

杭州临安 4 种绿地内 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的 浓度变化及来源分析

李晓璐¹,张天然¹,章银柯²,黄芳¹,袁楚阳¹,于慧¹,晏海¹,邵锋^{1*}

(1. 浙江农林大学,浙江 杭州 311300;2. 杭州植物园,浙江 杭州 310012)

摘要:总结城市绿地内 PM_{2.5} 中有机碳(OC)和元素碳(EC)质量浓度的时空变化规律,探究影响 OC 和 EC 质量浓度变化的因素,为改善人居环境质量提供依据。选取 4 种绿地(居住绿地、商业绿地、广场绿地和公共绿地)为研究对象,采用智能中流量 TSP 采样器采集绿地空气中的 PM_{2.5},通过热光反射法(TOR)检测样品上 OC 和 EC 的质量浓度,分析其来源。结果表明,4 种绿地内 OC 和 EC 质量浓度季节变化一致,均为冬季>秋季>春季>夏季;春、夏、秋 3 个季节 OC 和 EC 质量浓度日变化均呈“一日双峰”型,8:00—12:00 和 16:00—20:00 为早、晚高峰,12:00—16:00 和 20:00—次日 8:00 出现低谷值。二次有机碳(SOC)质量浓度为春季(2.84±0.27 μg·m⁻³)、夏季(2.82±0.32 μg·m⁻³)、秋季(2.99±0.34 μg·m⁻³)和冬季(3.15±0.25 μg·m⁻³),分别占 OC 质量浓度的 29.50%、11.96%、25.47%和 32.12%,表明二次污染在各季节均存在。冬季机动车尾气和燃煤排放是 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的主要来源。

关键词:城市绿地;PM_{2.5};有机碳;元素碳;时空变化;临安区

中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0260-07

Concentration Variations and Source Analysis of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Four Green Spaces in Lin'an District, Hangzhou

LI Xiao-lu¹, ZHANG Tian-ran¹, ZHANG Yin-ke², HUANG Fang¹, YUAN Chu-yang¹, YU Hui¹,
YAN Hai¹, SHAO Feng^{1*}

(1. Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Hangzhou Botanical Garden, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: This study aims to summarize the spatio-temporal variation rules of the mass concentration of the organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} in urban green spaces and to probe into the factors that influence the variation of the mass concentration, so as to provide references for the improvement of human settlement. Taking residential, commercial, square and public green spaces as the research objects, the intelligent medium volume TSP samplers were used to collect the airborne PM_{2.5} in the green spaces. Thermo-optic Reflection (TOR) method was adopted to detect the mass concentration of the OC and EC in the samples and to retrieve the sources. The results revealed that the mass concentration of the OC and EC in the four seasons had the same trend: winter>autumn>spring>summer. The daily mass concentration changes of the OC and EC showed two peaks in spring, summer and autumn. The morning peak appeared during 8:00—12:00 and the evening peak arose during 16:00—20:00. The valley value appeared during 12:00—16:00 and 20:00—8:00 the next morning. The mass concentrations of secondary organic carbon (SOC) in the four seasons were 2.84±0.27 μg·m⁻³ in spring, 2.82±0.32 μg·m⁻³ in summer, 2.99±0.34 μg·m⁻³ in autumn, and 3.15±0.25 μg·m⁻³ in winter, accounting for 29.50%,

收稿日期:2020-06-18 修回日期:2020-11-26
基金项目:国家自然科学基金(51508515);浙江省大学生科技创新活动计划(2018R412044)。
作者简介:李晓璐。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:2417972498@qq.com
*通信作者:邵 锋,副教授,博士。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:shaofeng@zafu.edu.cn

11.96%,25.47%,and 32.12% of the OC mass concentration,respectively,indicating the ubiquity of secondary pollution in all the seasons. Vehicle exhaust and coal burning emissions were the main sources of the OC and EC in PM_{2.5} in winter.

Key words:urban green space; PM_{2.5}; organic carbon; elemental carbon; spatio-temporal variation; Lin'an district

随着城市的快速发展,空气污染,尤其是碳质气溶胶(carbonaceous aerosols,CA)污染越来越严重^[1-2]。CA主要由有机碳(organic carbon,OC)和元素碳(elemental carbon,EC)组成^[3],约占PM_{2.5}质量浓度的38%^[4]。OC来自污染源直接排放的一次有机碳(primary organic carbon,POC)和挥发性气体经光化学氧化生成的二次有机碳(secondary organic carbon,SOC)^[5]。EC由木材、化石燃料和生物质等不完全燃烧产生,其化学性质稳定,通常被认为是一次污染的示踪物^[6]。CA对全球气候变化、生物多样性、空气质量和人体健康均有重要影响^[7]。绿地作为城市自然生态系统的重要组成部分,不仅能为人们提供休闲活动空间,还可以在改善城市生态环境上发挥积极作用^[8-9]。研究表明,植物枝干和叶片可沉降、吸收、阻滞和吸附PM_{2.5}^[10-13],间接降低大气PM_{2.5}中OC和EC的质量浓度。李超群等^[14]研究发现,叶片滞尘量和最大滞尘量与叶面积呈负相关,即叶面积越小,单位面积的滞尘量和最大滞尘量越大。陈明等^[15]研究表明,PM_{2.5}消减量随绿地规模的扩大而呈现增长趋势,当绿地规模>10 hm²时消减量减缓。综合性公园绿地内PM_{2.5}质量浓度低于公共设施绿地和道路绿地,说明合理的复层结构绿地对PM_{2.5}滞留作用明显^[16]。以上研究大多集中在绿地对PM_{2.5}浓度变化的影响上,而有关绿地内PM_{2.5}中OC和EC的分布及污染状况却少有报道。本研究选取与居民生活、休闲

