

南京市植物叶面颗粒物的黑炭含量及时空分布特征

是怡芸^{1,2} 赵月^{1,3} 查燕^{1,2} 张银龙^{1,2*}

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037;

2. 南京林业大学, 江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

3. 南京市环境保护宣传教育中心, 江苏 南京 210013)

【摘要】 黑碳是大气气溶胶的重要组成部分, 能够吸收太阳辐射产生温室效应, 并对人体健康产生负面影响。选取了南京市的6个典型功能区, 研究不同污染水平和不同季节下植物叶面颗粒物黑炭含量的时空分布特征, 并将其与地面尘和表层土壤中的黑炭含量进行比较, 探讨黑碳在多介质中的分布规律。结果表明: (1) 城市植物叶面颗粒物的黑炭含量呈现冬季>秋季>春季~夏季的季节变化特征; (2) 工业区植物叶面颗粒物的黑炭含量最高, 并与其他功能区的差异达显著水平; (3) 城市植物叶面颗粒物黑炭含量越高, BC/OC值也越大, 城市植物叶面颗粒物的黑炭主要来源于化石燃料的燃烧; (4) 黑碳气溶胶通过植被表层到达地表的过程中其含量逐渐下降, 植物叶面颗粒物可作为监测大气黑炭污染的有效手段。

【关键词】 城市植物; 叶面颗粒物; 黑碳; 时空分布

【中图分类号】 X51

【文献标识码】 A

【文章编号】 1004 - 8227 (2016) 12 - 1886 - 08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201612012

大气颗粒物(Particulate Matter, PM)一直是全球多数城市特别是发展中国家的首要大气污染物^[1, 2], 它主要包含重金属、多环芳烃(PAHs)、黑碳等有害物质^[3-5], 对人体具危害性和致癌性^[6, 7]。黑碳(Black Carbon)作为大气气溶胶的重要组成部分是由含碳物质不完全燃烧所形成的一种无定形碳颗粒物^[8], 其主要来源为煤、石油等化石燃料和生物质的不完全燃烧^[9]。黑碳对太阳辐射有较强的吸收能力, 可对大气环境质量产生显著的影响^[10]。Jacobson等^[11]研究认为, 黑碳是导致全球温室效应的大气成分中占第二位权重的物质(仅次于CO₂), 全球大气监测网已将其作为研究大气污染物的一个重要观测指标。同时由于黑碳在大气中呈现积聚模态, 本身具有多孔性, 故可吸附其它有毒污染物(如多环芳烃、SO₂等)通过呼吸作用进入人体, 进而引发呼吸系统及心血管疾病的产生^[12, 13]。正是由于黑碳会对环境气候和人体健康产生直接的负面影响, 所以受到各国政府及学者的高度重视。近年来, 国内外对黑碳的来源、去向、结构特征和测定方法进行了较为广泛的探讨^[14, 15], 对大气气溶胶^[16, 17]、水体沉积物^[18]和降雪^[19]中的黑碳研究已有大量报道, 对土壤中黑碳^[20, 21]的研究也有所涉及。城市植被作为减轻城市大气污染特别是颗粒污染物

