

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022091902

高燕, 黄虹, 杨心怡, 等. 南昌前湖区域黑碳的分布特征与光学特性[J]. 环境化学, 2024, 43(3): 999-1009.

GAO Yan, HUANG Hong, YANG Xinyi, et al. Distribution and optical properties of black carbon in Qianhu Area of Nanchang[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (3): 999-1009.

南昌前湖区域黑碳的分布特征与光学特性*

高燕^{1,2} 黄虹^{1,2}** 杨心怡^{1,2} 王嘉怡^{1,2} 邹长伟^{1,2}

(1. 南昌大学资源与环境学院, 南昌, 330031; 2. 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌, 330031)

摘要 2020年12月—2021年12月, 对南昌市前湖区域大气中黑碳(BC)进行连续观测, 研究BC的分布特征与光学特性. 结果显示, 南昌前湖区域eBC浓度2021年均值为 $(1.93\pm 1.13)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 有明显的季节变化, 冬季最高 $(2.10\pm 1.28)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季最低 $(1.69\pm 1.14)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; eBC浓度日分布表现为明显的双峰特征, 峰值出现在07:00—09:00和22:00—23:00. BC吸收系数、大气消光系数年均值为18.42、137.67 Mm^{-1} . eBC与 NO_2 的相关性强于eBC与 SO_2 、CO、 O_3 的相关性, 反映区域内BC受机动车尾气影响显著. eBC与风速呈负显著性相关(* $P<0.05$), eBC与气象因子相关性按从大到小顺序为风速>温度>相对湿度, 较大的风速更利于BC的扩散稀释. 本文研究结果可为区域碳气溶胶的污染防控及其辐射强迫的科学评估提供参考依据和数据支撑.

关键词 黑碳, 光学性质, 时空分布特征, 气象因子.

Distribution and optical properties of black carbon in Qianhu Area of Nanchang

GAO Yan^{1,2} HUANG Hong^{1,2}** YANG Xinyi^{1,2} WANG Jiayi^{1,2} ZOU Changwei^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang, 330031, China)

Abstract This paper carried out continuous observations of atmospheric black carbon (BC) in the Qianhu region of Nanchang to study the distribution characteristics and optical properties of BC from December 2020 to December 2021. The results of this paper showed that the average concentrations of eBC in the Qianhu region of Nanchang in 2021 was $(1.93\pm 1.13)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. There was a seasonal variation in eBC. The highest in winter was $(2.10\pm 1.28)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and the lowest in spring is $(1.69\pm 1.14)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The daily distribution of eBC concentration showed obvious bimodal characteristics, with peaks at 07:00—09:00 and 22:00—23:00. The annual average values of absorption coefficient and atmospheric extinction coefficient for BC were 18.42 and 137.67 Mm^{-1} . The correlation between eBC and NO_2 was stronger than the correlation between eBC and SO_2 , CO, O_3 , which reflects the significant influence of motor vehicle emissions on BC. eBC was negatively correlated with wind speed (* $P<0.05$). The correlation between eBC and meteorological factors was wind speed > temperature > relative humidity. Higher wind speeds are more conducive to BC diffusion dilution. The results of the paper can provide reference basis and data support for the

2022年9月19日收稿(Received: September 19, 2022).

* 国家自然科学基金(42265011)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (42265011).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: honghuang@ncu.edu.cn

scientific assessment of carbonaerosol pollution prevention and control in this region.

Keywords black carbon, optical properties, temporal and spatial distribution characteristics, meteorological factors.

大气气溶胶是均匀分散在大气中直径约 0.001—100 μm 的固体或液体微粒,可以散射和吸收太阳辐射,对气候变化有重要影响.气溶胶来源分天然源(如森林火灾、火山爆发、沙尘暴等)和人为源(工业排放、机动车尾气、生物质燃烧等)^[1].气溶胶化学组成主要包括有机碳(OC)、元素碳(EC)、硝酸盐、硫酸盐、铵盐等^[2-3].EC表现出强烈的吸光性又被称为黑碳(BC).BC可吸收红外和可见光波段的太阳辐射,使周围大气增温,表现为变暖作用.

近年来,国内外关于BC分布的研究如火如荼.Bahadar等^[4]讨论了巴基斯坦北部4个高海拔地区2016—2017年BC的日、月分布及其对气候的影响.Wyche等^[5]对4个欧洲城市的BC进行研究,发现BC在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比大,特别是交通发达区域和出行高峰期,最高时 $\text{eBC}/\text{PM}_{2.5}$ 达45%.eBC与其他大气污染物(O_3 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})间呈正相关,反映机动车尾气对BC浓度的重要影响.Liu等^[6]研究东南亚BC分布,结果表明,马来西亚某地大气中BC主要受生物质和化石燃料燃烧的源贡献,两种燃烧源对BC贡献相当;东南亚地区春季干旱季节生物质燃烧的贡献甚至更高,可能来自森林、灌木和农业火灾.周变红等^[7]研究发现,宝鸡高新区eBC变化范围为0.01—5.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,eBC日变化呈“双峰双谷”型,峰值出现在09:00和19:00,谷值出现在05:00和16:00;eBC占 $\text{PM}_{2.5}$ 的0.84%,其吸收作用占大气消光的2.14%.孙天林等^[8]研究发现东莞站点eBC年均为3.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.eBC湿季相对较低,干季相对较高.盛涛^[9]研究结果表明,2016、2017、2018年上海市路边大气中eBC年均分别为2.91、2.96、2.82 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{eBC}/\text{PM}_{2.5}$ 分别为9.30%、9.20%、9.50%.关亚楠等^[10]研究发现,石家庄eBC平均浓度为4.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;不同季节eBC浓度分布为:冬>秋>春>夏;以化石燃料为能源的工业源和交通源对BC的贡献占主导地位.以上国内外相关研究为本研究提供对比参考依据.

近年来,南昌随着工业和城市的快速发展,能源消耗增加,化石燃料燃烧和机动车数量不断增加,在污染物达标排放情况下,大气污染控制的形势依然严峻.我们课题组对南昌地区 $\text{PM}_{2.5}$ 及其化学组分的分布开展一些前期研究,然而南昌城区在逐年扩大,尤其是红谷滩城区得到快速发展,区域内BC的分布特征与光学特性的深入细化研究对于区域环境空气质量的评估和大气污染的防控意义重大.