活动关系密切的4种城市绿地作为对象,分析总结绿地内PM_{2.5}中OC和EC质量浓度的时空变化规律及影响因素,探究OC和EC的来源,以期为城市绿地布局及大气污染防控政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

杭州市临安区(118°51′—119°52′E,29°56′—30°23′N)地处浙江省西北部天目山区,东临余杭区、西接安徽省歙县。属中亚热带季风型气候,四季分明、温暖湿润。年均气温为16.4℃,年均降水量为1 613.9 mm。依据《城市绿地分类标准》CJJ/T 85—2017,充分考虑临安城市绿地分布情况,选取居住绿地(RG,居住用地内的配建绿地)、商业绿地(BG,商业服务业设施用地内的绿地)、广场绿地(G3,以游憩、纪念、集会和避险等功能为主的城市公共活动场地)和公共绿地(AG,公共管理与公共服务设施用地内的绿地)等4种绿地作为研究对象(图1)。居住绿地位于春天小区。样地选择在小区内的3号与4号楼之间,为狭长形密闭空间,面积约1 500 m²。商业绿地位于衣锦商业街边。样地为半开敞空间,周边人流量及车流量大,面积约1 800 m²。广场绿地位于五舟广场。该样地以硬质铺装为主,空间开敞,面积约4 500 m²。公共绿地选择在浙江农林大学东湖校区内的学4号楼南侧,为半开敞空间,是师生交流的重要场所,面积约1 600 m²。



图 1 样地分布

Fig. 1 The distribution map of sample plots

1.2 研究方法

1.2.1 PM_{2.5} 采集及质量浓度测算 使用智能中流量 TSP 采样器(KC-120H)中安装的 QMA 石英纤维滤纸(CAT NO. 1851-090)采集绿地空气中的 PM_{2.5}。采样前用锡箔纸包裹滤纸,置于马弗炉(设定温度 450℃)中灼烧 4 h,除去滤纸上原有的有机物及杂质。后将滤纸静置于恒温恒湿箱(Premium ICH)(设定温度 25℃、相对湿度 50%)内 48 h。取出后随即使用万分之一电子天平(SI-234)称量和记录滤纸质量,要求重复称量 3 次,取平均值作为滤纸采样前的质量。称量后将滤纸常温存放在滤纸盒中待用。PM_{2.5} 采样时间为 2017 年 3 月和 4 月(春季)、2017 年 2 月和 12 月(冬季),每月 1 次,每次 3 d(每月的月初、月中和月末各 1 d),每天连续采样 24 h(8:00—次日 8:00)。要求在天气晴朗、无风或微风条件下采样。采样结束后将滤纸再次在恒温恒湿条件下处理并称重、记录滤纸质量。滤纸前后称得质量差值即为该时段内采集到 PM_{2.5} 质量浓度。

1.2.2 OC 和 EC 质量浓度测算 采样后的滤纸中碳组分采用有机碳/元素碳分析仪(DRI2001A)进行检测,OC 和 EC 质量浓度通过热光反射法(Thermo-optic Reflection, TOR)获得。首先,在热光炉中注入氦气,在无氧条件下逐步加热测试滤纸,使滤纸中的 OC1、OC2、OC3 和 OC4 等有机碳挥发。之后再通入氧(2%)和氮(98%)的混合气,此时继续加热,使滤纸中的 EC1、EC2 和 EC3 等元素碳充分燃烧。经燃烧释放出的有机物质经 MnO₂ 催化氧化转化生成 CO₂,随后在还原炉中被还原成 CH₄,最后通过火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)定量检测。无氧加热时部分有机碳会发生碳化现象,从而形成黑碳(BC),使得热谱图上的有机碳和元素碳难以分别,此时用 633 nm 的氦-氖激光全程检测滤纸的反光光强,准确确定有机碳和元素碳的区分点。有机碳碳化过程形成的碳化物称为聚合碳(OPC),IMPROVE 协议将总有机碳 TOC 定义为 OC1+OC2+OC3+OC4+OPC(OC),总元素碳 TEC 定义为 EC1+EC2+EC3-OPC(EC)。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 2010 统计和整理数据,SPSS 22.0 进行方差分析和相关性分析,Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 质量浓度季节变化

