

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201708039

引文格式: 余岑涔, 王国祥, 韩睿明, 等. 南京市香樟树皮重金属含量及分布特征 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 746–754
YU CC, WANG GX, HAN RM, et al. Heavy metal contents and distribution characteristics in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 746–754

南京市香樟树皮重金属含量及分布特征

余岑涔^{1,2}, 王国祥², 韩睿明², 张银龙^{1*}

(1. 南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037; 2. 南京师范大学 环境学院, 南京 210023)

摘 要: 重金属易在大气细颗粒物中富集,经呼吸道进入人体肺泡沉积,危害人类健康。该研究以南京市香樟树皮为对象,选取文教区、交通区、工业区、风景区和商业区 5 个功能区,探究了不同季节香樟树皮中重金属 Cr、Pb、Cu 和 Zn 含量的分布特征,比较了树皮和叶面颗粒物中不同重金属含量的空间分布差异。结果表明:南京市商业区和工业区重金属污染较严重。不同功能区香樟树皮重金属含量具时空分布差异,树皮中重金属含量基本呈秋季>冬季>春季>夏季的季节变化特征,各功能区重金属含量表现为商业区(CA)>文教区(CEA)≈工业区(TA)>交通区(IA)>风景区(SA)。与树皮相比,叶面颗粒物重金属含量较高,商业区叶面颗粒物重金属含量最高,风景区含量最低。经 Pearson 相关性分析,工业区和文教区香樟树皮中 Cr 元素具显著相关性($P<0.05$),Cu 与 Zn 相互对应呈显著相关,表明这两种元素可能具有相似来源;工业区和交通区树皮中 Pb 具极显著相关性($P<0.01$)。植物监测可以指示和预测大气重金属污染水平,能反映地区污染情况。

关键词: 树皮, 重金属, 香樟, 叶面颗粒物, 南京

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)06-0746-09

Heavy metal contents and distribution characteristics in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing

YU Cencen^{1,2}, WANG Guoxiang², HAN Ruiming², ZHANG Yinlong^{1*}

(1. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Heavy metals are easily enriched in fine particles of the atmosphere and enter the alveolar deposits of the human body through the respiratory tract, and endanger human health. In recent years, atmospheric heavy metal pollution

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(41403064); 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项目(PAPD); 江苏省科技厅基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20140922)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(41403064); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(13KJA80002); Research Innovation Program for College Graduates of Jiangsu Province, China(KYZZ150255); Construction of Advantageous Disciplines in Colleges and Universities of Jiangsu Province, China(PAPD); Natural Science Foundation for Youth of Jiangsu Province, China(BK20140922)].

作者简介: 余岑涔(1994-),女,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为生态环境修复,(E-mail) 2607802009@qq.com。

*通信作者: 张银龙,博士,教授,从事城市生态学、环境生态学、生态环境规划与评价等教学与科研工作,(E-mail) ecoenvylz@163.com。

is gradually aroused people's attention. The direct exposure of barks to the air is an important transitional step for heavy metals to enter plants, accumulating pollutants over the long term. Five different urban areas in Nanjing (commercial area, cultural and educational area, industrial area, traffic area and scenic area) were chosen to study the distribution characteristics of the contents of Cr, Pb, Cu and Zn in different seasons, using barks of *Cinnamomum camphora* trees as research objects. The differences in the spatial distribution of different heavy metal contents in barks and foliar particles were also compared. The main conclusions of this study can be summed up as follows: Heavy metal pollution in commercial and industrial areas are more serious. Heavy metal contents in the barks of *C. camphora* trees in different functional areas of Nanjing have obvious spatial and temporal distribution characteristics. The contents of heavy metals in the barks of different functional areas follow the order of commercial area (CA) > cultural and educational area (CEA) \approx industrial area (IA) > traffic area (TA) > scenic area (SA). Heavy metal contents in the barks in different seasons follows the order of Autumn > Winter > Spring > Summer. Contents of heavy metals in particulate matter of leaves were higher than those in barks. Contents of heavy metals in foliar particles in commercial area were the highest, and contents in scenic area are the lowest. Pearson correlation analysis showed that there was a significant correlation ($P < 0.05$) between Cr in the barks of *C. camphora* trees in industrial and cultural areas, and significant correlations between Cu and Zn, indicating that these two kinds of elements may have similar origins. Contents of Pb between industrial area and traffic area were in significant correlation ($P < 0.01$), mainly from traffic emissions. Plant monitoring can indicate and predict the level of heavy metal pollution in the atmosphere. It is a simple and practical monitoring tool that can reflect the pollution in the area and provide a scientific basis for the monitoring of urban ecological environment.