本文对南昌市红谷滩区前湖区域大气中BC的分布特征与光学特性进行研究;探究气态污染物和 $\text{PM}_{2.5}$ 对eBC浓度的影响程度;对比研究黑碳仪测定 $\text{PM}_{2.5}$ 中eBC与滤膜采样 $\text{PM}_{2.5}$ 中EC浓度之间的差异,为区域碳气溶胶的污染防控及其辐射强迫的科学评估提供参考依据和数据支撑.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 采样点

采样点位于南昌市红谷滩区学府大道南昌大学前湖校区环境楼的六楼楼顶(高度约为25 m,经纬度E115°47'33",N28°39'47"),附近无典型工业污染源,500 m范围内无高于采样点的自然或人工物体,是1个混合受体点,受道路交通源、生活排放源、建筑扬尘和城市其他源的混合影响.

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 中eBC浓度的监测

2020年12月至2021年12月,采用AE-42型黑碳仪监测 $\text{PM}_{2.5}$ 中eBC质量浓度(由黑碳仪测定的黑碳质量浓度简称为eBC^[11]),包括七波段([350 nm]紫外、[470 nm]蓝色、[520 nm]绿色、[590 nm]黄色、[660 nm]红色、[880 nm]红外1(标准黑碳)、[950 nm]红外)的eBC质量浓度.黑碳仪每5 min记录一次eBC浓度.对所记录得到的数据进行小时平均计算;剔除数据中显著异常的eBC浓度值,确保每小时eBC浓度数据的正常量在所有数据量的60%以上^[12].

1.3 BC光学特性的研究方法

基于黑碳仪所测eBC质量浓度,采用经验公式^[1]计算BC的吸光系数,见式1:

$$A_{532\text{ nm}}=8.28M_{\text{BC}}+2.23 \quad (1)$$

式中, M_{BC} 是 AE-42 黑碳仪 880 nm 波长测量的 eBC 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); $A_{532\text{ nm}}$ 是 BC 在 532 nm 波长的吸光系数 (Mm^{-1}).

根据世界气象组织推荐, 能见度与大气消光系数的转换采用式 2^[13]:

$$b_{\text{ext}}=\frac{2996}{V_{\text{R}}} \quad (2)$$

式中, b_{ext} 是大气消光系数 (Mm^{-1}); V_{R} 是大气能见度 (km).

本文观测数据为 2020 年 12 月至 2021 年 12 月由 AE-42 型黑碳仪所监测得到的 eBC 质量浓度. 根据式 1, 通过 eBC 质量浓度计算得到 BC 在 532 nm 波长处的吸光系数 ($A_{532\text{ nm}}$); 大气能见度 (V_{R}) 来自 OTT 激光雨滴谱监测数据; 根据式 2 计算得到大气消光系数 (b_{ext}). 根据经验公式 (式 1、式 2) 计算 BC 吸光系数和大气消光系数具有一定的不确定性.

1.4 气态污染物与气象数据的采集

本研究中 CO 、 NO_2 、 SO_2 、 O_3 质量浓度数据来源于南昌市生态环境局空气质量实时发布平台 (<http://115.149.145.50:9080/>). 气象观测资料来自便携式气象站. 降雨量、降雨强度、大气能见度来自 OTT 激光雨滴谱监测数据.

1.5 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC 浓度的测定

本研究同时还进行了 $\text{PM}_{2.5}$ 的滤膜采样, 每个季节定期利用大气 mini 采样器进行 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的采集. $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度采用称重法, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的采样滤膜采用 DRI-2015 碳分析仪进行热光碳分析得到 EC 浓度^[14], 获得 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC 的质量浓度.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 eBC 的分布特征与启示

2.1.1 eBC 的季节分布

$\text{PM}_{2.5}$ 中 eBC 质量浓度的季节分布见图 1. 南昌前湖区域春、夏、秋、冬四个季节的 eBC 浓度分别为 (1.69 ± 1.14)、(1.86 ± 1.37)、(2.02 ± 1.05)、(2.10 ± 1.28) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

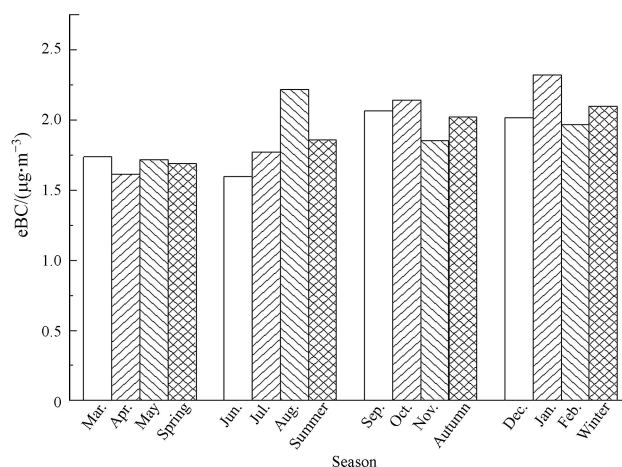


图 1 南昌前湖区域 eBC 质量浓度的季节分布

Fig.1 Seasonal distribution of BC mass concentrations in the Qianhu region of Nanchang

冬、秋季高, 夏、春季低. 不同季节 eBC 浓度分布差异的原因可能是 BC 的排放源类型与强度的差异, 同时与温度、风速、湿度等气象条件也有密切关系. 夏季 eBC 浓度较低的原因是夏季长时间的日照、强烈的大气湍流利于 BC 的扩散, 并且夏季具有较多的降水量, 雨水冲刷清除 BC 的程度高^[15], 而冬季 eBC 浓度高的原因是冬季化石燃料燃烧量较多, 源排放强度高, 并且冬季日照时间短、大气稳定性较高不利于污染物的扩散, 高浓度的 eBC 又会进一步增强大气边界层的稳定性, 形成恶性循环, 导

致冬季浓度高^[16].

2.1.2 eBC 的月分布

PM_{2.5} 中 eBC 质量浓度的月分布见图 2. 南昌前湖区域 2021 年 1 月至 2021 年 12 月的 eBC 质量浓度均值为(1.93±1.13) μg·m⁻³, 1 月最高(2.32±1.22)μg·m⁻³, 6 月最低(1.60±1.40)μg·m⁻³. 表 1 列出文献中中国地区和国外地区的 eBC 质量浓度, 以对比南昌与国内外其它城市大气中 eBC 浓度水平的差异和分布特点.