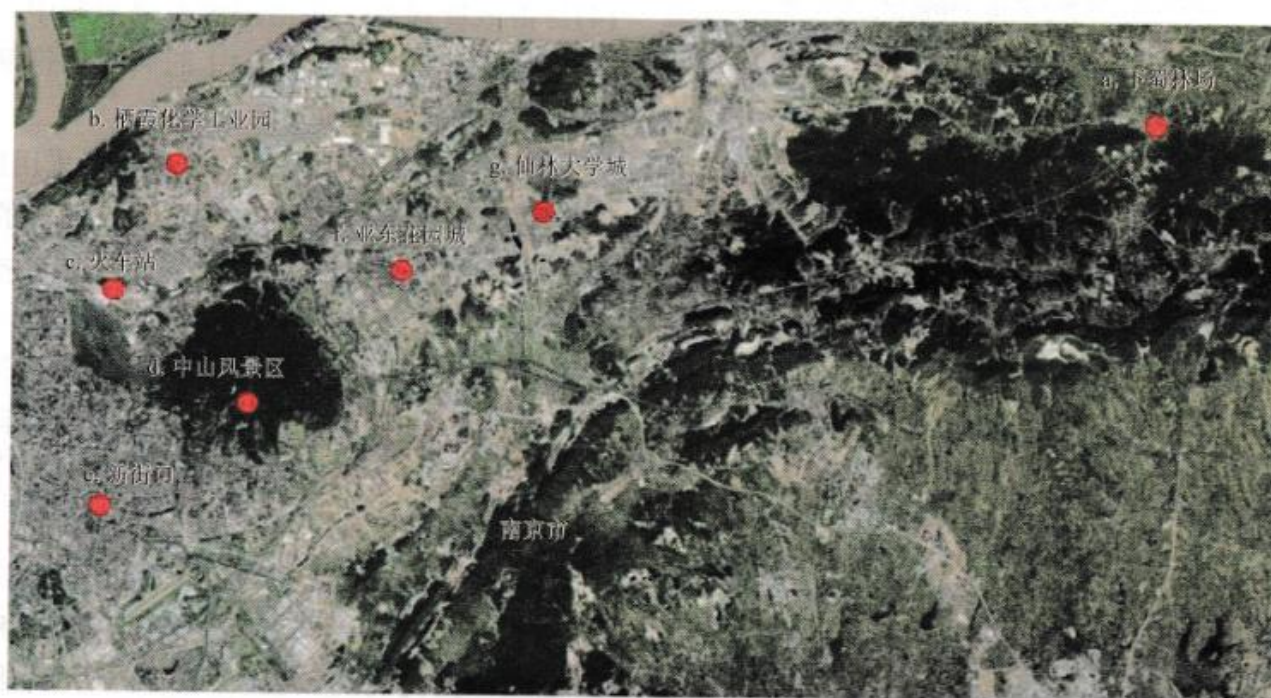
收稿日期: 2016-04-11; **修回日期:** 2016-06-08

基金项目: 江苏省高校自然科学基金重大项目(13KJA80002); 江苏省高校研究生科研创新计划项目(KYZZ150255); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 是怡芸(1992~), 女, 硕士研究生, 主要从事环境生态学研究. E-mail: 623135619@qq.com

***通信作者:** 张银龙, E-mail: ecoenvylz@163.com

的手段已被广泛认可^[22~24]。如 Tallis 等^[25]研究得出英国伦敦的城市植被每年可去除 PM_{10} 852 到 2121 t。庞大的植被表面更是黑碳等大气污染物进入地表和土壤的重要过渡环节，也是污染物与植物相互作用的界面^[26]，因而它是解释污染物在大气-植物-地表(土壤)系统中迁移归趋过程不可或缺的一环之一。近年来，以植物叶面颗粒物特征作为污染监测指标已逐渐成为大气环境领域的研究热点^[27, 28]。而目前国内外对于植物叶面滞留污染物方面的研究主要集中在重金属、多环芳烃和无机元素等方面^[29~31]，尚未有黑碳颗粒在叶表面沉积含量的系统报导，其在各介质中的分布更属于空白领域。为此，本文选取了南京市的 6 个典型功能区，研究不同季节和不同污染水平下植物叶面滞留的黑碳含量特征，旨在分析植物叶面颗粒物中黑碳含量分布的时空变化规律，并将其与地面尘和表层土壤中的黑碳含量进行比较，以便为进一步研究和探讨黑碳在各介质中的分布和迁移规律提供基础数据，同时也为利用植物叶面污染物信息来监测大气黑碳污染提供理论依据。