由图 2 可见,4 种绿地内 PM_{2.5} 中 OC 的平均质量浓度为冬季(31.14±2.45 μg·m⁻³)>秋季(12.75±1.05 μg·m⁻³)>春季(11.35±0.90 μg·m⁻³)>夏季(10.26±0.86 μg·m⁻³)。春季,OC 质量浓度为商业绿地(13.68±1.12 μg·m⁻³)>居住绿地(11.88±0.91 μg·m⁻³)>公共绿地(10.23±0.89 μg·m⁻³)>广场绿地(9.61±0.70 μg·m⁻³)。商业绿地的 OC 浓度最高,是广场绿地的 1.42 倍。夏季,4 种绿地内 OC 质量浓度为(8.78±0.90)~(11.48±0.85)μg·m⁻³。商业绿地的 OC 浓度最高,为 11.48±0.85 μg·m⁻³,广场绿地的最低,仅为 8.78±0.90 μg·m⁻³,居住绿地和公共绿地的 OC 浓度差异不显著(P>0.05)。秋季,各绿地内 OC 质量浓度较春、夏季均呈现上升趋势,浓度大小为商业绿地(14.70±1.03 μg·m⁻³)>居住绿地(12.80±1.00 μg·m⁻³)>广场绿地(11.79±1.24 μg·m⁻³)>公共绿地(11.72±1.20 μg·m⁻³)。商业绿地的 OC 浓度高于其他 3 种绿地的,广场绿地和公共绿地的 OC 浓度差异不显著(P>0.05)。冬季,4 种绿地内 OC 的平均质量浓度达 31.14±2.45 μg·m⁻³,商业绿地的 OC 浓度最高(37.15±2.80 μg·m⁻³),其次为居住绿地(32.73±2.70 μg·m⁻³),广场绿地和公共绿地的较低,分别为 26.30±2.00 μg·m⁻³ 和 28.38±2.30 μg·m⁻³。

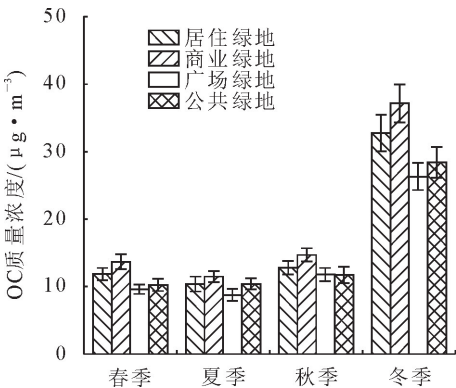


图 2 不同绿地内 PM_{2.5} 中 OC 浓度季节变化
Fig. 2 Seasonal variation of OC concentration in PM_{2.5} in different green spaces

4 种绿地内 PM_{2.5} 中 EC 的平均质量浓度为冬季(10.55±1.02 μg·m⁻³)>秋季(4.09±0.37 μg·m⁻³)>春季(3.83±0.33 μg·m⁻³)>夏季(3.17±0.29 μg·m⁻³)(图 3),EC 浓度季节变化与 OC 的一致。春季,商业绿地的 EC 质量浓度最高(4.46±0.40 μg·m⁻³),广场绿地的最低(3.39±0.31 μg·m⁻³)。夏季,EC 质量浓度为商业绿地(3.37±0.30 μg·m⁻³)>居住绿地(3.30±0.27 μg·m⁻³)>公共绿地(3.27±0.28 μg·m⁻³)>广场绿地(2.75±0.25 μg·m⁻³)。相较于春季,夏季绿地内 EC 浓度略降低。秋季,4 种绿地的 EC 质量浓度差异不显著(P>0.05),商业绿地的 EC 浓度最高

($4.37 \pm 0.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 其次为居住绿地($4.14 \pm 0.37 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 广场绿地和公共绿地的较低, 分别为 $3.95 \pm 0.38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3.88 \pm 0.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冬季, 各绿地内 EC 质量浓度均明显上升, 浓度大小为商业绿地($12.33 \pm 1.10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 居住绿地($10.83 \pm 1.20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 公共绿地($9.70 \pm 0.88 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 广场绿地($9.33 \pm 0.80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 商业绿地的 EC 浓度最高, 为广场绿地的 1.32 倍。

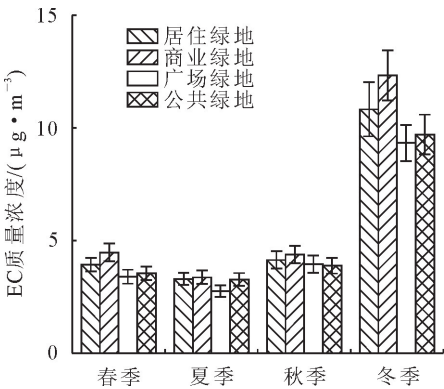


图 3 不同绿地内 PM_{2.5} 中 EC 浓度季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of EC concentration in PM_{2.5} in different green spaces

2.2 绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 质量浓度日变化

春季, 4 种绿地的 OC 质量浓度为(8.72 ± 0.78) ~ (15.24 ± 1.20) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。16:00—20:00, 商业绿

地的 OC 浓度最高, 达 $15.24 \pm 1.20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 20:00—次日 8:00, 公共绿地的 OC 浓度最低, 仅为 $8.72 \pm 0.78 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。4 种绿地的 EC 质量浓度为 (2.92 ± 0.25) ~ (4.84 ± 0.45) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。16:00—20:00, 商业绿地的 EC 浓度亦最高($4.84 \pm 0.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); 20:00—次日 8:00, 广场绿地的 EC 浓度最低($2.92 \pm 0.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) (图 4)。4 种绿地内 OC 和 EC 浓度日变化均呈“一日双峰”型。8:00—12:00 为早高峰, 12:00—16:00 是一天的低谷值, 之后, OC 和 EC 浓度开始上升, 16:00—20:00 出现晚高峰, 20:00—次日 8:00, OC 和 EC 浓度开始下降, 再次出现较低值。