Key words: barks, heavy metal, *Cinnamomum camphora*, particulate matter, Nanjing

重金属污染不能被微生物分解,易通过食物链富集放大(李书鼎和李雪莲,2000),已有研究关注水土介质重金属污染特征与修复(刘材材等,2016;刘亚纳等,2016;王祖伟等,2016)。近年来大气重金属污染逐步引起重视。污染大气含多种粒径颗粒物,重金属易在细颗粒物中富集,经呼吸道进入人体肺泡沉积,威胁人类健康(余岑涔等,2016)。因此,迫切需要简便实用有效的方法来指示和预测大气重金属污染水平。植物对大气污染灵敏度高,采样方便,能反映地区污染情况,利用植物监测大气重金属污染已成为研究热点(Manning & Godzik,2004)。目前,对植物叶片(刘玲等,2014;鲁绍伟等,2014)、树皮(Rusu et al,2006;Berlizov et al,2007;Al-Alawi et al,2007)、枝干等(Onder & Dursun,2006;Gratani et al,2008;刘波等,2016)不同器官中重金属积累特征的研究较多,也有对叶面尘、地表尘、地表径流等环境介质中重金属含量特征的研究(李如忠等,2011;Li et al,2001),但对南京市树皮重金属含量时空变化特征的讨论甚少,鲜见综合考虑植物器官及环境

介质中重金属含量特征的研究。

树皮直接暴露在空气中,是重金属进入植物的重要过渡环节,可长期累积污染物。研究表明,植物各器官中树皮对重金属富集能力最强(唐丽清等,2015;蒋高明,1996),且树皮重金属含量与大气中相应元素含量有较高相关性,可指示城市大气重金属污染状况(Demirayak et al,2011;Suzuki et al,2009)。香樟是南京市的高频绿化树种,本文对南京市不同功能区香樟树皮中Cr、Pb、Cu和Zn的含量分布特征及其与叶面颗粒物含量做比较研究,探讨南京市不同功能区重金属污染状况,为城市生态环境监测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

对南京市不同功能区进行布点采样,选取文教区、交通区、工业区、风景区和商业区5种不同功能区,分别记为CEA、TA、IA、SA和CA(表1),采集香樟树皮及其叶面颗粒物。

表 1 采样点位置及周边环境状况

Table 1 Location of sampling sites and surrounding environment

| 功能区 Functional area | 周边环境状况 Sampling sites and surrounding environment |
|---|---|
| 交通区(TA) Traffic area | 新庄是南京市交通枢纽中心,由汽车带来的粉尘污染较为严重。该采样区分为新庄广场、南京火车站和龙蟠路3个采样点。 Xinzhuang is the hub of Nanjing transportation, and the dust pollution caused by automobile is serious. The sample plot is divided into three sampling sites: Xinzhuang Square, Nanjing Railway Station and Longpan Road. |
| 文教区(CEA) Cultural and educational area | 仙林大学城拥有多所高校,附近有居民区。选取南京师范大学、南京邮电大学和南京财经大学作为采样点。 Xianlin University City has many universities, a nearby residential area. Nanjing Normal University, Nanjing University of Posts and Telecommunications and Nanjing University of Finances and Economics are selected as sampling site. |
| 工业区(IA) Industrial area | 栖霞化工区为南京市的老工业区,附近有南京热电厂、有机化工原料公司、南京电气厂等污染企业,环境污染较重。采样点为南京热电厂、南京电气厂、南京化工厂。 Qixia chemical industry zone is the old industrial district of Nanjing. There are polluting enterprises such as Nanjing Thermal Power Plant, Organic Chemical Raw Material Company and Nanjing Electric Factory nearby. The environmental pollution is serious. The sampling sites are Nanjing Thermal Power Plant, Nanjing Electric Factory and Nanjing Chemical Plant. |
| 风景区(SA) Scenic area | 紫金山位于南京东郊,植被茂盛;中山陵环境优美,入口处车流量较大,游客流量也较大,将紫金山、中山陵和明孝陵设为采样点。 Zijin Mountain is located in the eastern suburbs of Nanjing. Its vegetation is lush. The environment of Dr. Sun Yat-sen's Mausoleum is beautiful. The traffic flow at the entrance is larger, and the flow of tourists is also large. Zijin Mountain, Dr. Sun Yat-sen's Mausoleum and Ming Xiaoling Mausoleum are set as sampling site. |
| 商业区(CA) Commercial area | 新街口地处南京市中心,处于四条马路的相交处,该区为中心城区,人类活动复杂,车流量较大,大气粉尘污染较严重。该采样区分为明瓦廊、洪武路和中山路3个采样点。 Xinjiekou, located in the center of Nanjing, is located at the intersection of four roads. This area is the city center. The human activities are complicated, the traffic is large, and the air dust pollution is serious. The sample plot is divided into three sampling sites: Mingwa Gallery, Hongwu Road and Zhongshan Road. |