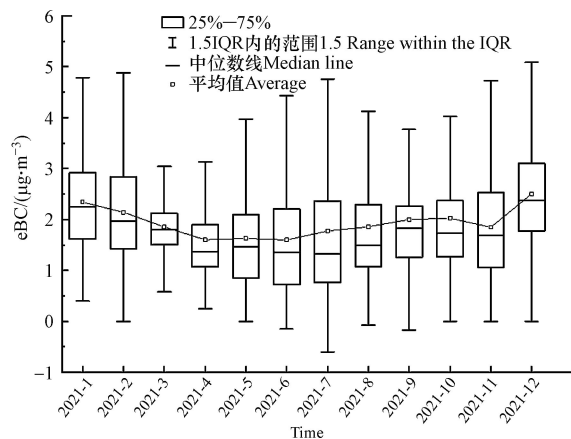


图 2 南昌前湖区域 eBC 质量浓度的月分布

Fig.2 Monthly distribution of BC mass concentrations in the Qianhu region of Nanchang

表 1 南昌前湖区域与国内、外不同城市 eBC 浓度的对比

Table 1 Comparison of eBC concentrations in the Qianhu region of Nanchang with those in different cities/regions in China and abroad

地点 Location	站点类型 Site types	时间 Time	eBC/(μg·m ⁻³)	参考文献 References
南昌	城市	2021.1—2021.12	1.93	本研究
上海	城市	2016.1—2016.12	2.41	[17]
	城郊		1.83	
深圳	城市	2014—2015	2.58	[18]
	城郊		1.12	
石家庄	城市	2018.9—2019.8	4.79	[10]
	城郊	2018.9—2019.8	4.35	
邢台	城市	2019.1—2019.12	0.85	[19]
	城市		2.27	
北京	城市	2019.1—2019.12	1.58	[20]
	城郊		1.58	
平顶山	农村	2018.2—2018.3	6.78	[21]
沈阳	城市	2008.3—2009.2	6.14	[22]
大连	城市	2014.1—2014.12	1.64	[23]
贵阳	城市	2016.5—2017.4	5.19	[24]
新疆	城市	2019.6—2020.5	1.95	[25]
印度	城市	2017.12—2018.11	6.60	[26]
但巴德	城市	2012.1—2012.12	6.30	[27]
德克萨斯州	城市	2008.1—2008.12	1.24	[28]

根据表 1, 相比国内其它区域或城市, 南昌前湖区域的 eBC 质量浓度低于上海^[17]、南京、深圳^[18]、石家庄^[10]、北京^[20]、平顶山^[21]、沈阳^[22]、贵阳^[24]等城市站点的 BC 水平, 与上海城郊站点^[17]和大连^[23]、新疆^[25]等城市站点的 eBC 浓度接近, 高于深圳城市站^[18]、邢台城市站^[19]、北京城郊站^[20]的 eBC 浓度.

相比国外城市区域来说, 南昌前湖区域的 eBC 质量浓度要低于印度^[26] 和但巴德^[27] 等城市站点的 BC 水平, 高于德克萨斯州^[28] 城市站的 BC 值. 因此, 南昌前湖区域 BC 的分布需引起关注.

2.1.3 eBC 的日分布

研究期间, 南昌前湖区域 eBC 浓度的日分布见图 3. 整体来说, 各季节的 eBC 日变化趋势都存在明显的峰值和谷值, 分布特征为双峰型, 峰值分别出现在 07:00—09:00 和 22:00—23:00, 而最低谷则出现在下午 13:00—16:00, 次谷值出现在凌晨 03:00—05:00 左右. 这与我国安徽^[17]、上海^[17]、苏州^[29]、广州^[30] 等地区 eBC 质量浓度日变化特征相似. 而对于不同季节来说, 日变化规律是存在一定差异的. 南昌 2021 年春、夏、秋、冬四个季节中早晨的 eBC 浓度峰值分别为 2.31、2.97、1.99、2.96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 而夜晚的 eBC 浓度峰值分别为 2.43、2.55、2.32、2.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

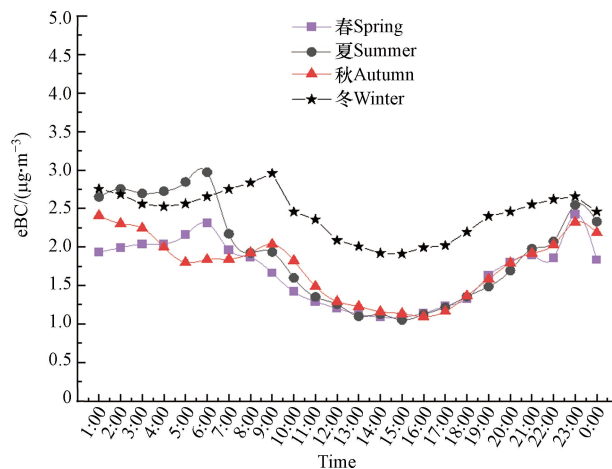


图 3 南昌前湖区域四个季节 eBC 浓度的日分布

Fig.3 Daily distribution of seasonal BC concentrations in the Qianhu region of Nanchang

07:00—09:00 峰值出现的原因是因为日出后人为活动增多, 机动车辆增多, 此时段为交通高峰时段, 因此机动车尾气排放量增加导致 eBC 浓度明显上升. 同时早晨, 由夜间产生稳定的边界层结构尚未破坏, 不利于大气污染物的扩散, 这也是 BC 出现早高峰的原因之一^[16]. 而后因为随着上班早高峰的过去, 浓度值逐渐下降, 并且 eBC 浓度的降低还与近地面大气湍流及对流存在关系^[31]. 上午 10:00 后随着太阳辐射的增强, 近地面大气湍流及对流活动的增强, 使得污染物不断地进行扩散, 从而导致 eBC 浓度也在不断地下降, 在下午 13:00—16:00 达到最低值. 傍晚前后随着太阳辐射的减小, 大气湍流对流活动减弱, 天黑后地面迅速降温, 近地面大气湍流及对流活动停止, 大气层结趋于稳定, 扩散能力变差, 使得污染物堆积并且在 17:00 后, 此段时刻为下班晚高峰, 人类活动增多, 因此 eBC 浓度会不断上升, 并在 22:00—23:00 达到峰值. 晚高峰后 eBC 浓度又会逐渐地降低, 这可能与人类活动减少和机动车活动减少导致机动车尾气排放减少有关^[32].