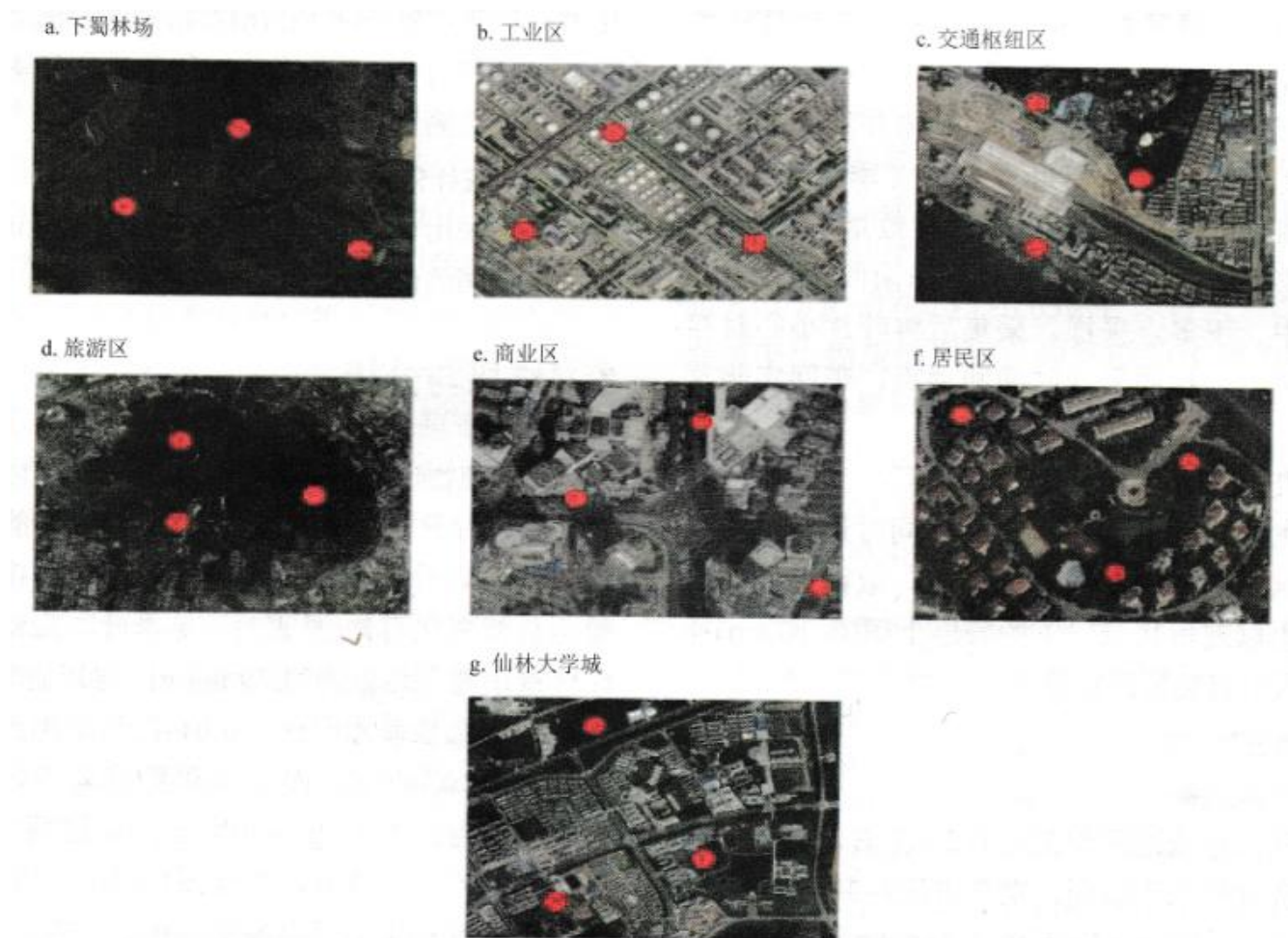


图1 研究区采样点分布图

Fig.1 Sampling Points in the Study Area

1 材料与方法

1.1 样品采集

对研究区南京市按生产、生活和商业不同土地利用方式进行分区,以便分析不同城市活动对叶面颗粒物的影响,由此设置了6个典型采样区,分别为栖霞化学工业园(工业区)、火车站(交通枢纽区)、新街口(商业区)、仙林大学城(科教生活区)、亚东花园城(居民区)和钟山风景区(旅游区),并选取距南京市区45 km的南京林业大学下蜀林场作为对照点。每个功能区设置3个采样点作为重复。在2014年的5月(春季)、8月(夏季)、10月(秋季)和2015年的1月(冬季)的雨后约10 d进行叶面颗粒物样品的采集。

叶面颗粒物采样:在6个采样区和对照点内采集雪松(*Cedrus deodara*)、龙柏(*Sabina chinensis*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、小叶黄杨(*Buxus sinica*)、二球悬铃木(*Platanus acerifolia*)和八角金盘(*Fatsia japonica*)7种南京市常见绿化树种的叶面颗粒物并混合。由于水杉和二球悬铃木为落叶乔木,冬季未能采集;根据各植物叶片大小采集30~50片数量不等叶片,每种植物采样的位置为树冠外围东南西北4个方向及上、中、下多点采样。采集后将叶片小心封存于自封袋中,标明采样时间和地点,带回实验室处理。

地表尘和土壤样品采样：地面尘和土壤样品在 10 月秋季时与叶面颗粒物采样同时进行。在每个功能区采集叶面颗粒物的同时，取附近硬质地面地表尘以及植物冠层下的表层土壤(0~10 cm)样品，装入自封袋带回实验室。

表 1 不同功能区采样点概况

Tab.1 General Information of Sampling Points

功能区	采样区域	周边环境描述
工业区	栖霞化学工业园	南京栖霞化学工业园区，周边有金陵石化等重污染企业
交通枢纽区	火车站	南京城东入城的重要交通枢纽，周围马路车流量大且与新庄立交相连
商业区	新街口	南京市商业中心区域，是四条主干道的交汇点，客流与机动车流量大
科教生活区	仙林大学城	南京市典型科教生活区，密布近 10 多所高校，绿化环境较好
居民区	亚东花园城	位于仙隐北路两侧，绿化覆盖率高，小区环境良好
旅游区	钟山风景区	南京市玄武区紫金山南麓钟山风景区内，群山围绕，风景优美
对照点	下蜀林场	位于江苏省镇江市句容宁镇山脉东段的武岐山，森林覆盖率超过 90%

1.2.2 样品测定

植物叶面颗粒物中有机碳(Organic Carbon, OC)含量采用重铬酸钾氧化法^[32]进行测定。其测定的基本步骤为：(1)称取 0.5 g 左右过 100 目筛的叶面颗粒物样品；(2)加入 5 mL 0.8 mol/L $1/6 K_2Cr_2O_7$ 溶液和 5 mL 浓硫酸；(3)用油浴将溶液加热至沸腾，温度严格控制在 178~182 °C，并保持沸腾 5 min；(4)待溶液冷却后，将溶液倒入锥形瓶中，以邻菲罗啉为指示剂，用 0.2 mol/L 的硫酸亚铁滴定，并计算样品中有机碳的含量。