1.2 采样方法

样品采集选择 2015 年 1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)和 11 月(秋季),雨后一周、晴朗无风天气。每个功能区设置 3 个采样点作为重复,每个采样点选取 3 棵胸径 15~22 cm 具代表性的香樟树。在距地面 1.3~1.5 m 处,四周多部位采集树皮样品,用去离子水洗涤,105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘至恒重,研磨过 100 目筛备用(钟闹楨等, 2007)。采集树冠外围不同高度、不同方向叶片 60~80 片,经去离子水冲洗,冲洗液用微孔滤膜(0.45 μm)抽滤,烘干后得到叶面颗粒物干样。

1.3 样品测定

称取 0.500 0 g 树皮样品于 50 mL 锥形瓶中,配以弯颈漏斗。加入硝酸和高氯酸混合酸 10 mL,煮沸至溶液澄清,白烟冒后加入 2 mL 硝酸溶液,温热溶解残渣,冷却后定容至 25 mL(刘雷等, 2008),同时制备空白样品。

称取 0.200 0 g 颗粒物样品放置 50 mL 聚四氟乙烯坩埚内,加 2~3 滴去离子水润湿,加 10 mL 浓盐酸,置于电热板上加热,待样品初步分解,依次加入 5 mL 浓硝酸、5 mL 氢氟酸和 5 mL 高氯酸,用 0.2% 稀硝酸定容至 25 mL 待测(查燕等, 2016),同时制备空白样品。

用 ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪测定树皮及叶面颗粒物中重金属 Cr、Pb、Cu 和 Zn 含量。

1.4 数据处理

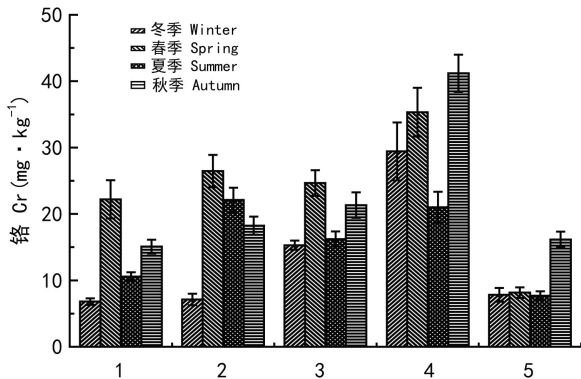
本研究运用 Origin 8.6 处理图表,SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同功能区香樟树皮中重金属含量分布特征

香樟树皮中 Cr 元素含量在各功能区的分布具有一定差异,且随季节变化(图 1)。图 1 结果表明,

不同功能区树皮 Cr 含量呈现为商业区 ($31.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 文教区 > 交通区 > 工业区 > 风景区 ($9.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。冬季工业区 Cr 含量较低,为 $6.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 商业区最高,为 $29.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与其他 4 个功能区呈极显著差异 ($P < 0.01$)。春季工业区、交通区和文教区树皮中 Cr 元素含量相近,商业区最高 ($35.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),风景区最低 ($8.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。夏季各功能区 Cr 元素含量均有所下降,工业区降幅显著,约为春季的 0.5 倍;工业区树皮 Cr 含量与风景区呈显著差异 ($P < 0.05$),与其他 3 个功能区具极显著差异 ($P < 0.01$)。秋季各功能区 Cr 含量范围为 $15.1 \sim 41.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,商业区含量最高;交通区含量略有下降,其他功能区树皮 Cr 含量均呈上升趋势,商业区与风景区升幅达到一倍。



注: 1. 工业区; 2. 交通区; 3. 文教区;
4. 商业区; 5. 风景区。下同。

Note: 1. Industrial area (IA); 2. Traffic area (TA); 3. Cultural and educational area (CEA); 4. Commercial area (CA);