由图 5 可见, 夏季, 4 种绿地的 OC 日平均质量浓度为 $10.26 \pm 0.93 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中, 商业绿地的 OC 日平均浓度最高($11.48 \pm 0.98 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 是广场绿地($8.78 \pm 0.82 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 1.31 倍。4 种绿地的 EC 日平均浓度为 $3.17 \pm 0.28 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 商业绿地的 EC 日平均浓度最高, 达 $3.37 \pm 0.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 广场绿地的最低, 仅为 $2.75 \pm 0.22 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 居住绿地和公共绿地的 EC 日平均浓度差异不显著 ($P > 0.05$)。夏季, 4 种绿地内 OC 和 EC 浓度日变化仍为“一日双峰”型。8:00—12:00 和 16:00—20:00 均为高峰值, 12:00—16:00 和 20:00—次日 8:00 为低谷值。

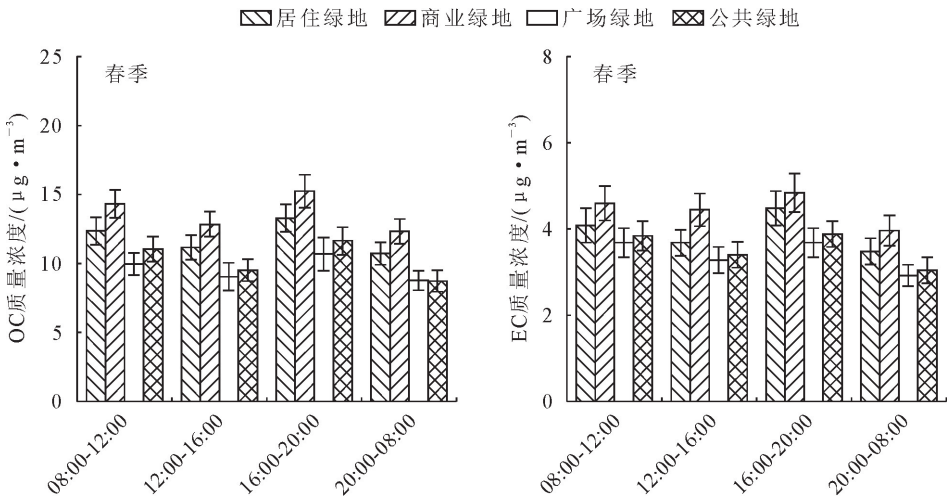


图 4 春季不同绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度日变化

Fig. 4 Daily variation of OC and EC concentration in PM_{2.5} in different green spaces in spring

由图 6 可见, 秋季, OC 日平均质量浓度为商业绿地($14.69 \pm 1.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 居住绿地($12.80 \pm 1.08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 广场绿地($11.79 \pm 1.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 公共绿地($11.72 \pm 0.82 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); EC 日平均浓度为商业绿地($4.37 \pm 0.37 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 居住绿地($4.14 \pm 0.38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 广场绿地($3.95 \pm 0.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 公共绿地($3.88 \pm 0.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。商业绿地的 OC 和 EC 浓度均最高, 公共绿

地的均最低, 居住绿地和广场绿地的差异不显著 ($P > 0.05$)。此外, 秋季, OC 和 EC 浓度日变化趋势与春、夏季一致, 呈“一日双峰”型, 即 8:00—12:00 和 16:00—20:00 为早、晚高峰, 12:00—16:00 和 20:00—次日 8:00 出现低谷值。

冬季, 商业绿地的 OC 和 EC 日平均质量浓度最高, 分别为 $37.15 \pm 3.28 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $12.33 \pm 1.08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 广场绿地的 OC 和 EC 日平均浓度

最低,分别为 $26.30 \pm 2.43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $9.33 \pm 0.88 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。居住绿地和商业绿地的 OC 和 EC 浓度差异不显著($P > 0.05$)(图 7)。与春、夏和秋 3 个季节不同,冬季,OC 和 EC 质量浓度日变化均呈现“先

降后升”的规律,8:00—12:00 为高峰值,12:00—16:00 浓度下降,16:00—次日 8:00 浓度持续上升,并达到一天中的最高值。

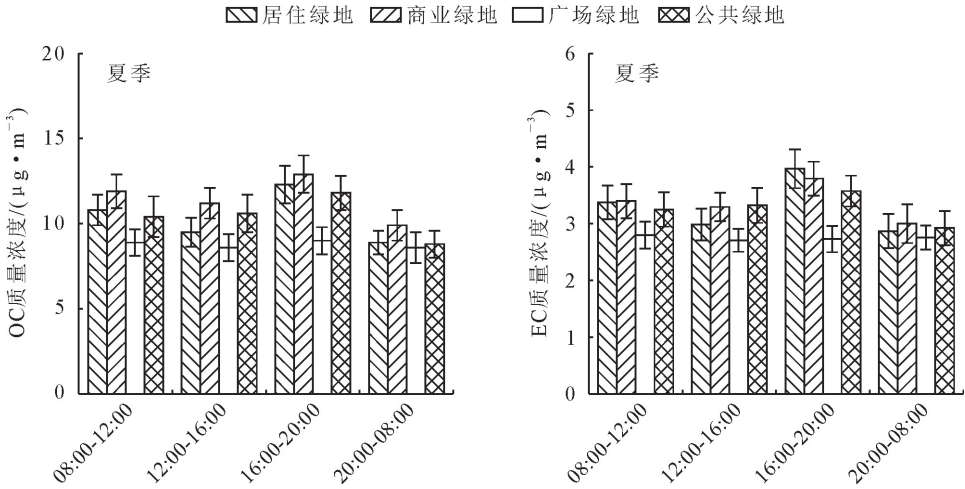


图 5 夏季不同绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度日变化

Fig. 5 Daily variation of OC and EC concentration in PM_{2.5} in different green spaces in summer