地面尘和土壤表层土中黑碳含量采用 Lim 等^[33]介绍的方法测定。植物叶面颗粒物中的黑碳含量参照 Lim^[33]和黄佳鸣等^[34]的测定方法并根据叶面颗粒物样品量少等特点进行了适当改进。其测定的具体步骤为：(1)称取 0.5 g 左右过 100 目筛的叶面颗粒物样品；(2)加入 5 mL 3 mol/L HCl 除去碳酸盐，反应 12 h；(3)加入 5 mL 10 mol/L HF: 1 mol/L HCl 的混合溶液除去硅酸盐，反应 12 h；(4)加入 5 mL 10 mol/L HCl 反应，除去有可能生成的 CaF_2 ，反应 12 h；(5)再加入 5 mL 0.1 mol/L $K_2Cr_2O_7$: 2 mol/L H_2SO_4 的混合溶液，在 55±1 °C 下除去易氧化的有机碳，反应 60 h；(6)将得到的残渣离心、烘干后采用 PE 2400 II 元素分析仪测量样品中的黑碳含量，仪器测量误差≤0.3%。

1.3 数据统计分析

本文采用单因素方差分析法(SPSS 19.0)来比较组内数据间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 城市植物叶面颗粒物黑碳含量的季节变化特征

城市绿化树种的滞尘能力具有明显的季节动态规律^[35]。分析南京市植物叶面颗粒物中黑碳含量的总体变化可知(见表 2)，冬季叶面颗粒物的黑碳含量最高，均值为 13.49 mg/g，与其他季节的差异均达到极显著水平($P<0.01$)；秋季黑碳含量次之，为 5.20 mg/g；而春季和夏季黑碳含量较接近，分别为 1.95 mg/g 和 1.90 mg/g，这两个季节相互之间的差异不显著。结合图 1 可知，叶面颗粒物的黑碳含量总体呈现出冬季>秋季>春季≈夏季的季节变化特征。李玉琛^[36]、王月菡^[37]等分析季节因素对南京市常见绿化树种滞尘能力的影响时发现同一地点大部分绿化树种滞尘能力的季节动态规律为冬季、秋季含量较高，春季和夏季较低，与本文滞留黑碳含量的季节变化结果吻合。

造成这种季节变化特征的原因一方面可能与植物叶片的生长势相关即植物滞留大气中黑碳污染物的季节变化规律与植物的生长期基本保持一致，其中秋、冬季植物叶片生长达到成熟期，对黑碳颗粒物的滞留能力较高，春、夏季则较低。Hiroshi 等^[26]研究日本东京市枹栎树叶片对黑碳污染物的滞留能力时发现当植物叶片处于生长成熟期时，可滞留大气中约 30%的黑碳颗粒物。另一方面则与不同季节自身的气候特点有关比如冬季产生的“逆温现象”会导致大气中的黑碳颗粒物不易扩散而滞留在植物叶面上；夏季降雨量较大，植物叶面滞留的黑碳颗粒物易被冲刷等。此外，朱厚玲等^[38]分析我国大气中黑碳气溶胶的时空分布规律时发现大气中黑碳气溶胶浓度的季节性变化显著：冬季黑碳浓度最高，春、秋季次之，夏季最低，与本文植物叶面颗粒物黑碳含量的季节变化结果相似。

表 2 南京市不同季节的植物叶面颗粒物的黑碳含量

Tab.2 Contents of Black Carbon in Foliar Dust Under Different Seasons in Nanjing

季节	最大值 (mg/g)	最小值 (mg/g)	变幅 (mg/g)	均值 (mg/g)
春	3.30	0.90	2.40	1.95±0.83C
夏	3.22	0.96	2.26	1.90±0.78C
秋	10.60	1.92	8.68	5.20±3.22B
冬	19.24	10.05	9.19	13.49±3.34A