2.1.4 eBC 与 EC 的对比分析

目前对于气溶胶中碳组分的测量可用直接测量法和间接测量法, 直接测量法中最常用的则是基于 OC、EC 组分热稳定性差异的热光法, 间接测量法主要利用碳气溶胶组分的吸光性差异, 通过直接测量或间接反映光吸收信号, 并结合转化系数(经验值)将吸收信号转化为吸光碳的浓度值, 典型的测量仪器是黑碳仪^[33]. 而 DRI-2015 碳分析仪是基于对 OC 和 EC 在不同的温度和环境下进行氧化分析. 分析时, 选取约 0.495 cm^2 面积的滤膜, 根据程序温度进行升温到 900 $^{\circ}\text{C}$. OC 组分在无氧环境下, 升温到 580 $^{\circ}\text{C}$ 时逸散出来; EC 在 2% 的含氧环境中逐步升温到 840 $^{\circ}\text{C}$ 时逸散出来. 逸散出的碳被加热氧化为 CO_2 (催化剂为 MnO_2), 可通过 NDIR 检测器进行定量检测. 仪器利用其多波长光学系统可以给出从 405 nm 到 980 nm 七个波段的焦化碳订正值, 包括激光反射信号焦化碳订正值(OPR)和激光透射信号焦化碳订正值(OPT). 本研究使用的是 IMPROVE 分析方法, 所以最终对 EC 进行焦化碳订正值使用的是 OPR 值. 图 4(a) 为研究区域内黑碳仪测定的 eBC 与滤膜采样热光碳分析仪测定的 EC 的分布对比图, 分析两种不同方法测定 BC 的差异. 从图 4(a) 可知, 碳分析仪热光法和黑碳仪光学法测出的

eBC 浓度是存在差异的,但变化趋势大致相同,夏、秋季 eBC 浓度稍高于 EC 浓度,而冬、春季 EC 浓度稍高于 eBC 浓度,存在差异的原因可能是因为仪器本身的测量原理不同,还可能是因为不同季节 BC 气溶胶的来源和混合状态的差异导致仪器识别测定结果的差异^[34].图 4(b)为滤膜样品 DRI 碳分析仪测定的 EC 浓度与黑碳仪测定的 eBC 浓度的相关性散点图,由图可知两种方法对黑碳的测定结果具有一定的相关性($R^2=0.4868$).

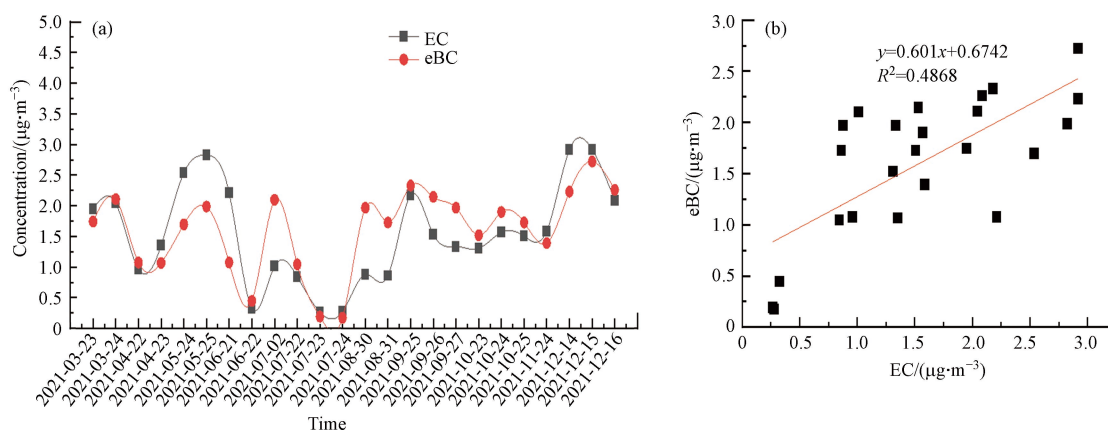


图 4 黑碳仪测定的 eBC 与滤膜采样测定的 EC 的对比

Fig.4 Comparison of eBC measured by black carbon meter with EC measured by filter sampling

2.2 eBC 分布的影响因素

2.2.1 eBC 与其它大气污染物的相关性与启示

图 5 为研究区域内 eBC 与 $PM_{2.5}$ 的散点分布与相关性图. eBC 与 $PM_{2.5}$ 的相关系数为 0.7216,经检验,两者相关性显著($P<0.05^*$),说明 $PM_{2.5}$ 中 eBC 与 $PM_{2.5}$ 的来源总体相同.本研究 $\Delta BC/\Delta PM_{2.5}$ (回归斜率^[35])比值为 0.05,低于杭州的 0.076^[32],高于南京北郊的 0.022^[36],在不同地区研究获得 $\Delta BC/\Delta PM_{2.5}$ 的差异可能与不同地区的污染源和气象条件不同有关.

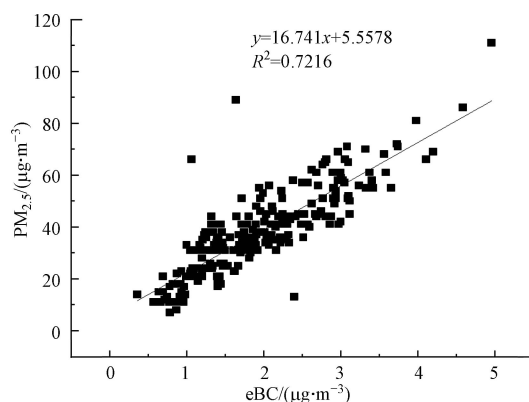


图 5 南昌前湖区域 eBC 与 $PM_{2.5}$ 的相关性

Fig.5 Correlation between BC and $PM_{2.5}$ in the Qianhu area of Nanchang

大气中的 BC 主要来源于化石和生物燃料的不完全燃烧^[37].燃烧过程中产生 BC 的同时,也会释放出其他气体污染物,如 CO 、 NO_2 和 SO_2 等,因此 eBC 与 CO 、 NO_2 、 SO_2 等污染物的相关性具有一定的源示踪性.另外 eBC 与 CO 、 NO_2 、 SO_2 等的相关性也会受到大气传输的影响.研究指出, CO 和 BC 主要源于含碳物质的不完全燃烧, SO_2 主要源于煤的燃烧,而 NO_2 主要源于交通源的排放^[10].图 6 为 eBC 与气态污染物(CO 、 NO_2 、 SO_2 和 O_3)的散点分布与相关性,显示 eBC 与 NO_2 有较强的相关性($R^2=0.7020$),表明两者来源相似.这与本研究监测点直线距离 100 米远处有一条机动车通行繁忙的高速公路,受汽车尾气排放的影响,采样点 NO_2 浓度较高的情况相符. eBC 与 SO_2 、 CO 的相关系数平方分别为 0.4545 和 0.5414,具有良好的相关性,表明 SO_2 、 CO 与 eBC 有部分贡献来源相同. O_3 与 eBC 的相关系数平方为 0.0172, O_3 与 eBC 无相关性,说明两者来源差异大.综上, eBC 与 NO_2 的相关性强于 eBC 与 SO_2 、 CO 、 O_3 的相关性,反映南昌前湖区域的 BC 受机动车尾气影响显著.孔祥晨等^[38]等研究