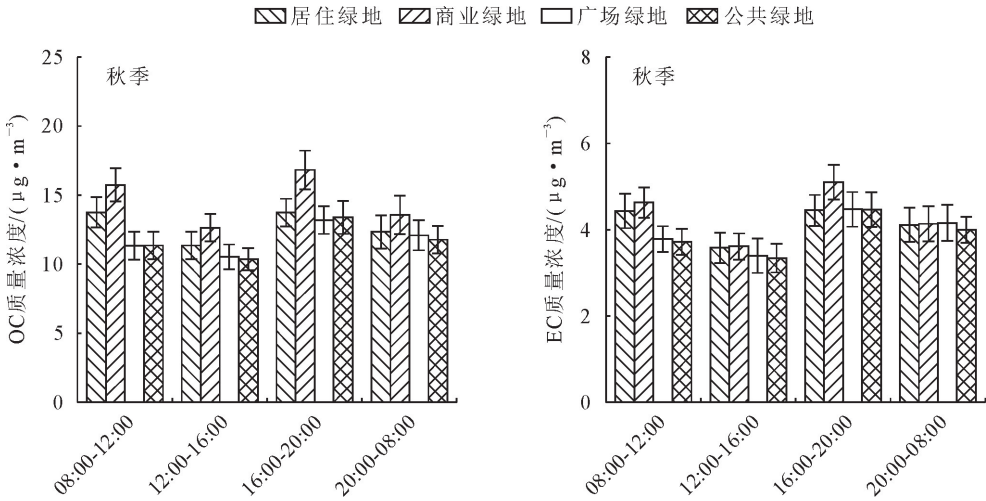


图 6 秋季不同绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度日变化

Fig. 6 Daily variation of OC and EC concentration in PM_{2.5} in different green spaces in autumn

2.3 绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 来源

研究表明,PM_{2.5} 中 OC 和 EC 之间的相关性可在一定程度上反映两者的污染来源情况。若相关性好,说明 OC 和 EC 来自相似的污染物;相关性差,则说明来源复杂^[17]。由图 8 可知,OC 和 EC 的相关系数依次为春季(0.84) > 夏季(0.70) > 秋季(0.57) > 冬季(0.38)。春季,PM_{2.5} 中 OC 和 EC 相关系数最高,表明有相似的污染来源;冬季,相关系数最低,说明冬季碳质污染来源相对复杂。目前,国内外多采用 OC 与 EC 比值来判断是否有二次有机碳(SOC)生成,当 OC/EC > 2 时,说明大气中存在二次污染^[18]。本研究中,OC 与 EC 比值分别为春季(3.08)、夏季(2.87)、秋季(3.16)和冬季(3.26),表明各季节均有 SOC 生成,均存在二次污染。为进

一步分析大气中的二次污染状况,以各季节 4 种绿地内 OC 与 EC 比值的最小值(OC/EC)_{min} 来估算 SOC 的质量浓度。全年 SOC 的平均质量浓度为 $2.94 \pm 0.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,SOC 浓度为冬季($3.15 \pm 0.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 秋季($2.99 \pm 0.34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 春季($2.84 \pm 0.27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 夏季($2.82 \pm 0.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),分别占 OC 质量浓度的 32.12%、25.47%、29.50% 和 11.96%。冬季,SOC 占 OC 的比重最高,表明冬季二次污染较其他季节严重。此外,不同污染源的 OC/EC 值不同,其比值能进一步说明 OC 和 EC 的来源。若 OC/EC 值在 2.5~7.2,则大气受柴油、汽油车的尾气排放和燃煤排放影响较大^[19]。临安地区主要污染源为机动车尾气和燃煤排放。冬季,大气受机动车尾气和燃煤污染影响更大。

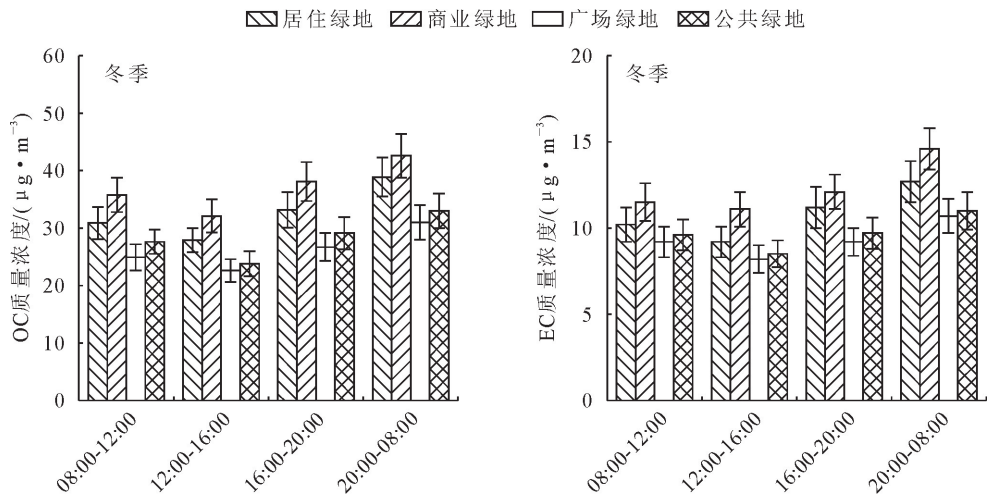


图 7 冬季不同绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度日变化

Fig. 7 Daily variation of OC and EC concentration in PM_{2.5} in different green spaces in winter