注：同列不同大写字母表示 $P<0.01$ 显著水平。

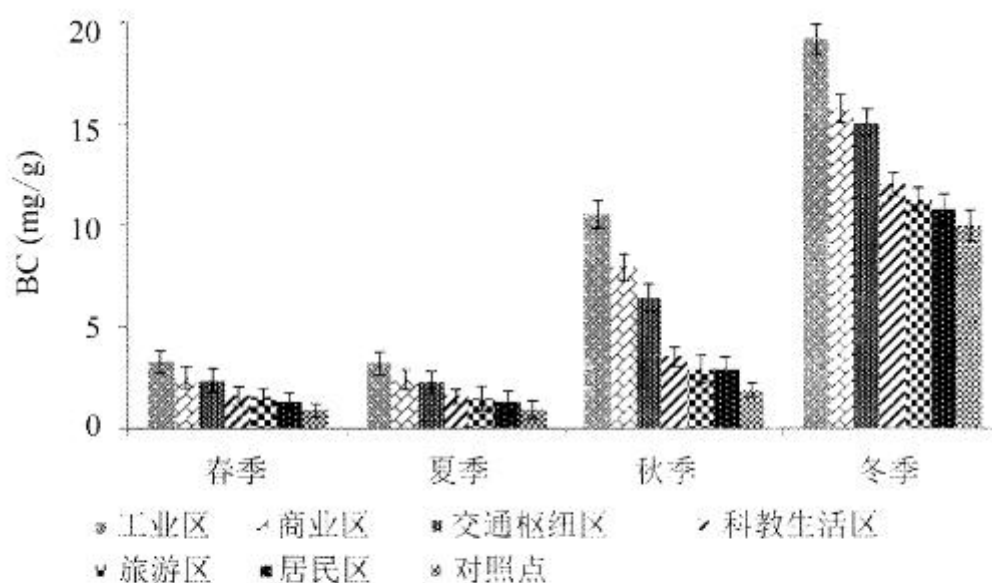


图2 南京市各功能区不同季节的植物叶面颗粒物的黑碳含量
Fig.2 Contents of Black Carbon in Foliar Dust Under Different Seasons of Function Zones in Nanjing

1.2 样品分析

1.2.1 样品制备

用蒸馏水浸泡采集的叶片 2 h 左右,接着用软毛刷刷洗叶片上下表面,重复清洗 2~3 次,合并洗后悬浊液,并在 60 °C 下烘干得到叶面颗粒物样本。然后将叶面颗粒物、地面尘和土壤表层土样品分别过 100 目筛,粉碎后的样品再次用研钵研磨,而后烘干称量各样品质量,用于以下分析。

2.2 城市植物叶面颗粒物黑碳含量的空间变化特征

城市不同功能区受人为活动影响程度不同,植物叶面颗粒物的黑碳含量也不同。南京市不同功能区植物叶面颗粒物黑碳含量的总体变化特征如表 3。从表中可知,南京市各功能区植物叶面黑碳含量的高低趋势为:工业区>商业区>交通枢纽区>居民区>科教生活区>旅游区>对照点。其中,工业区一年四季植物叶面颗粒物的黑碳含量始终最高,最大值可达 19.24 mg/g,是对照点平均含量的 5.57 倍,与其他功能区的含量差异均达到显著水平($P<0.05$)。这主要是因为工业区内的石油和煤炭等化石燃料不完全燃烧产生了大量的黑碳颗粒物。而这些黑碳颗粒物会通过干湿沉降作用滞留在植物表面,导致工业区内植物叶面颗粒物的黑碳含量较高。商业区和交通枢纽区的黑碳含量也很高,均值分别为 7.19 mg/g 和 6.57 mg/g,这可能是由于商业区和交通枢纽区的车流量较大,机动车尾气中夹杂了大量的黑碳颗粒物,使得道路两边植物叶面颗粒物中的黑碳含量增加^[39, 40]。科教生活区、居民区和旅游区的植物叶面黑碳含量较小且差异并不显著。程政红等^[41]的研究表明,同种树木均以重度污染区的滞尘量最大,轻度污染区的滞尘量最小。邱媛等^[42]研究广东省惠州市不同功能区的 4 种主要绿化乔木的滞尘能力时发现,不同功能区滞尘量的排序为:工业区>商业交通区>居住区>清洁区。本文植物叶面颗粒物黑碳含量的空间变化特征与前人所得的结果一致。

表 3 南京市不同功能区植物叶面颗粒物的黑碳含量

Tab.3 Contents of Black Carbon in Foliar Dust in Different Function Zones of Nanjing

功能区	春季均值 (mg/g)	夏季均值 (mg/g)	秋季均值 (mg/g)	冬季均值 (mg/g)
工业区	3.30±0.58a	3.22±0.55a	10.60±0.69a	19.24±0.76a
商业区	2.39±0.40b	2.30±0.48b	7.98±0.68b	15.82±0.65b
交通枢纽区	2.37±0.61b	2.29±0.50b	6.49±0.68c	15.12±0.63b
居民区	1.64±0.49bc	1.61±0.37bc	3.54±0.47d	12.08±0.60c
科教生活区	1.56±0.46bc	1.52±0.62bc	2.97±0.67de	11.28±0.60cd
旅游区	1.32±0.43c	1.31±0.55c	2.91±0.67de	10.85±0.75d
对照点	0.90±0.33c	0.96±0.45c	1.92±0.38e	10.05±0.77d

