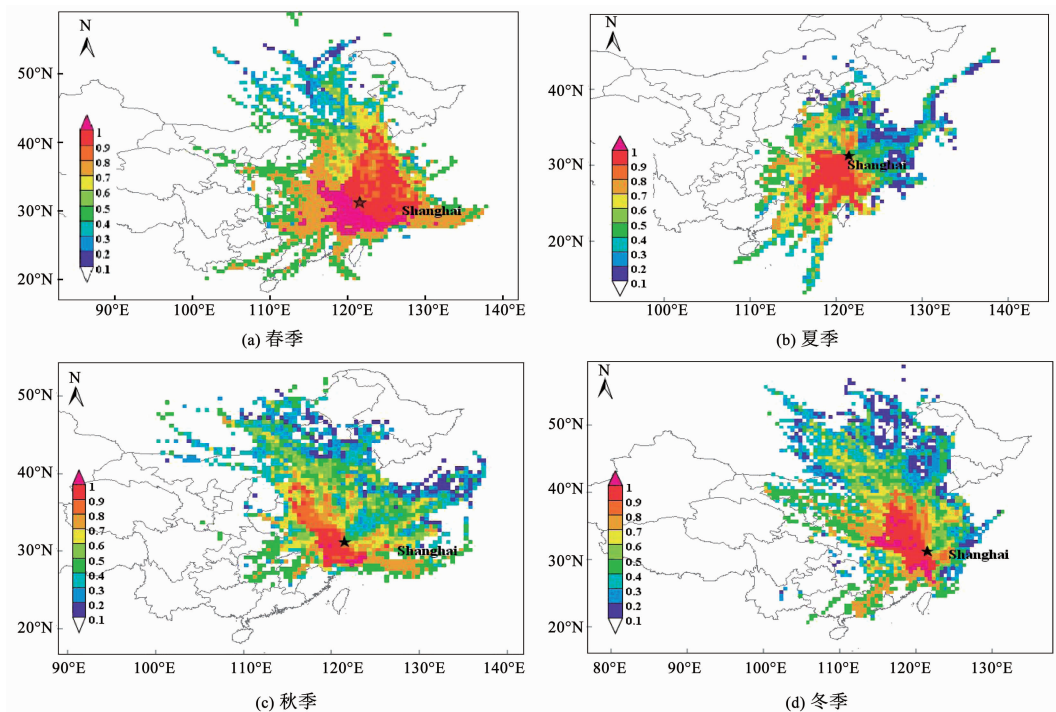


图 7 黑碳四季潜在源分析

Fig. 7 Spatial distributions of PSCF values of BC in different seasons

3 结 论

1) 观测期间,上海市城区黑碳气溶胶质量浓度的年均值为 $(3.11 \pm 2.40) \mu\text{g}/\text{m}^3$,呈冬季、春季高,夏季低季节性变化趋势;日际变化呈典型的双峰型趋势,峰值出现时间与交通量的上升和不利的边界条件对应。

2) 黑碳气溶胶质量浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 的质量浓度都有较显著的相关性,表明其受一定的共同排放来源影响;秋季 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 比的均值相比颗粒物污染水平高的秋冬季更高。观测期间上海市气溶胶吸收系数为 $(44.8 \pm 31.8) \text{Mm}^{-1}$,总消光系数为 $(339.7 \pm 280.6) \text{Mm}^{-1}$,吸收系数与总消光系数比值在 10 月达到峰值。

3) 冬季较夏季易形成逆温层,不利于黑碳气溶胶在垂直方向的大气对流运动中稀释。当风速大于 5 m/s 时,黑碳质量浓度受本地污染源排放强度和上风向城市传输的污染物共同的影响,与风速负相关性不明显。

4) 观测点西北部和北部为主要的黑碳气溶胶输送方向,春季有 51.48% 的气团经过京津冀、华东地区到达上海,冬季有 33.24% 的气团从北部由山东和江苏处传输到上海,31.06% 的气团经江西和安徽达到上海。WPSCF 结果也表明,上述地区黑碳的远距离传输对上海市城区黑碳污染贡献最大。黑碳质量浓度由局地排放源和外来输送的污染物共同作用。

参考文献

- [1] LIOUSSE C, PENNER J E, CHUANG C, et al. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996, 101 (D14): 19411. DOI:10.1029/95JD03426
- [2] FORBES M S, RAISON R J, SKJEMSTAD J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1): 190. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.06.007
- [3] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, 409 (6821): 695. DOI: 10.1038/35055518
- [4] PENNER J E, EDDLEMAN H, NOVAKOV T. Towards the development of a global inventory for black carbon emissions [J]. *Atmospheric Environment. Part A: General Topics*, 1992, 27(8): 1277. DOI: 10.1016/0960-1686(93)90255-W
- [5] LI M, LIAO C S, HWANG J K. Rapid calculation of time deviation and modified allan deviation for characterizing telecommunications clock stability [J]. *International Journal of Computers & Applications*, 2008, 30(2): 92. DOI: 10.1080/1206212x.2008.11441886
- [6] ZHANG Yang, HU Xiaoming, LEUNG L R, et al. Impacts of regional climate change on biogenic emissions and air quality [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113 (D18): 743. DOI: 10.1029/2008jd009965
- [7] ORLIC I, WEN X, NG T H, et al. Two years of aerosol pollution monitoring in Singapore: A review [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, 150(1/2/3/4): 457. DOI: 10.1016/S0168-583X(98)01053-2
- [8] LATHA K M, BADARINATH K V S. Seasonal variations of black carbon aerosols and total aerosol mass concentrations over urban