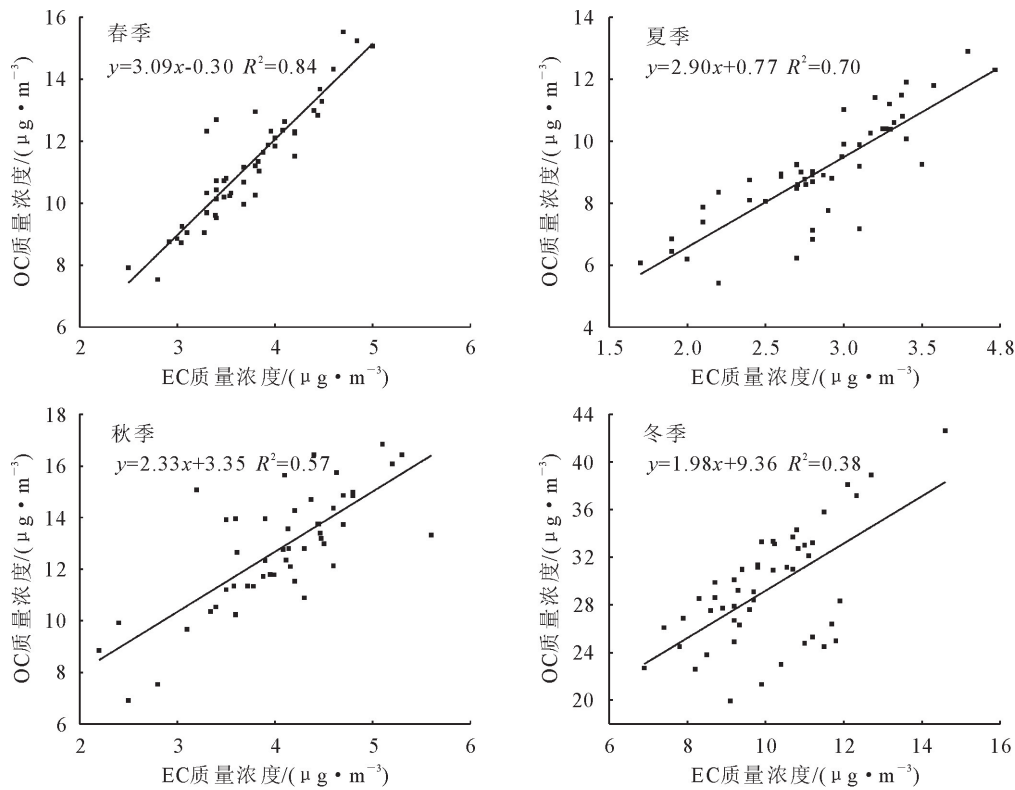


图 8 不同季节绿地内 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性

Fig. 8 Correlation between OC and EC in PM_{2.5} in green spaces in different seasons

3 结论与讨论

3.1 结论

4 种绿地内 OC 和 EC 质量浓度季节变化明显,均表现为冬季>秋季>春季>夏季;春、夏、秋 3 个季节 OC 和 EC 质量浓度日变化均呈“一日双峰”型,8:00—12:00 和 16:00—20:00 为早、晚高峰,12:00—16:00 和 20:00—次日 8:00 是一天中的低谷值,而冬季 OC 和 EC 浓度日变化均呈“先降后升”的规律,8:00—12:00 为高峰值,12:00—16:00

浓度下降,16:00—次日 8:00 浓度持续上升,并达到一天中的最高值。4 个季节 OC/EC 值为 2.87~3.26,SOC 质量浓度为春季(2.84±0.27 μg·m⁻³)、夏季(2.82±0.32 μg·m⁻³)、秋季(2.99±0.34 μg·m⁻³)和冬季(3.15±0.25 μg·m⁻³),分别占 OC 质量浓度的 29.50%、11.96%、25.47%和 32.12%。冬季机动车尾气和燃煤排放是 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的主要来源。