发现, 鄂尔多斯市夏秋季节 eBC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 的相关性最高, 为 0.6. eBC 与 NO_2 相关性高, 说明 BC 主要受到交通源的影响; 而 eBC 与 SO_2 的相关系数仅为 0.3, 这说明工业源对鄂尔多斯市 BC 的影响较小. 张玲等^[39] 研究华北平原南部农村的黑碳气溶胶发现, eBC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 呈显著正相关, 且相关性最高, 其次为 CO 、 NO_2 、 SO_2 . 大气中的 CO 主要来源于燃烧过程. 该点位冬季 eBC / CO 为 (0.0070 ± 0.0094) , 远高于夏季 (0.0012 ± 0.0007) , 表明冬季由生物质燃烧排放 eBC 的比例高于夏季. 与其他研究对比发现, eBC 与气态污染物 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 、 CO) 的相关性分析结果具有地域性特点, 相关性大小与当地污染源有关, 但 eBC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性均是最高.

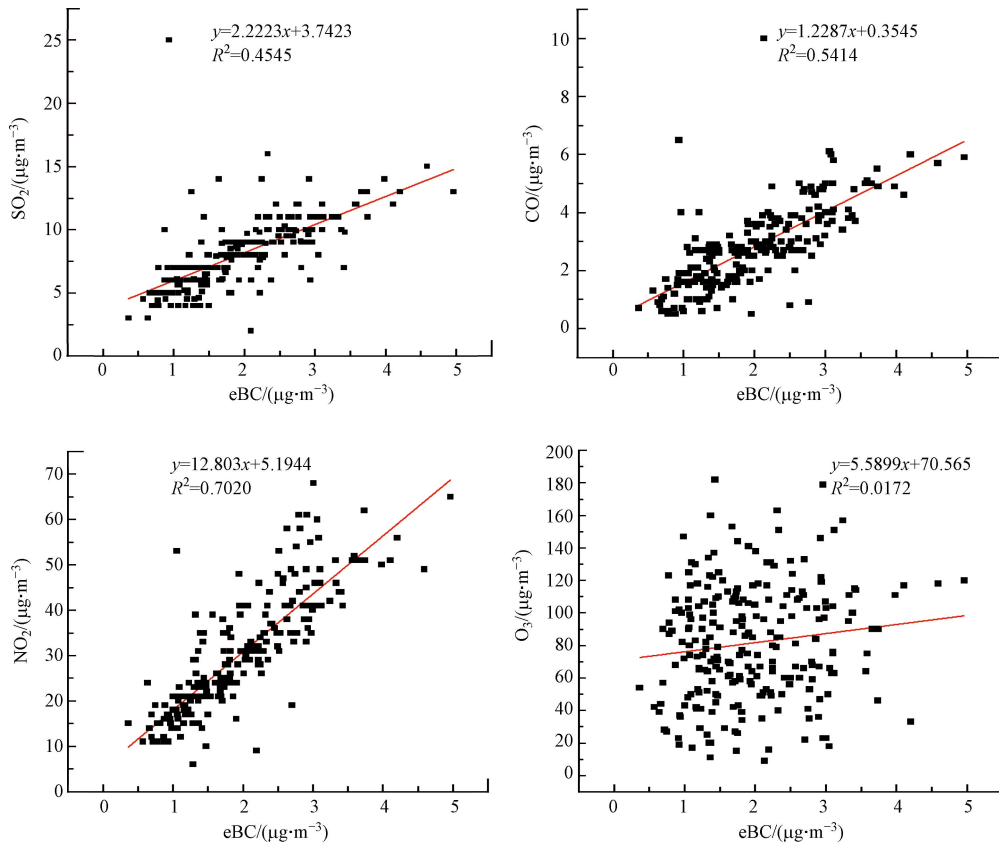


图 6 南昌前湖区域 eBC 与气态污染物的相关性

Fig.6 Correlation between BC and gaseous pollutants in the Qianhu region of Nanchang

2.2.2 eBC 与气象因子的相关性与启示

eBC 在大气中极少因化学反应生成或消除, 而是通过大气干、湿沉降清除^[40], 因此可根据气象因子 (温度、相对湿度、风速) 与 eBC 浓度的相关性, 讨论分析温度、相对湿度、大气能见度对 eBC 浓度的影响^[41]. 表 2 为采样期间南昌前湖区域的气象因子 (温度、相对湿度、风速) 数据.

表 2 研究期间南昌前湖区域不同季节气象因子的统计

类别 Categories	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
温度/ $^{\circ}\text{C}$	8.6—30.18	24.5—34.8	9.9—33.25	0.5—19.66
相对湿度/%	53.6—98.3	55.2—93.3	56.0—99.8	39.5—97.2
风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.7—13.1	4.3—14.7	2.3—17.1	2.7—13.1

由图 7 可知, 从全年分析, eBC 与风速、温度和相对湿度等气象因子呈负相关, 相关性按从大到小顺序为风速>温度>相对湿度. eBC 与风速之间的负相关性显著, 较大的风速更利于 BC 的扩散稀释^[42], 秋季的相关性最强, 相关系数为-0.72; 春季的相关性最弱, 相关系数为-0.47. 温度会影响 BC 气溶胶表面的化学性质, 从而影响黑碳气溶胶的存在形式和浓度值^[43]. eBC 浓度与温度呈负相关, 最强负相关出

现在夏季, 相关系数为 -0.84 . eBC 浓度也与相对湿度呈负相关, 相对湿度大有利于 BC 的清除^[44], 但与温度和风速相比, 其相关性最弱.