- environment in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (22): 4129. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.004
- [9] 王月华, 汤莉莉, 邹强, 等. 苏州地区黑碳气溶胶季节变化研究 [J]. *环境工程*, 2014, 32(增刊1): 544
WANG Yuehua, TANG Lili, ZOU Qiang, et al. Research on seasonal variation of BC concentration in Suzhou area [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(S1): 544
- [10] 龙时磊. 上海地区灰霾过程中的主要物理和化学问题研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2014: 42
LONG Shilei. Characteristics of major physical and chemical processes during haze day in Shanghai [D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics), 2014: 42
- [11] WANG Mengya, CAO Chunxiang, LI Guoshuai, et al. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 112. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.038
- [12] 石春娥, 翟武全, 杨军, 等. 长江三角洲地区四省会城市 PM_{10} 污染特征 [J]. *高原气象*, 2008, 27(2): 408
SHI Chune, ZHAI Wuquan, YANG Jun, et al. Pollution characteristics of PM_{10} in four provincial capitals in the Yangtze River Delta [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(2): 408
- [13] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 357
WANG Qian. Study of air pollution transportation source in Shanghai using trajectory model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(4): 357
- [14] WANG Y Q, ZHANG X Y, ARIMOTO R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at Xi'an, China during spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 875. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.03.040
- [15] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM_{10} 输送路径及其潜在源区 [J]. *大气科学学报*, 2012, 35(4): 477
LIU Na, YU Ye, CHEN Jinbei, et al. A study on potential sources and transportation pathways of PM_{10} in spring in Lanzhou [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, 35(4): 477
- [16] 郭勇涛, 余峰, 王金燕, 等. 兰州市 PM_{10} 输送途径与源区贡献的四季差异分析 [J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(5): 28
GUO Yongtao, SHE Feng, WANG Jinyan, et al. Four-season difference analysis of PM_{10} transport path and source area contribution in Lanzhou city [J]. *Environmental Pollution & Prevention*, 2018, 40(5): 28
- [17] 朱景, 袁慧珍. 温州市 $PM_{2.5}$ 输送轨迹特征和潜在污染源区分析 [J]. *浙江大学学报: 理学版*, 2015, 42(增刊): 124
ZHU Jing, YUAN Huizhen. Analysis on $PM_{2.5}$ transport trajectories and potential pollution source for Wenzhou area [J]. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2015, 42(S): 124
- [18] KANAYA Y, PAN X, MIYAKAWA T, et al. Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009-2015: Constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(16): 10689. DOI: 10.5194/acp-16-10689-2016
- [19] 杜川利, 余兴, 李星敏. 西安泾河夏季黑碳气溶胶及其吸收特性的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 613
DU Chuanli, YU Xing, LI Xingmin. Observed summer variation and absorption characteristics of black carbon at Xi'an suburban [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 613
- [20] SIROIS A, BOTTENHEIM J W. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and O_3 ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(D2): 2867. DOI: 10.1029/94JD02951
- [21] 肖秀珠, 刘鹏飞, 耿福海, 等. 上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比 [J]. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 158
XIAO Xiuzhu, LIU Pengfei, GENG Fuhai, et al. Observational comparison of black carbon aerosols in urban and suburban areas of Shanghai [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 158
- [22] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM_{10} 和 NO_2 输送路径及潜在源区研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, 33(12): 3009
WANG Guochen, WANG Jue, XIN Yujie, et al. Transportation pathways and potential source areas of PM_{10} and NO_2 in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2014, 33(12): 3009
- [23] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 [J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 1215
WANG Hongqiang, HE Qianshan, CHEN Yonghang, et al. Analysis of characteristics of black carbon concentration in Shanghai from 2008 to 2012 [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4): 1215
- [24] 李莉, 蔡望琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析 [J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2327
LI Li, CAI Junlin, ZHOU Min. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in Eastern and Middle China in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2327
- [25] 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1542
WU Dui, MAO Jietai, DENG Xuejiao, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 39(11): 1542. DOI: 10.1007/s11430-009-0115-y
- [26] FU Qingyan, ZHUANG Guoshun, LI Juan, et al. Source, long-range transport, and characteristics of a heavy dust pollution event in Shanghai [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D7): 6128. DOI: 10.1029/2009jd013208
- [27] SONG Shaojie, WU Ye, XU Jiayu, et al. Black carbon at a roadside site in Beijing: Temporal variations and relationships with carbon monoxide and particle number size distribution [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77(7): 213. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.055
- [28] 郑庆锋, 史军. 上海地区大气贴地逆温的气候特征 [J]. *干旱气象*, 2011, 29(2): 195
ZHENG Qingfeng, SHI Jun. Climate characteristics of atmospheric surface inversion in Shanghai area [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(2): 195
- [29] 朱崇抒, 曹军骥, 沈振兴, 等. 西安黑碳气溶胶的污染特征及其成因分析 [J]. *中国粉体技术*, 2009, 15(2): 66
ZHU Chongshu, CAO Junji, SHEN Zhenxing, et al. Variability of black carbon aerosol and analysis of influence factors over Xi'an atmosphere [J]. *China Powder Science and Technology*, 2009, 15(2): 66