注：同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 显著水平，下同。

2.3 城市植物叶面颗粒物中黑碳的来源分析

样品中黑碳含量与有机碳含量的比值(BC/OC)与特定的人为活动过程相关，因此 BC/OC 的大小在一定程度上可以反映黑碳的来源^[43]。研究表明^[44~46]，如果 BC/OC 值在 0.11 ± 0.03 附近，可认为黑碳主要来源于生物质的燃烧，如果 BC/OC 值为 0.5 左右时，则认为黑碳主要来源于化石燃料的燃烧。分析南京市不同功能区叶面颗粒物的 BC/OC 值可知(表 4)，工业区和商业区的 BC/OC 值较高，分别为 0.65 ± 0.08 和 0.48 ± 0.13 ，反映了这两个功能区植物叶面颗粒物中的黑碳主要来源于化石燃料的不完全燃烧。而受人为活动影响最少的下蜀林场对照点，BC/OC 值仅为 0.16 ± 0.03 ，表明其黑碳只要来源于生物质的燃烧如绿化植物枯枝落叶的燃烧。其它功能区的情况相对比较复杂，化石燃料的燃烧和生物质的燃烧均是其黑碳的来源且各种来源的黑碳所占比重不同。陆燕等^[47]研究长江三角洲地区的黑碳排放特征后得出：南京市火电、一般工业、交通、居民燃煤和生物质燃烧五类排放源对黑碳的贡献率分别为 7.16%、55.39%、18.31%、0.17%和 18.93%，排放强度为 $0.44 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。其中，工业源的排放比例最高，这主要是因为南京市工业较为发达。煤炭作为黑碳最重要的排放源，随着我国工业化和城市化进程的加快，其消费量仍在不断增长。总的来说，城市植物叶面颗粒物的黑碳含量越高，BC/OC 值也越大。南京市植物叶面颗粒物中的黑碳主要来源于化石燃料的燃烧。

表 4 南京市不同功能区植物叶面颗粒物的BC/OC值

Tab.4 Values of BC/OC in Foliar Dust in Different Function Zones of Nanjing

功能区	变幅(%)	均值(%)
工业区	0.55~0.71	0.65±0.08a
商业区	0.33~0.57	0.48±0.13ab
交通枢纽区	0.34~0.44	0.40±0.06b
居民区	0.16~0.57	0.39±0.21b
科教生活区	0.24~0.46	0.37±0.11b
旅游区	0.28~0.36	0.31±0.04bc
对照点	0.12~0.19	0.16±0.03c

2.4 黑碳在城市植物叶面-地表-土壤系统中含量的对比

大气颗粒物通过干湿沉降作用会不断接触各种介质并在垂直方向上呈现不同的分布规律。通过分析南京市城市植物叶面-地表-土壤不同介质中的黑碳含量变化(表 5)可知, 黑碳含量的总体变化趋势为: 植物叶面颗粒物>地面尘≈表层土壤。叶面颗粒物的黑碳含量范围为 2.07~18.45 mg/g, 均值为 7.18 mg/g, 是地面尘黑碳含量的 1.46 倍, 表层土壤黑碳含量的 1.67 倍。唐杨等^[48]测定北京及其北部地区大气降尘中的黑碳含量范围为 1.21~50.10 mg/g, 明显高于本研究中叶面颗粒物、地表和表层土壤中的黑碳含量。Brantley 等^[40]研究发现道路两旁的绿化树种最多可以滞留大气中约 22%的黑碳颗粒物。结合本文的研究结果可以表明大气气溶胶通过植被表层至地表的迁移过程中其黑碳的含量会逐渐“稀释”, 进一步说明了大气沉降是各介质环境中黑碳的主要来源。同时, 与地面尘和表层土壤相比, 植物叶面颗粒物中的黑碳具有受干扰因素少, 分布范围广的特点, 在一定程度上可用来表征一定区域、一定时间内黑碳颗粒物的污染情况, 并可作为监测黑碳等大气污染物的有效手段。