5. Scenic area (SA). The same below.

图 1 南京市香樟树皮铬含量变化

Fig. 1 Contents of Cr in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing

不同功能区 Pb 含量为商业区 > 文教区 > 工业区 > 风景区 > 交通区 (图 2)。图 2 结果表明,冬季文教区 Pb 含量最高 ($71.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),为交通区 2.24 倍;文教区与风景区、商业区与交通区差异显著 ($P < 0.05$)。春季文教区 Pb 含量降为冬季的 0.61 倍,其他功能区无显著变化;交通区和商业区 Pb 含量具极显著差异 ($P < 0.01$)。夏季各功能区

Pb 含量范围为 $40.60 \sim 62.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,商业区含量最高,交通区和风景区 Pb 含量相近;风景区含量略有降低,其他功能区呈上升趋势。秋季商业区含量最高 ($74.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),交通区含量最低 ($46.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),交通区与文教区具显著差异 ($P < 0.05$);各功能区 Pb 含量呈上升趋势。

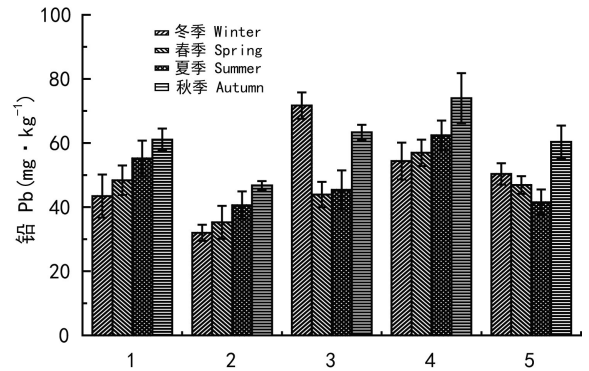


图 2 南京市香樟树皮铅含量变化

Fig. 2 Contents of Pb in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing

各功能区香樟树皮 Cu 含量依次为工业区 ($61.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 风景区 > 商业区 > 文教区 > 交通区 ($36.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);除夏季外,其他季节均表现为工业区树皮 Cu 含量最高,交通区最低 (图 3)。图 3 结果表明,冬季工业区 Cu 含量最高 ($51.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与其他 4 个功能区呈极显著差异 ($P < 0.01$);文教区和风景区树皮 Cu 元素含量相近。春季交通区 Cu 含量最低 ($33.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),工业区与其他 4 个功能区具极显著差异 ($P < 0.01$)。夏季 Cu 含量范围为 $31.88 \sim 44.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各功能区含量无显著差异;商业区含量略有上升,其他各功能区 Cu 含量均呈下降趋势。秋季各功能区树皮 Cu 含量均呈上升趋势,工业区含量约为夏季 2 倍;工业区最高 ($84.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),交通区最低 ($42.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

各功能区树皮 Zn 含量为商业区 > 文教区 > 工业区 > 交通区 > 风景区 (图 4)。图 4 结果表明,冬季商业区 Zn 含量最高 ($198.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),风景区最低 ($135.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),工业区、文教区和交通区

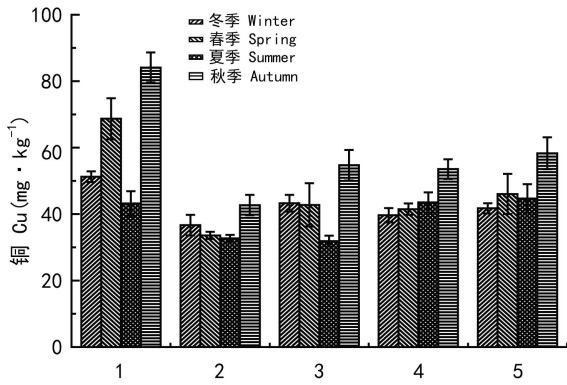


图3 南京市香樟树皮铜含量变化

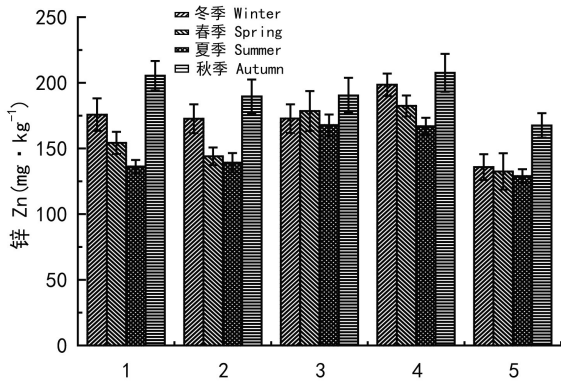
Fig. 3 Contents of Cu in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing

图4 南京市香樟树皮锌含量变化

Fig. 4 Contents of Zn in barks of *Cinnamomum camphora* in Nanjing

含量相近。春季文教区 Zn 含量略有上升,其他功能区呈下降趋势;交通区与文教区、商业区与交通区具显著差异 ($P < 0.05$),风景区与文教区、商业区呈极显著差异 ($P < 0.01$)。夏季各功能区 Zn 含量呈下降趋势,风景区含量最低 ($128.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),文教区和风景区具极显著差异 ($P < 0.01$)。秋季 Zn 含量为 $167.61 \sim 207.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各功能区含量均呈上升趋势,工业区含量为夏季 1.51 倍,涨幅显著;各功能区 Zn 含量无显著差异。

2.2 树皮和叶面颗粒物重金属含量比较

各功能区香樟叶面颗粒物 Cr、Cu、Pb 和 Zn 4

种重金属含量如图 5。图 5 结果表明,叶面颗粒物重金属含量均大于树皮重金属含量,风景区叶面颗粒物重金属含量最低。叶面颗粒物 Cr 含量是树皮 Cr 含量的 $3.19 \sim 7.24$ 倍,且交通区 ($101.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) >文教区 ≈ 商业区 >风景区 >工业区 ($72.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。叶面颗粒物 Cu 含量工业区最高 ($165.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),风景区最低 ($87.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与树皮 Cu 含量呈相同趋势。叶面颗粒物 Pb 含量呈现为商业区 ($155.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) >交通区 >工业区 >文教区 >风景区 ($101.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),树皮 Pb 含量商业区和文教区较高,商业区叶面颗粒物 Pb 含量是树皮 Pb 含量的 2.29 倍。工业区叶面颗粒物 Zn 含量最高 ($429.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),商业区次之 ($429.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),风景区含量最低 ($293.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),为树皮含量 2.08 倍。

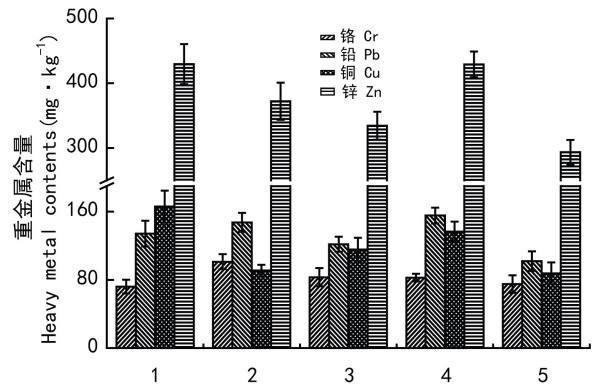


图5 南京市叶面颗粒物重金属含量变化

Fig. 5 Heavy metal contents in the particulate matter on leaf surface in Nanjing

2.3 不同功能区树皮中重金属相关性

Pearson 相关分析显示,工业区与交通区树皮中重金属呈现一定程度的相关性(表 2)。工业区的 Zn 与交通区的 Cu 和 Zn 分别对应相关,表明其可能具有相似的来源;工业区树皮中 Pb 与交通区呈极显著相关,表明交通区与工业区树皮中 Pb 主要来自汽车尾气排放。工业区和文教区树皮中 Cr 呈显著相关,可能主要来源于工业生产、垃圾焚烧等外源输入(表 3)。工业区与文教区树皮中 Cu-Zn、Zn-Cu 具有显著相关性,说明这两种元素有相

表 2 工业区和交通区树皮重金属元素的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson's correlation of elements in barks between industrial area and traffic area

| 元素 Element | Cr _b | Cu _b | Pb _b | Zn _b |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cr _a | 0.817 | -0.061 | 0.173 | -0.246 |
| Cu _a | 0.225 | 0.754 | 0.540 | 0.612 |
| Pb _a | 0.406 | 0.505 | 0.995 ** | 0.271 |
| Zn _a | -0.435 | 0.976 * | 0.410 | 0.977 * |

注: Cr_a 和 Cr_b 下标 a、b 分别表示工业区和交通区。* 表示 $P < 0.05$ 显著相关, ** 表示 $P < 0.01$ 显著相关。下同。

Note: Subscript a and b of Cr_a and Cr_b subscript indicate industrial and transportation areas respectively. * indicates significant differences ($P < 0.05$), ** indicates significant differences ($P < 0.01$). The same below.