- [30] 韩素芹, 冯银厂, 边海, 等. 天津大气污染物日变化特征的 WRF-Chem 数值模拟[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 828
HAN Suqin, FENG Yinchang, BIAN Hai, et al. WRF-Chem numerical simulation of diurnal variation characteristics of air pollutants in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2008, 28(9): 828
- [31] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3280
XIAO Sihan, YU Xingna, ZHU Bin, et al. Characteristics of black carbon aerosol pollution in the Northern suburb of Nanjing and analysis of its influencing factors[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3280
- [32] 王庚辰, 孔琴心, 任丽新, 等. 北京地区大气中的黑碳气溶胶及其变化特征[C]//中国颗粒学会年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会. 北京: 中国颗粒学会, 2002
WANG Gengchen, KONG Qinxin, REN Lixin, et al. Black carbon aerosols in the atmosphere of Beijing and their variation characteristics[C]//Proceedings of Annual Conference of China Granular Society and Seminar on Particle Technology on both sides of the Taiwan Strait. Beijing: Chinese Society of Particuology, 2002
- [33] 徐昶, 沈鑫, 叶辉, 等. 杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3026
XU Chang, SHEN Xin, YE Hui, et al. Study on pollution characteristics and sources of black carbon aerosol in Hangzhou[J]. China Environmental Science, 2014, 34(12): 3026
- [34] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 183
ZHANG Qiuying, NIU Shengjie, SHEN Jianguo, et al. Observational study on black carbon aerosol absorption characteristics in winter and spring in semi-arid region[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 183
- [35] 杜荣光, 齐冰, 周斌. 杭州市区大气气溶胶吸收系数观测研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 769
DU Rongguang, QI Bing, ZHOU Bin. An observation and research on aerosol absorption coefficient in urban site Hangzhou[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 769
- [36] XIA Xiangao, LI Zhanqing, HOLBEN B, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D22): 565. DOI: 10.1029/2007JD008859
- [37] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津城区秋冬季黑碳气溶胶观测与分析[J]. 环境化学, 2012, 31(3): 324
YAO Qing, CAI Ziying, HAN Suqin, et al. Observation and analysis of black carbon aerosol in autumn and winter in Tianjin city[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(3): 324
- [38] 徐薇, 修光利, 陶俊, 等. 上海市大气散射消光特征及其与颗粒物化学组成关系研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 379
XU Wei, XIU Guangli, TAO Jun, et al. Study on extinction characteristics of atmospheric scattering in Shanghai and its relationship with chemical composition of particulate matter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 379
- [39] 贺千山, 潘鹄, 黄颖, 等. 上海干霾与湿霾气溶胶消光特性的比较[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 497
HE Qianshan, PAN Hu, HUANG Ying, et al. Comparison of extinction characteristics between dry haze and wet haze aerosol in Shanghai[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2013, 49(4): 497
- [40] RIVAS I, VIANA M, MORENO T, et al. Outdoor infiltration and indoor contribution of UFP and BC, OC, secondary inorganic ions and metals in PM_{2.5} in schools[J]. Atmospheric Environment, 2015, 106: 129. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.055
- [41] SIMPSON R W, XU Hongchang. Atmospheric lead pollution in an urban area—Brisbane, Australia[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(19): 3073. DOI: 10.1016/1352-2310(94)00135-8
- [42] 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 49
DU Rongguang, QI Bing, GUO Huihui. Characteristics of atmospheric inversion in Hangzhou and its influence on air pollutant concentration[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27(4): 49
- [43] 杜川利, 余兴, 李星敏, 等. 西安郊区泾河秋、冬季大气黑碳变化及粒径特征[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 712
DU Chuanli, YU Xing, LI Xingmin, et al. Variation and particle size characteristics of atmospheric black carbon in autumn and winter in Jinghe River in Xi'an suburb[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 712
- [44] 朱厚玲. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003
ZHU Houling. Spatial-temporal distribution of black carbon aerosols in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2003
- [45] DU Zhenyu, HE Kebin, YUAN Cheng, et al. A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing I: Sources and its primary vs. secondary nature[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92(92): 514. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.060
- [46] PONGKIATKUL P, OANH N T K. Assessment of potential long-range transport of particulate air pollution using trajectory modeling and monitoring data[J]. Atmospheric Research, 2007, 85(1): 3. DOI: 10.1016/j.atmosres.2006.10.003

(编辑 刘 彤)