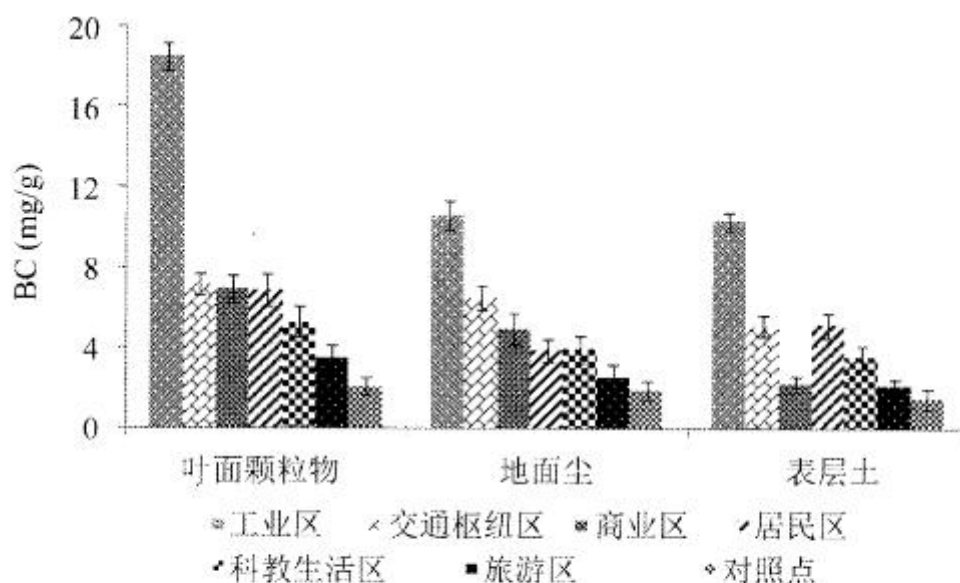


图3 南京市各功能区不同介质中的黑碳含量

Fig.3 Contents of Black Carbon in Different Medias Under Different Function Zones of Nanjing

表5 南京市不同介质中的黑碳含量

Tab.5 Contents of Black Carbon in Different Medias of Nanjing

功能区	叶面颗粒物(mg/g)	地面尘(mg/g)	表层土壤(mg/g)
工业区	18.45±0.68	10.60±0.71	10.31±0.47
交通枢纽区	7.17±0.53	6.49±0.61	5.14±0.51
商业区	6.92±0.65	4.98±0.79	2.22±0.37
居民区	6.87±0.81	3.91±0.59	5.15±0.61
科教生活区	5.30±0.76	3.97±0.68	3.6±0.57
旅游区	3.47±0.69	2.54±0.61	2.15±0.34
对照点	2.07±0.46	1.92±0.48	1.52±0.48

3 结论

(1)南京市植物叶面颗粒物中的黑碳含量呈现出冬季>秋季>春季≈夏季的季节变化特征。冬季黑碳含量的均值高达 13.49 mg/g，与其他季节的差异均达到极显著水平。

(2)城市植物叶面的黑碳含量在不同功能区之间表现出差异性。工业区的黑碳含量明显高于其他功能区。总体变化趋势为：工业区>商业区>交通枢纽区>居民区>科教生活区>旅游区>对照点。

(3)城市植物叶面颗粒物黑碳含量越高, BC/OC 值也越大, 城市植物叶面颗粒物黑碳主要来源于化石燃料的燃烧。

(4)黑碳气溶胶在通过植被表层至地表的迁移过程中其含量逐渐“稀释”下降。植物叶面颗粒物可作为监测大气黑碳污染的有效手段。

参考文献

- [1] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2006, 4 (3/4): 115 - 123.
- [2] SHRIDHAR V, KHILLARE P S, AGARWAL T, et al. Metallic species in ambient particulate matter at rural and urban location of Delhi[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175 (1/3): 600 - 607.
- [3] LIACOS J W, KAM W, DELFINO R J, et al. Characterization of organic, metal and trace element PM_{2.5} species and derivation of freeway-based emission rates in Los Angeles, CA[J]. Science of the Total Environment, 2012, 435-436 : 159 - 166.
- [4] SOLAZZO E, BIANCONI R, PIROVANO G, et al. Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII[J]. Atmospheric Environment, 2012, 53 : 75 - 92.
- [5] WANG K, ZHANG Y, NENES A, et al. Implementation of dust emission and chemistry into the Community Multiscale Air Quality modeling system and initial application to an Asian dust storm episode[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12 (21): 10209 - 10237.
- [6] DOĞANLAR Z B, ATMACA M. Influence of airborne pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al accumulation and physiological parameters of plant leaves in Antakya (Turkey)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 214 (1/4): 509 - 523.
- [7] 王丹丹, 孙峰, 周春玲, 等. 城市道路植物圆柏叶片重金属含量及其与滞尘的关系[J]. 生态环境学报, 2012, 21 (5): 947 - 951.
- [8] 秦世广, 汤洁, 石广玉, 等. 四川温江黑碳气溶胶浓度观测研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27 (8): 1370 - 1376.
- [9] 杨国福, 江洪, 余树全, 等. 浙江省 1991-2006 年森林火灾释放黑碳量的估算[J]. 生态学报, 2009, 29 (5): 2612 - 2621.
- [10] CHAMEIDES W L, BERGIN M. Soot takes center stage[J]. Science, 2002, 297 (5590): 2214 - 2215.
- [11] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, 409 (6821): 695 - 697.
- [12] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, 27 (11): 3 - 7.