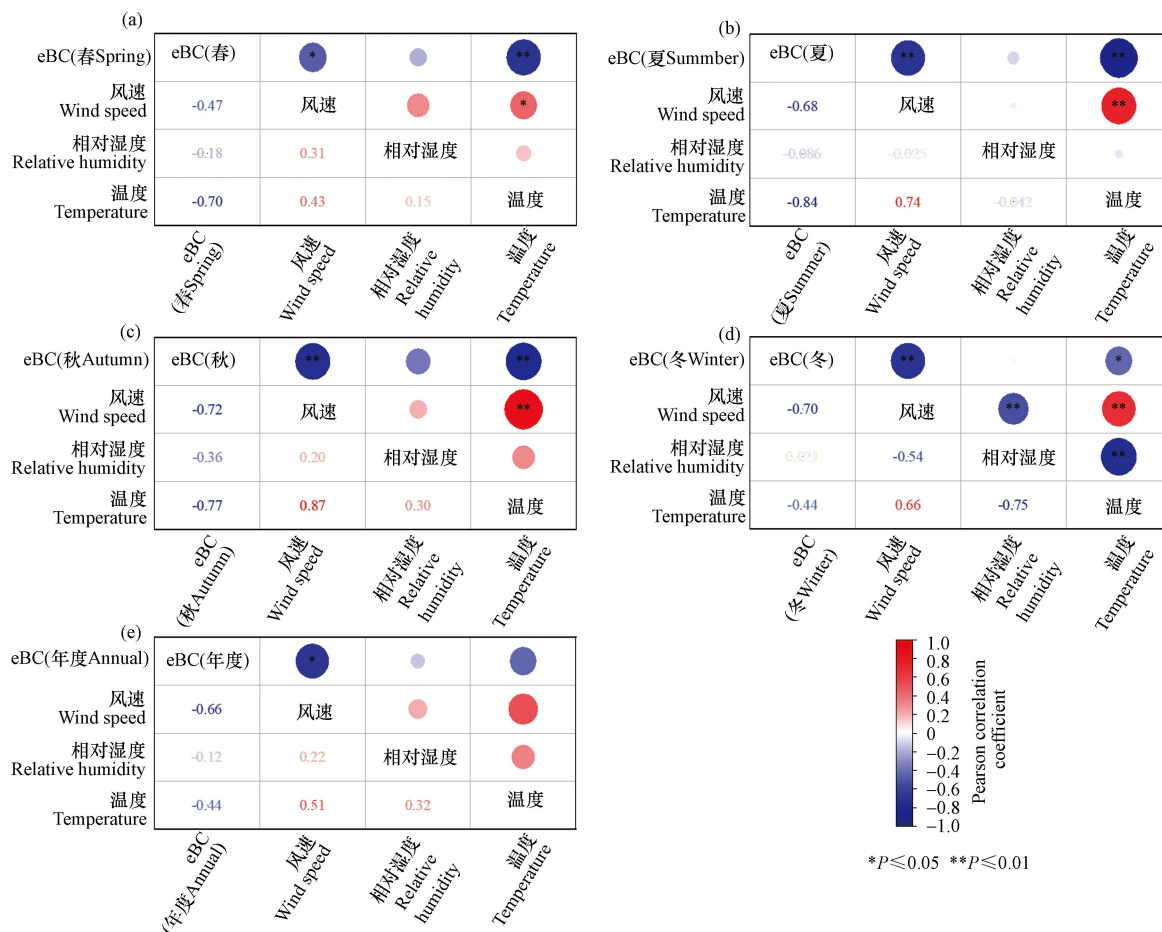


图7 南昌前湖区域 eBC 与温度、相对湿度、风速的相关性

(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季; e: 年度)

Fig.7 Correlation of eBC with temperature, relative humidity and wind speed in Qianhu Area of Nanchang

(a: Spring; b: Summer; c: Autumn; d: Winter; e: Annual)

2.3 BC 的光学特性

表3 汇总了 2021 年度均值与四季均值的大气能见度、eBC 质量浓度、BC 吸收系数、大气消光系数及吸收系数占大气消光系数的贡献率, 其中, 大气能见度年均值为 21.77 km, 在春季略高于其他季节; eBC 质量浓度在冬季达到最大值(2.10 ± 1.28) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 吸收系数年均值为 18.42 Mm^{-1} 、大气消光系数年均值为 137.67 Mm^{-1} , 均冬季出现最大值, 这可能是由于冬季大气稳定性较高不利于污染物的扩散, 造成局部累积, 污染加重. 此时吸收系数对大气消光系数的贡献率也达到最高. 与其他城市相比较, 本研究吸收系数 (18.42 Mm^{-1}) 高于河北廊坊市 (16.05 Mm^{-1})^[45]、香港 (8.3 Mm^{-1})^[46], 低于南京 (29.6 Mm^{-1})^[47]、杭州 (44.8 Mm^{-1})^[32].

表3 2021 年南昌前湖区域吸收系数、大气消光系数等相关汇总

Table 3 Summary of absorption coefficients, atmospheric extinction coefficients and other correlations for the Nanchang Qianhu region in 2021

季节 Seasons	大气能见度/km Atmospheric visibility	eBC质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ eBC mass concentration	吸收系数/ Mm^{-1} Absorption coefficient	大气消光系数/ Mm^{-1} Atmospheric extinction coefficient	贡献率/% Contribution rate
春季	22.23	1.69 ± 1.14	16.23	134.76	12.04%
夏季	21.7	1.86 ± 1.37	17.66	138.09	12.79%
秋季	21.88	2.02 ± 1.05	18.96	137.00	13.84%
冬季	21.56	2.10 ± 1.28	19.63	139.05	14.12%
年度均值	21.77	1.93 ± 1.13	18.42	137.67	13.38%

3 结论(Conclusion)

(1)南昌前湖区域 eBC 浓度年度均值为 $(1.93\pm 1.13)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, eBC 浓度有明显的季节变化, 冬季最高 $(2.10\pm 1.28)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季最低 $(1.69\pm 1.14)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 各季节的 eBC 日变化趋势表现为明显的双峰特征, 峰值分别出现在 07:00—09:00 和 22:00—23:00.

(2)碳分析仪热光法和黑碳仪光学法测出的黑碳浓度是存在差异的, 仪器测量原理不同, 此外不同季节 BC 的来源和混合状态的差异也会导致仪器测定结果的差异.

(3)BC 的吸收系数、大气消光系数年均值为 18.42、137.67 Mm^{-1} , 且均在冬季出现最大值, 这可能是由于冬季大气稳定性较高不利于污染物的扩散, 造成局部累积, 污染加重. 此时吸收系数对大气消光系数的贡献率也达到最高.

(4)eBC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关系数为 0.7216, 说明 eBC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源总体相同; eBC 与 NO_2 的相关性强于 eBC 与 SO_2 、 CO 、 O_3 的相关性, 反映南昌前湖区域的 eBC 浓度受机动车尾气影响显著. eBC 与风速、温度和相对湿度等气象因子呈负相关, 相关性按从大到小顺序为风速>温度>相对湿度, 较大的风速更利于 BC 的扩散稀释.