表 3 工业区和文教区树皮重金属元素的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson's correlation of elements in barks between industrial area and educational area

| 元素 Element | Cr _c | Cu _c | Pb _c | Zn _c |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cr _a | 0.978 * | 0.255 | -0.617 | 0.464 |
| Cu _a | 0.751 | 0.907 | 0.151 | 0.984 * |
| Pb _a | 0.229 | 0.320 | -0.184 | 0.546 |
| Zn _a | 0.174 | 0.957 * | 0.739 | 0.852 |

注: Cr_a 和 Cr_c 下标 a、c 分别表示工业区和文教区。

Note: Subscript a and c of Cr_a and Cr_c indicate industrial and transportation areas respectively.

似的来源,可能来自于交通排放(戴斯迪等, 2013), Cu 主要来自于刹车片的磨损和机动车尾气的排放, Zn 主要来自橡胶轮胎的磨损(Thorpe & Harrison, 2008)。

3 讨论

3.1 树皮中重金属含量分布特征分析

对南京市香樟树皮中重金属含量的研究分析表明,树皮中 Cr、Pb、Cu 和 Zn 含量具时空分布差异特征。从总体来看,各功能区重金属含量表现为商业区>文教区>工业区>交通区>风景区,重金属在各季节的含量变化为秋季>冬季>春季>夏季。文教区一般被认为是城市环境较为清洁的区域,

但是在本研究中文教区重金属含量仅次于商业区,这可能与区域的复杂活动相关,人流量和车流量较大,刹车频繁、轮胎磨损严重,从而产生大量的重金属污染(郭广慧等, 2008),很大程度上反映了机动车辆等人为因素污染的影响(Elhasan et al, 2003);此外该区域有大量建筑物在施工中,重金属材料的使用也可能导致重金属负荷较重。另一方面,文教区是新城区,植物多为移植栽种,树皮中重金属含量较高可能与移植地区的大气重金属污染状况有关。随着无铅汽油的推行,交通排放对 Pb 的贡献有所减少,交通区重金属含量并不处于较高水平(张丹龙等, 2016)。不同季节的气候条件存在差异,大风及降雨对大气的干、湿沉降影响重大,而植物吸收的重金属部分来源于大气

环境中重金属的干湿沉降(王荣芬等, 2014)。因此树皮中重金属在各季节的含量有所不同。

3.2 树皮和叶面颗粒物中重金属含量差异分析

本研究结果表明,叶面颗粒物重金属含量大于树皮重金属含量,各功能区叶面颗粒物重金属含量依次为商业区>工业区>交通区>文教区>风景区。吸收重金属的方式不同,树皮和叶面颗粒物重金属含量存在显著差异(余岑涔等, 2016)。树皮长期暴露在空气中,吸收的重金属主要来源于根系输送以及与外界环境中重金属颗粒物接触、附着吸收(王爱霞, 2010)。树皮木栓组织细胞死亡后,会在有生命的组织上形成一层非原生质亲脂性表层,该表层可通过离子吸附、交换等过程吸收空气中的重金属元素,并累积在树皮中。叶面颗粒物以截留地面扬起和空气漂浮颗粒物的方式积累,是空气中的颗粒物通过重力、降水、吸附等作用附着于植物叶片表面(戴斯迪等, 2013),植物叶片通常以滞留、附着和粘附三种方式滞留颗粒物(郭伟等, 2010)。这部分颗粒物粒径较细,可能从远距离输送来,因而其反映的污染源范围广。从采样点的环境与重金属含量比较发现,工业区 Cr、Cu 污染严重,可能与该区域内化工生产活动有关;商业区人类活动频繁,汽车轮胎磨损和排放废气,造成 Pb、Zn 和 Cr 元素积累(王会霞等, 2012)。

4 结论

(1)不同功能区树皮中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量有明显的时空分布差异。从总体来看,各功能区重金属含量表现为商业区>文教区 \approx 工业区>交通区>风景区,重金属在各季节的含量顺序为秋季>冬季>春季>夏季。(2)叶面颗粒物中重金属含量大于树皮重金属含量,且重金属含量商业区最高(200.89 mg \cdot kg⁻¹),风景区最低(139.51 mg \cdot kg⁻¹)。树皮和叶面颗粒物的重金属含量存在差异,这可能与吸收重金属的方式有关。(3)对不同功能区树皮中重金属的相关性分析发现,工业区的 Zn 与交通区的 Cu 和 Zn 分别对应相关,工业区和文教区树皮中 Cu-Zn、Zn-Cu 具有显著相关性,

表明 Cu 和 Zn 有相似的来源;工业区和交通区树皮中 Pb 显著相关,主要来自汽车尾气排放。

参考文献:

- AL-ALAWI MM, BATARSEH MI, CARRERAS H, et al, 2007. Aleppo pine bark as a biomonitor of atmospheric pollution in the arid environment of Jordan [J]. Clean-Soil Air Water, 35(5):438-443.
- BERLIZOV AN, BLUM OB, FILBY RH, et al, 2007. Testing applicability of black poplar (*Populus nigra* L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions [J]. Sci Total Environ, 372(2-3):693-706.
- DAI SD, MA KM, BAO L, et al, 2013. Distribution of particle matters and contamination of heavy metals in the foliar dust of *Sophora japonica* in parks and their neighboring roads in Beijing [J]. Acta Sci Circumst, 33(1):154-162. [戴斯迪, 马克明, 宝乐, 等, 2013. 北京城区公园及其邻近道路国槐叶面尘分布与重金属污染特征 [J]. 环境科学学报, 33(1):154-162.]
- DEMIRAYAK A, KUTBAY, HG, KILIC D, et al, 2011. Heavy metal accumulation in some natural and exotic plants in Samsun City [J]. Ekoloji, 20(79):1-11.
- ELHASAN T, ALOMARI H, JIRIES A, et al, 2003. Cypress tree (*Cupressus semervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan [J]. Environ Int, 28(6):513-519.
- GRATANI L, CRESCENTE MF, VARONE L, 2008. Long-term monitoring of metal pollution by urban trees. [J]. Atmos Environ, 42(35):8273-8277.
- GUO GH, LEI M, CHEN TB, et al, 2008. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils [J]. Acta Sci Circum, 28(10):1937-1945. [郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等, 2008. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响 [J]. 环境科学学报, 28(10):1937-1945.]
- GUO W, SHEN-TU YJ, ZHENG SQ, et al, 2010. Research advances on mechanisms and rules of dust retention of the urban green areas [J]. Ecol Environ Sci, 26(6):1465-1470. [郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等, 2010. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展 [J]. 生态环境学报, 26(6):1465-1470.]
- JIANG GM, 1996. PCA analysis on sulphur and heavy metals contents in different parts of woody species in Chengde of North China [J]. J Appl Ecol, 7(3):310-314. [蒋高明, 1996. 承德木本植物不同部位 S 及重金属含量特征的 PCA 分析 [J]. 应用生态学报, 7(3):310-314.]