-
- [13] 陶俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 2007 年春季广州城区黑碳气溶胶污染特征的初步研究[J]. 气候与环境研究, 2008, 13 (5): 658 - 662.
- [14] SCHMIDT M W I, NOACH A G. Black carbon in soils and sediments:analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14 (3): 777 - 793.
- [15] 黄观, 刘伟, 刘志红, 等. 黑碳气溶胶研究概况[J]. 灾害学, 2015, 30 (2): 205 - 214.
- [16] 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.
- [17] 汤莉莉, 祝愿, 牛生杰, 等. 南京北郊大气细粒子中黑碳气溶胶的观测研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (4): 709 - 716.
- [18] 程劲竹, 郭沛涌, 刘宁, 等. 山美水库表层沉积物黑碳分布特征及其对磷形态的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (4): 1012 - 1018.
- [19] 史晋森, 孙乃秀, 叶浩, 等. 青海高原季节性降雪中的黑碳气溶胶[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (10): 2472 - 2478.
- [20] 徐福银, 包兵, 方海兰. 上海市城市绿地土壤中黑碳分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45 (2): 457 - 461.
- [21] 王曦, 杨靖宇, 俞元春, 等. 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源-以南京市为例[J]. 生态学报, 2016, 36 (3): 837 - 843.
- [22] POPEK R, GAWROŃSKA H, WROCHNA M, et al. Particulate matter on foliage of 13 woody species:deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes-a 3 year study[J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15 (3): 245 - 256.
- [23] SEBØ A, POPEK R, NAWROT B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. Science of the Total Environment, 2012, 427-428 : 347 - 354.
- [24] YIN S, SHEN Z M, ZHOU P S, et al. Quantifying air pollution attenuation within urban parks:an experimental approach in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2011, 159 (8/9): 2155 - 2163.
- [25] TALLIS M, TAYLOR G, SINNETT D, et al. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103 (2): 129 - 138.
- [26] HARA H, KASHIWAKURA T, KITAYAMA K, et al. Foliar rinse study of atmospheric black carbon deposition to leaves of konara oak (*Quercus serrata*) stands[J]. Atmospheric Environment, 2014, 97 : 511 - 518.
- [27] QIU Y, GUAN D S, SONG W W, et al. Capture of heavy metals and sulfur by foliar dust in urban Huizhou, Guangdong Province, China[J]. Chemosphere, 2009, 75 (4): 447 - 452.

-
- [28] 冯朝阳, 高吉喜, 田美荣, 等. 京西门头沟区自然植被滞尘能力及效益研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20 (5): 155 - 159.
- [29] 张银龙, 王亚超, 庞博, 等. 城市植物叶面尘中痕量元素分布特征及其生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2010, 10 (5): 97 - 101.
- [30] 戴斯迪, 马克明, 宝乐. 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征[J]. 生态学报, 2012, 32 (16): 5095 - 5102.
- [31] 王会霞, 石辉, 李秧秧, 等. 城市植物叶面尘粒径和几种重金属(Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni)的分布特征[J]. 安全与环境学报, 2012, 12 (1): 170 - 174.
- [32] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 135-139.
- [33] LIM B, CACHIER H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays[J]. Chemical Geology, 1996, 131 (1/4): 143 - 154.
- [34] 黄佳鸣, 王晓旭, 王阳, 等. 地表灰尘中黑碳含量的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38 (1): 91 - 96
- [35] 梁淑英. 南京地区常见城市绿化树种的生理生态特性及净化大气能力的研究[D]. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2005.
- [36] 李玉琛. 济青高速公路淄博段生态防护带的环境功能与效应[D]. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2005.
- [37] 王月菡. 基于生态功能的城市森林绿地规划控制性指标研究-以南京市为例[D]. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2004.
- [38] 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硕士学位论文, 2003.
- [39] FRUIN S A, WINER A M, RODES C E. Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38 (25): 4123 - 4133.
- [40] BRANTLEY H L, HAGLER G S W, DESHMUKH P J, et al. Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 120 - 129.
- [41] 程政红, 吴际友, 刘云国, 等. 岳阳市主要绿化树种滞尘效应研究[J]. 中国城市林业, 2004, 2 (2): 37 - 40.
- [42] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, 等. 惠州城市植被的滞尘效应[J]. 生态学报, 2008, 28 (6): 2455 - 2462.
- [43] MURI G, CERMELI B, FAGANELI J, et al. Black carbon in Slovenian alpine lacustrine sediments[J]. Chemosphere, 2002, 46 (8): 1225 - 1234.

[44] DE LA ROSA J M, KNICKER H, LÓPEZ-CAPEL E, et al. Direct detection of black carbon in soils by Py-GC/MS, carbon-13 NMR spectroscopy and thermo gravimetric techniques[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72 (1): 258 - 267.

[45] GATARI M J, BOMAN J. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, Kenya, East Africa[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37 (8): 1149 - 1154.

[46] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. 土壤学报, 2006, 43 (2): 177 - 182.

[47] 陆燕, 王勤耕, 张艳燕. 长江三角洲黑碳排放特征研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51 (3): 535 - 542.

[48] 唐杨, 韩贵琳, 徐志方. 北京及其北部地区大气降尘中的黑碳含量特征[J]. 环境科学学报, 2013, 33 (2): 332 - 338.