参考文献 (References)

- [1] 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): 1542-1553.
WU D, MAO J T, DENG X J, et al. Observational study of black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2009, 39(11): 1542-1553 (in Chinese).
- [2] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. 环境科学, 2011, 32(2): 313-318.
LI X R, WANG Y F, GUO X Q, et al. Characteristics of elemental and organic carbon changes in atmospheric particulate matter of different particle sizes in Beijing during the 2008 Olympic Games [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 313-318 (in Chinese).
- [3] NIU Z, ZHANG F, KONG X, et al. One-year measurement of organic and elemental carbon in size-segregated atmospheric aerosol at a coastal and suburban site in Southeast China [J]. *J Environ Monit*, 2012, 14(11): 2961-2967.
- [4] ZEB B, ALAM K, NASIR J, et al. Black carbon aerosol characteristics and radiative forcing over the high altitude glacier region of Himalaya-Karakorum-Hindukush [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 238(10):117711.
- [5] WYCHE K P, CORDELL R L, SIMITH L M, et al. The spatio-temporal evolution of black carbon in the North-West European 'air pollution hotspot'[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 243(15):117874.
- [6] LIU J, ANDERSSON A, ZHONG G, et al. Isotope constraints of the strong influence of biomass burning to climate-forcing Black Carbon aerosols over Southeast Asia [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 744:140359.
- [7] 周变红, 曹夏, 张容端, 等. 宝鸡高新区春节前后大气中黑碳浓度特征及来源解析 [J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1754-1762.
ZHOU B H, CAO X, ZHANG R R, et al. Characterization of black carbon concentration in the atmosphere before and after the Spring Festival in Baoji High-tech Zone and analysis of its sources [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(7): 1754-1762 (in Chinese).
- [8] 孙天林, 吴兑, 吴晟, 等. 东莞市黑碳气溶胶污染特征及来源分析 [J]. 地球化学, 2020, 49(3): 287-297.
SUN T L, WU D, WU S, et al. Analysis of black carbon aerosol pollution characteristics and sources in Dongguan [J]. *Geochimica*, 2020, 49(3): 287-297 (in Chinese).
- [9] 盛涛. 上海市路边环境空气黑碳气溶胶污染特征及影响因素研究 [J]. 中国环境监测, 2020, 36(2): 116-125.
SHENG T. Study on the characteristics and influencing factors of black carbon aerosol pollution in roadside ambient air in Shanghai [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(2): 116-125 (in Chinese).
- [10] 关亚楠, 卢晶晶, 张毅森, 等. 石家庄南郊黑碳气溶胶污染特征与来源分析 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3146-3154.
GUAN Y N, LU J J, ZHANG Y S, et al. Characterization and source analysis of black carbon aerosol pollution in the southern suburbs of Shijiazhuang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(9): 3146-3154 (in Chinese).
- [11] 先久坤, 崔世杰, 张运江, 等. 亚洲地区黑碳气溶胶外场在线观测研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(1): 104-124.
XIAN J K, CUI J S, ZHANG Y J, et al. Advances in outfield online observation of black carbon aerosol in Asia [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, 17(1): 104-124 (in Chinese).
- [12] 徐义邦, 张昊, 秦文姜, 等. 南昌市冬季一次大气重污染过程的特征分析 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2018, 28(5): 85-89.
XU Y B, ZHANG W, QIN W J, et al. Characterization of a heavy air pollution process in winter in Nanchang [J]. *Journal of Hebei*

- University of Environmental Engineering, 2018, 28(5): 85-89(in Chinese).
- [13] 姚婷婷, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 深圳市冬季大气消光性质与细粒子化学组成的高时间分辨率观测和统计关系研究 [J]. 中国科学:化学, 2010, 40(8): 1163-1171.
YAO T T, HUANG X F, HE L Y, et al. High temporal resolution observations and statistical relationships between atmospheric extinction properties and the chemical composition of fine particles in winter in Shenzhen [J]. Scientia Sinica(Chimica), 2010, 40(8): 1163-1171(in Chinese).
- [14] 黄虹, 圣莉, 贺冰洁. 打印阶段PM_{2.5}一次排放、碳组分谱与二次生成 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 59-65.
HUANG H, SHENG L, HE B J. Print phase PM_{2.5} primary emissions, carbon fraction profiles and secondary production [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 59-65(in Chinese).
- [15] SAFAIP D, DEVARA P C S, RAJU M P, et al. Relationship between black carbon and associated optical, physical and radiative properties of aerosols over two contrasting environments [J]. Atmospheric Research, 2014, 149: 292-299.
- [16] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 [J]. 环境科学, 2020, 41(2): 620-629.
YANG X W, SHI S S, ZHANG C, et al. Characteristics of the temporal evolution of black carbon aerosols in Nanjing and their main influencing factors [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 620-629(in Chinese).
- [17] 井安康, 朱彬, 丁德平, 等. 中国长江三角洲地区黑碳特征和来源分析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3585-3594.
JING A K, ZHU B, DING D P, et al. Characterization and source analysis of black carbon in the Yangtze River Delta region of China [J]. China Environmental Science, 2019, 39(9): 3585-3594(in Chinese).
- [18] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1653-1662.
CHENG D, WU S, WU D, et al. Comparative study on black carbon aerosol in urban and suburban areas of Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1653-1662(in Chinese).
- [19] 郝巨飞, 杨允凌, 李二杰, 等. 邢台市城区黑碳气溶胶浓度与气象因子变化关系分析 [J]. 高原气象, 2021, 40(3): 671-679.
HAO J F, YANG Y L, LI E J, et al. Analysis of the relationship between black carbon aerosol concentrations and changes in meteorological factors in the urban area of Xingtai City [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 671-679(in Chinese).
- [20] 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 等. 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5633-5643.
CAO Y, AN X X, LIU B X, et al. Characteristics of black carbon aerosol concentrations in Beijing and their main influencing factors [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5633-5643(in Chinese).
- [21] 刘玺, 孔少飞, 郑淑睿, 等. 春节前后华北平原农村地区黑碳浓度及来源 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3169-3177.
LIU X, KONG S F, ZHENG S R, et al. Black carbon concentrations and sources in rural areas of the North China Plain around the Spring Festival [J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3169-3177(in Chinese).
- [22] 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 辽宁地区大气黑碳气溶胶质量浓度在线连续观测 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(10): 1088-1096.
WANG Y F, MA Y J, LU Z Y, et al. Continuous online observation of atmospheric black carbon aerosol mass concentration in Liaoning region [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(10): 1088-1096(in Chinese).
- [23] 徐洁. 大连市黑碳气溶胶观测研究及来源分析 [J]. 河北环境工程学院学报, 2020, 30(3): 51-55.
XU J. Observational study and source analysis of black carbon aerosols in Dalian [J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2020, 30(3): 51-55(in Chinese).
- [24] 周瑞国, 梁隆超, 肖德安, 等. 西南典型高原山地城市大气黑碳气溶胶污染特征及来源解析 [J]. 地球与环境, 2021, 49(4): 375-380.
ZHOU R G, LIANG L C, XIAO D A, et al. Characterization and source analysis of atmospheric black carbon aerosol pollution in a typical southwestern highland mountain city [J]. Earth and Environment, 2021, 49(4): 375-380(in Chinese).
- [25] 范圣虎. 乌鲁木齐黑碳气溶胶浓度时间变化特征及影响因素分析 [J]. 新疆环境保护, 2021, 43(1): 28-36.
FAN S H. Analysis on the temporal variation characteristics and influencing factors of black carbon aerosol concentration in Urumqi [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2021, 43(1): 28-36(in Chinese).
- [26] AMBADE B, SANKAR T K, PANICKER A S, et al. Characterization, seasonal variation, source apportionment and health risk assessment of black carbon over an urban region of East India [J]. Urban Climate, 2021, 38:100896.
- [27] SINGH S, TIWARI S, GOND D P, et al. Intra-seasonal variability of black carbon aerosols over a coal field area at Dhanbad, India [J]. Atmospheric Research, 2015, 161-162: 25-35.
- [28] RAYSONI A U, SAMAT J A, SSRNAT S E, et al. Binational school-based monitoring of traffic-related air pollutants in El Paso, Texas (USA) and Ciudad Juarez, Chihuahua (Mexico) [J]. Environ Pollut, 2011, 159(10): 2476-2486.
- [29] 丁铭, 邹强, 葛顺, 等. 苏州市黑碳气溶胶的污染特征分析 [J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 67-71.
DING M, ZOU Q, GE S, et al. Analysis of pollution characteristics of black carbon aerosol in Suzhou City [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 67-71(in Chinese).
- [30] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 广州市城区干湿季黑碳气溶胶污染特征及来源分析 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2223-2232.
CHENG D, WU S, WU D, et al. Pollution characteristics and source analysis of black carbon aerosol in Urban Area of Guangzhou