- LI RZ, ZHOU AJ, TONG F, et al, 2011. Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment[J]. J Environ Sci, 32(9):2661-2668. [李如忠, 周爱佳, 童芳, 等, 2011. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 32(9):2661-2668.]
- LI SD, LI XL, 2000. Study on long-term behavior of heavy metals in soil-plant ecosystem[J]. Acta Sci Circum, 20(1):76-80. [李书鼎, 李雪莲, 2000. 土壤植物系统重金属长期行为的研究[J]. 环境科学学报, 20(1):76-80.]
- LI X, POON CS, LIU PS, 2001. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Appl Geochem, 16(11-12):1361-1368.
- LIU B, LIN KF, ZHAO JH, et al, 2016. Indicating function of different organs of *Cinnamomum camphora* to heavy metals in air[J]. Bull Sci Technol, 32(5):61-67. [刘波, 林匡飞, 赵建华, 等, 2016. 香樟不同器官对空气中重金属的指示作用[J]. 科技通报, 32(5):61-67.]
- LIU CC, XIANG LY, XU R, 2016. Analysis and assessment on trend of heavy metals concentrations and risk in water resource area in Changjiang Estuary [J]. Environ Sci Technol, 39(S1):393-397. [刘材材, 项凌云, 徐韧, 2016. 长江口水源地重金属含量趋势分析及风险评价[J]. 环境科学与技术, 39(S1):393-397.]
- LIU L, FANG YM, WANG SC, et al, 2014. Analysis and assessment of atmospheric pollution based on accumulation characterization of heavy metals in *platanus acerifolia* leaves [J]. J Environ Sci, 35(3):839-846. [刘玲, 方炎明, 王顺昌, 等, 2014. 基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价[J]. 环境科学, 35(3):839-846.]
- LIU L, YANG F, LIU ZG, et al, 2008. Determination of heavy metals in soils and plants with microwave digestion and ICP-AES[J]. Environ Chem, 27(4):511-514. [刘雷, 杨帆, 刘足根, 等, 2008. 微波消解 ICP-AES 法测定土壤及植物中的重金属[J]. 环境化学, 27(4):511-514.]
- LIU YR, ZHU SF, WEI XF, et al, 2016. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. J Environ Sci, 37(6):2322-2328. [刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等, 2016. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 37(6):2322-2328.]
- LU SW, GAO C, YANG XB, et al, 2014. Main greening tree species on soil heavy metal enrichment capability in different contaminated area of Beijing[J]. J NE For Univ, (5):22-26. [鲁绍伟, 高琛, 杨新兵, 等, 2014. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. 东北林业大学学报, (5):22-26.]
- MANNING WJ, GODZIK B, 2004. Bioindicator plants for ambient ozone in Central and Eastern Europe. [J]. Environ Poll, 130(130):33-39.
- ONDER S, DURSUN S, 2006. Air borne heavy metal pollution of *Cedrus libani*, (A. Rich.) in the city centre of Konya (Turkey)[J]. Atmos Environ, 40(6):1122-1133.
- PANG B, 2010. Study on the source apportionment and physico-chemical characteristics of foliar dust and surface dust in urban areas[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 28-30. [庞博, 2010. 城市叶面尘与地面尘理化特性及源解析研究[D]. 南京: 南京林业大学: 28-30.]
- RUSU AM, JONES GC, CHIMONIDES PDJ, et al, 2006. Bio-monitoring using the lichen *Hypogymnia physodes*, and bark samples near Zlatna, Romania immediately following closure of a copper ore-processing plant[J]. Environ Poll, 143(1):81-88.
- SUZUKI K, YABUKI T, ONO Y, 2009. Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan [J]. Environ Monit Assess, 149(149):133-141.
- TANG LQ, QIU EF, HAN YL, et al, 2015. Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height[J]. Acta Ecol Sin, 35(16):5353-5363. [唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 等, 2015. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较[J]. 生态学报, 35(16):5353-5363.]
- THORPE A, HARRISON RM, 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review [J]. Sci Total Environ, 400(1-3):270-282.
- WANG AX, 2010. Mosses and trees as indicators for heavy metal pollution in the atmosphere of Nanjing City, China [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 8-20. [王爱霞, 2010. 南京市空气重金属污染的藓类和树木监测[D]. 南京: 南京林业大学: 18-20.]
- WANG HX, SHI H, LI YY, et al, 2012. Distribution features of particle size and heavy metal elements in foliage-captured dust[J]. J Safe Environ, 12(1):170-174. [王会霞, 石辉, 李秧秧, 等, 2012. 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, (1):172-176.]
- WANG RF, QIU EF, TANG LQ, 2014. Heavy metals distribution in roadside tree trunks under a heavy urban transportation condition[J]. Acta Ecol Sin, 34(15):4212-4222. [王荣芬, 邱尔发, 唐丽清, 2014. 行道树毛白杨树干中重金属元素分布[J]. 生态学报, 34(15):4212-4222.]
- WANG ZW, WANG YW, HOU YY, et al, 2016. Relationship between landscape pattern and spatial variation of heavy metals in aquatic sediments in headwaters area of Yuqiao

- Reservoir[J]. *J Environ Sci*, 37(9):3423-3429. [王祖伟, 王祎玮, 侯迎迎, 等, 2016. 于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系[J]. *环境科学*, 37(9):3423-3429.]
- YU CC, ZHANG YL, YAO H, et al, 2016. Approaches and characteristics of monitoring using plant for the heavy metal pollution of atmosphere[J]. *Poll Contr Technol*, (3):74-77. [余岑涔, 张银龙, 姚欢, 等, 2016. 利用植物监测大气重金属污染途径和特点[J]. *污染防治技术*, (3):74-77.]
- ZHA Y, FENG C, SHI YY, et al, 2016. Contents and distribution characteristics of heavy metals in different environmental media[J]. *Jiangsu Agric Sci*, 44(8):486-489. [查燕, 冯驰, 是怡芸, 等, 2016. 不同环境介质中重金属含量及分布特征[J]. *江苏农业科学*, 44(8):486-489.]
- ZHANG DL, FANG FM, YAO YR, et al, 2016. Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in foliar and surface dust of different functional areas of Huainan City [J]. *Acta Sci Circum*, 36(9):3322-3332. [张丹龙, 方凤满, 姚有如, 等, 2016. 淮南市不同功能区叶面尘和地表灰尘中重金属分布特征、来源及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 36(9):3322-3332.]
- ZHONG WZ, LI MS, TANG WJ, et al, 2007. Comparison of two sample pretreatment methods for the determination of heavy metals in mineland plants[J]. *J Analy Sci*, 23(4):467-470. [钟闰桢, 李明顺, 唐文杰, 等, 2007. 矿区植物重金属元素测定的两种前处理方法比较[J]. *分析科学学报*, 23(4):467-470.]