3.2 讨论

杭州临安冬季寒冷,近地层大气对流作用弱,同

时,该季节植物叶片脱落,对 $PM_{2.5}$ 的滞留和吸附能力明显减弱,导致大气污染较为严重,这与其他学者的研究结论一致^[20-21]。牟臻等^[22]研究发现,OC 和 EC 质量浓度的季节变化均表现为冬季最高,春、夏和秋季相对较低。华北地区 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶平均质量浓度为冬季高、夏季低^[23],这与本研究结果一致。本研究表明,春、夏、秋 3 个季节 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 质量浓度日变化呈现“双峰”现象。B. J. Turpin *et al*^[24] 研究显示,OC 和 EC 质量浓度昼夜变化明显,夏季白天和秋季夜晚均出现浓度峰值,这与本研究结果不同。由于污染来源不同,各绿地内的碳质组分质量浓度变化会存在一定的差异。李安娜等^[25] 对华南背景区域鼎湖山站内碳质气溶胶浓度变化研究发现,OC 主要来自燃煤、机动车尾气和生物源的排放,OC 化学性质不稳定,易受光化学反应而生成 SOC;EC 受燃煤、机动车排放和扬尘的影响较大。重庆市大气碳质气溶胶中 SOC/OC 值在夏季最高,冬、春季次之,秋季最低,这可能是重庆地区夏季太阳辐射强烈,OC 经光化学反应导致 SOC 的生成量增多^[26]。本研究仅选取了杭州临安 4 种绿地为对象,对大气碳质气溶胶污染状况进行研究,得到的结论具有一定的地域局限性。将来应增加城市绿地的类型和数量,持续开展相关研究。

参考文献：

[1] SAWLANI R,AGNIHOTRI R,SHARMA C,*et al*. The severe Delhi SMOG of 2016:a case of delayed crop residue burning, coincident firecracker emissions,and atypical meteorology[J]. Atmospheric Pollution Research,2019,10:868-879.

[2] GURJAR B R,BUTLER T M,LAWRENCE M G,*et al*. Evaluation of emissions and air quality in megacities[J]. Atmospheric Environment,2008,42:1593-1606.

[3] 王广华,位楠楠,刘卫,等.上海市大气颗粒物中有机碳(OC)与元素碳(EC)的粒径分布[J].环境科学,2010,31(9):1993-2001.

WANG G H,WEI N N,LIU W.*et al*. Size distributions of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Shanghai atmospheric particles[J]. Environmental Science,2010,31(9):1993-2001. (in Chinese)

[4] CAO J J,LEE S C,HO K F,*et al*. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl river delta region,China[J]. Atmospheric Environment,2004,38:4447-4456.

[5] LONATI G,OZGEN S,GIUGLIANO M. Primary and secondary carbonaceous species in $PM_{2.5}$ samples in Milan (Italy) [J]. Atmospheric Environment,2007,41:4599-4610.

[6] MKOMA S L,CHI X G,MAENHAUT W. Characterization of carbonaceous materials in $PM_{2.5}$ and PM_{10} size fractions in Morogoro,Tanzania,during 2006 wet season campaign[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B,2010,

268:1665-1670.

[7] PANT P,LAL R M,GUTTIKUNDA S K,*et al*. Monitoring particulate matter in India: recent trends and future outlook [J]. Air Quality,Atmosphere & Health,2019,12:45-58.

[8] 李锋,王如松.城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究—以扬州市为例[J].生态学报,2003,23(9):1929-1936.

LI F,WANG R S. Evaluation,planning and prediction of ecosystem services of urban green space;a case study of Yangzhou City[J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(9):1929-1936. (in Chinese)

[9] NOWAK D J,HIRABAYASHI S,BODINE A,*et al*. Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects[J]. Environmental Pollution,2013,178:395-402.

[10] NOWAK D J,CIVEROLO K L,RAO S T,*et al*. A modeling study of the impact of urban trees on ozone[J]. Atmospheric Environment,2000,34:1601-1613.

[11] 刘佩琪,邓志华,陈奇伯.城市园林对大气颗粒物的消减与大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度变化[J].西北林学院学报,2016,31(6):13-18.

LIU P Q,DENG Z H,CHEN Q B. Reduction of atmospheric particulate and the concentration change of sulfur dioxide and nitrogen oxides by urban forests[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(6):13-18. (in Chinese)

[12] 段嵩嵩,闫淑君,吴艳芳,等.福州市 15 种常用灌木滞留颗粒物效应的时空特征[J].西北林学院学报,2018,33(2):244-251.

DUAN S L,YAN S J,WU Y F,*et al*. Temporal-spatial variation characteristics of the particulate matter retention effects of fifteen widely roadside greening shrubs in Fuzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(2):244-251. (in Chinese)

[13] 么旭阳,胡耀升,刘艳红.北京市 8 种常见绿化树种滞尘效应[J].西北林学院学报,2014,29(3):92-95.

YAO X Y,HU Y S,LIU Y H. Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):92-95. (in Chinese)

[14] 李超群,钟梦莹,武瑞鑫,等.常见地被植物叶片特征及滞尘效应研究[J].生态环境学报,2015,24(12):2050-2055.

LI C Q,ZHONG M Y,WU R X,*et al*. Study on leaf characteristics and dust-capturing capability of common ground cover plants[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(12):2050-2055. (in Chinese)

[15] 陈明,胡义,戴菲.城市绿地空间形态对 $PM_{2.5}$ 的消减影响:以武汉市为例[J].风景园林,2019,26(12):74-78.

CHEN M, HU Y, DAI F. Influence of urban green space forms on $PM_{2.5}$ reduction;a case study of Wuhan[J]. Landscape Architecture,2019,26(12):74-78. (in Chinese)

[16] 俞琳琳,胡海波,余伟.城市绿地类型对大气 $PM_{2.5}$ 浓度的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(3):179-184.