- during dry and wet seasons [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2223-2232(in Chinese).
- [31] 兰剑, 闫莹, 乔利平. 大城市城区黑碳气溶胶来源及其污染特性试验 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 53-62.
LAN J, YAN Y, QIAO L P. Experiment on sources and pollution characteristics of black carbon aerosol in Metropolitan Area [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 53-62(in Chinese).
- [32] 徐昶, 沈建东, 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): 3026-3033.
XU C, SHEN J D, YE H, et al. Pollution characteristics and sources of black carbon aerosol in Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(12): 3026-3033(in Chinese).
- [33] CHOW J C, WATSON J G, DORAISWAMY P, et al. Aerosol light absorption, black carbon, and elemental carbon at the Fresno Supersite, California [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93(4): 847-887.
- [34] 张娅蕴, 支国瑞, 田崇国, 等. 北京秋冬季有机碳和元素碳(黑碳)测试结果的细节研究 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1184-1192.
ZHANG Y Y, ZHI G R, TIAN Z G, et al. Details of measurement results of organic carbon and elemental carbon (black carbon) in autumn and winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(8): 1184-1192(in Chinese).
- [35] WANG T. Emission characteristics of CO, NO_x, SO₂ and indications of biomass burning observed at a rural site in eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107.
- [36] 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): 3280-3289.
XIAO S H, YU X N, ZHU B, et al. Analysis of black carbon aerosol pollution characteristics and influencing factors in the northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3280-3289:(in Chinese).
- [37] DAVID G, STREETS S G, STEPHANIE T. Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(25):4281-4296.
- [38] 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 等. 鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3439-3450.
KONG X C, ZHANG L X, ZHANG C Y, et al. Temporal evolution characteristics and source analysis of black carbon aerosol in summer and autumn in Ordos City [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3439-3450(in Chinese).
- [39] 张玲, 孔少飞, 郑煌, 等. 华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 [J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2363-2372.
ZHANG L, KONG S F, ZHENG H, et al. Black carbon aerosol concentrations and sources in rural areas of the southern North China Plain [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2363-2372(in Chinese).
- [40] 许黎, 王亚强, 陈振林, 等. 黑碳气溶胶研究进展 I: 排放、清除和浓度 [J]. *地球科学进展*, 2006(4): 352-3603.
XU L, WANG Y Q, CHEN Z L, et al. Advances in black carbon aerosol research I: Emissions, removals and concentrations [J]. *Advances in Earth Science*, 2006(4): 352-3603(in Chinese).
- [41] WHITEAKER J R, SUESS D T, PRATHER K A. Effects of meteorological conditions on aerosol composition and mixing state in Bakersfield, CA. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(11): 2345-2353.
- [42] TIWARI S, SRIVASTAVA A K, BISHT D S, et al. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: Influence of meteorology [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 25: 50-62.
- [43] 孙欢欢, 倪长健, 崔蕾. 成都市黑碳气溶胶污染特征及与气象因子的关系 [J]. *环境工程*, 2016, 34(06): 119-124, 129.
SUN H H, NI C J, CUI L. Characteristics of black carbon aerosol pollution in Chengdu and its relationship with meteorological factors [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(06): 119-124, 129(in Chinese).
- [44] TYAGI S, TIWARI S, MISHRA A, et al. Characteristics of absorbing aerosols during winter foggy period over the National Capital Region of Delhi: Impact of planetary boundary layer dynamics and solar radiation flux [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 188(15): 1-10.
- [45] 李倩, 吴琳, 张进生, 等. 廊坊市夏季大气气溶胶消光特性及其来源 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2249-2257.
LI Q, WU L, ZHANG J S, et al. Extinction characteristics and sources of atmospheric aerosol in summer in Langfang [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2249-2257(in Chinese).
- [46] WANG J, VIRKKULA A, GAO Y, et al. Observations of aerosol optical properties at a coastal site in Hong Kong, South China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 2653-2671.
- [47] ZHUANG B, WANG T, LIU J, et al. The surface aerosol optical properties in the urban area of Nanjing, west Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(2): 1143-1160.