YU L L, HU H B, YU W. The effects of $PM_{2.5}$ concentrations by urban green spaces[J]. Journal of Nanjing Forestry University; Natural Sciences Edition, 2020, 44(3): 179-184. (in Chinese)

政策惠及 56.7 万贫困人口[EB/OL]. (2020-04-22)[2020-07-07]. <http://lyj.shaanxi.gov.cn/>.

[25] 央广网. 陕南三市 2018 年计划 57 万贫困人口实现脱贫[EB/OL]. (2018-10-23) [2020-07-07]. <http://www.cnr.cn/>.

[26] 汉中市人民政府. 南郑区生态脱贫见成效[EB/OL]. (2020-01-10) [2020-09-06]. <http://www.hzghj.com/>

[27] 叶有禄,姚其刚,方义龙,等. 洛南县贫困林区生态扶贫模式的构建与优化策略[J]. 陕西林业科技,2020,48(2):95-99.

[28] 陕西省林业局. 宁陕:“生态+”扶贫新模式助力群众脱贫致富[EB/OL]. (2020-01-07) [2020-09-06]. <http://lyj.shaanxi.gov.cn/>.

[29] 郝学峰. 关于林业扶贫工作的分析与研究[J]. 国家林业局管理干部学院学报,2015,14(1):49-53.

[30] 李丹,李国,王霓虹,等. 基于条码的林下经济产品质量可追溯管理系统[J]. 北京林业大学学报,2013,35(1):144-148.

LI D,LI G,WANG N H,*et al.* Traceable quality system of under-forest economy product based on barcode[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(1): 144-148. (in Chinese)

[31] 杜德鱼. 陕西省林下经济发展模式研究[J]. 西北林学院学报, 2013,28(5):264-268.

DU D Y. Development model of under forest in Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 264-268. (in Chinese)

[32] 吴恒,朱丽艳,王海亮,等. 新时期林下经济的内涵和发展模式思考[J]. 林业经济,2019,41(7):78-81.

WU H,ZHU L Y,WANG H L,*et al.* Thinking on connotation and development mode of non-timber forest-based economy in the new era[J]. Forestry Economics, 2019, 41(7): 78-81. (in Chinese)

[33] 王岳,朱震锋. 黑龙江森工林区经济转型发展的动力因素分析[J]. 森林工程,2019,35(3):26-31.

[34] 王建良. 扶贫攻坚造林专业合作社引领林业生态精准扶贫[J]. 林业经济,2017,39(10):31-34.

[35] 刘同山,苑鹏. 农民合作社是有效的益贫组织吗[J]. 中国农村经济,2020(5):39-54.

LIU T S,YUAN P. Are farmers' cooperatives effective pro-poor organizations[J]. Chinese Rural Economy, 2020(5): 39-54. (in Chinese)

[36] 张连刚,柯水发. 农户对林业专业合作组织满意度的影响因素实证分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):285-292.

ZHANG L G,KE S F. Empirical analysis on the influence of Farmers satisfaction in specialized forestry cooperative organization and its mechanism of action[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 285-292. (in Chinese)

(上接第 266 页)

[17] BLANCHARD C L,HIDY G M,TANENBAUM S,*et al.* Carbon in southeastern U. S. aerosol particles: empirical estimates of secondary organic aerosol formation[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 6710-6720.

[18] CHOW J C,WATSON J G,LU Z Q,*et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(12): 2079-2112.

[19] 叶招莲,刘佳澍,李清,等. 常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源[J]. 环境科学,2017,38(11):4469-4477.

YE Z L,LIU J S,LI Q,*et al.* Characteristics and source identification of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} measurements during summer and fall in Changzhou[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4469-4477. (in Chinese)

[20] ZHAO P S,DONG F,YANG Y D,*et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71: 389-398.

[21] 周怀中,王杨君,徐奔奔,等. 金华市大气 PM_{2.5} 及其含碳组分的污染特征[J]. 环境科学与技术,2018,41(10):192-197.

ZHOU H Z,WANG Y J,XU B B,*et al.* Pollution characteristics of PM_{2.5} and its carbonaceous species in Jinhua[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41(10): 192-197. (in Chinese)

[22] 牟臻,陈庆彩,王羽琴,等. 西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征[J]. 环境科学,2019,40(4):1529-1536.

MU Z,CHEN Q C,WANG Y Q,*et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM_{2.5} in Xi'an[J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1529-1536. (in Chinese)

[23] 申锐君,张向云,刘颀,等. 华北典型城市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的季节变化与组成特征[J]. 生态环境学报,2016,25(3): 458-463.

SHEN K J,ZHANG X Y,LIU D,*et al.* Characterization and seasonal variation of carbonaceous aerosol in urban atmosphere of a typical city in north China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(3): 458-463. (in Chinese)

[24] TURPIN B J,HUNTZICKER J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations[J]. Atmospheric Environment, 1991, 25A(2): 207-215.

[25] 李安娜,温天雪,华维,等. 鼎湖山大气颗粒物中 OC 与 EC 的浓度特征及粒径分布[J]. 环境科学,2020,41(9):3098-3917.

[26] 彭小乐,郝庆菊,温天雪,等. 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学,2018,39(8):3502-3510.

PENG X L,HAO Q J,WEN T X,*et al.* Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei District, Chongqing[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3502-3510. (in Chinese)