

淮南矿区大气及二球悬铃木叶片中 重金属含量及其相关性分析

刘玲^{1,2}, 方炎明^{1,①}, 王顺昌², 谢影², 汪承润²

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 淮南师范学院生命科学系, 安徽 淮南 232001)

摘要: 对淮南市污染区(矿区)和对照区(相对清洁区)空气中 TSP、PM₁₀₋₁₀₀、PM₅₋₁₀、PM_{2.5-5} 和 PM_{2.5} 的日均质量浓度进行了测定,并对 TSP 中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的质量浓度和二球悬铃木(*Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.)叶片中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量的动态变化进行了分析,同时对二球悬铃木叶片中重金属含量与 TSP 中重金属质量浓度和各类空气颗粒物日均质量浓度的相关性进行了分析。结果表明:在 60 d 采样期内,空气颗粒物日均质量浓度和叶片中重金属含量均呈波动的变化趋势,其中污染区空气中 TSP 和 PM_{2.5} 的日均质量浓度均显著高于对照区,污染区 PM₁₀₋₁₀₀、PM₅₋₁₀ 和 PM_{2.5-5} 日均质量浓度总体上低于对照区;污染区空气 TSP 中 6 种重金属元素的质量浓度均高于对照区,污染区二球悬铃木叶片中的 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量均高于对照区但 Pb 含量低于对照区。相关性分析结果表明:污染区二球悬铃木叶片中重金属含量与空气 TSP 中重金属质量浓度多数呈正相关,叶片中重金属含量与空气中 PM_{2.5} 日均质量浓度也均呈正相关,其中叶片中 Cd 含量与 PM_{2.5} 日均质量浓度的相关性达显著水平。研究结果表明:在淮南矿区,可将二球悬铃木叶片中的重金属含量作为空气 PM_{2.5} 污染状况的监测指标。

关键词: 二球悬铃木; 叶片; 重金属含量; 空气颗粒物; 相关性; 淮南矿区

中图分类号: S972.37; X173; X831 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)01-0085-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.01.13

Analyses on heavy metal content in atmosphere and *Platanus × acerifolia* leaf at Huainan mining area and their correlation LIU Ling^{1,2}, FANG Yanming^{1,①}, WANG Shunchang², XIE Ying², WANG Chengrun² (1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Department of Life Science, Huainan Normal University, Huainan 232001, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, **23**(1): 85-92

Abstract: Daily average mass concentrations of TSP, PM₁₀₋₁₀₀, PM₅₋₁₀, PM_{2.5-5} and PM_{2.5} in atmosphere at polluted area (mining area) and control area (relative cleaning area) in Huainan City were determined, mass concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in TSP and dynamic changes of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in leaf of *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd. were analyzed, and correlations of heavy metal content in *P. × acerifolia* leaf with mass concentration of heavy metals in TSP and daily average mass concentration of different atmosphere particulate matters were analyzed. The results show that daily average mass concentration of atmosphere particulate matter and heavy metal content in leaf of *P. × acerifolia* all appear fluctuation changing trends during sampling period of 60 d, in which, daily average mass concentrations of TSP and PM_{2.5} in atmosphere at polluted area are significantly higher than those at control area, daily average mass concentrations of PM₁₀₋₁₀₀, PM₅₋₁₀ and PM_{2.5-5} at polluted area are totally lower than those at control area. Mass concentrations of six heavy metal elements in atmosphere TSP at polluted area all are higher than those at control area, and contents of Cd, Cr, Cu, Ni and Zn in *P. × acerifolia* leaf at polluted area all are higher than those at control area, but Pb content is lower than that at control area. The result of correlation analysis shows that at polluted area, correlations between heavy metal content in *P. × acerifolia* leaf and mass concentration of heavy metals in atmosphere TSP

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 安徽高校省级科学研究项目(KJ2013Z301); 淮南师范学院科研项目(2012LK21)

作者简介: 刘玲(1967—),女,安徽寿县人,博士研究生,讲师,主要研究方向为森林生态学。

①通信作者 E-mail: jwu@njfu.edu.cn

are mostly positive, and also, correlations between heavy metal content in *P. × acerifolia* leaf and daily average mass concentration of $PM_{2.5}$ in atmosphere all are positive, in which, correlation between Cd content in leaf and daily average mass concentration of $PM_{2.5}$ is significant. It is suggested that heavy metal content in *P. × acerifolia* leaf can be used as a monitoring index of pollution status of atmosphere $PM_{2.5}$ in Huainan mining area.

Key words: *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.; leaf; heavy metal content; atmosphere particulate matter; correlation; Huainan mining area

空气颗粒物 (particulate matter, PM) 是指悬浮在空气中微小固体和液滴的混合物, 包括降尘和空气动力学当量小于 $100\ \mu\text{m}$ 的总悬浮颗粒 (total suspended particle, TSP), PM_{10-100} 、 PM_{5-10} 、 $PM_{2.5-5}$ 和 $PM_{2.5}$ 是 TSP 中不同的空气动力学等效直径颗粒物^[1], 其中的 $PM_{2.5}$ 因粒径小被称作细颗粒^[2]。由于细颗粒容易再悬浮于空气中且保留很长时间^[3-4], 且比表面积大、散射性强, 不仅能够影响全球气候与城市能见度, 还含有重金属^[5]; $PM_{2.5}$ 中含有的毒性物质能够随着人体呼吸进入呼吸系统甚至穿透肺泡进入血液循环系统从而影响人们的身体健康^[6-7], 所以城市空气中细颗粒物和重金属的污染已成为当今世界面临的一个十分突出的环境问题。

近年来, 基于空气悬浮颗粒物质量浓度和化学组成研究城市空气质量已有较多报道^[8-9], 使用滤膜进行空气取样以区分颗粒源及比较环境地化及气象因子对颗粒物磁性的影响已成为一种主动方法而被大量利用^[10-12]; 沉积在地表之上平整表面 (路边灌木、墙顶和窗边) 的灰尘也可用于研究交通与污染颗粒物磁性的关系^[13]。由于经济能力影响和连续性取样可能被中断, 利用主动方法监测环境污染在一些地方受到限制。然而, 大气颗粒普遍具有磁性^[14-15], 植物代谢不仅能产生铁蛋白, 树叶和树皮还可以吸附和聚集污染的磁性颗粒^[16]; 加之树木总叶表面积通常为植物本身占地面积的 20 倍以上, 截尘量大^[17]; 叶片表面多粗糙或有表皮毛, 能够有效滞留大气颗粒物^[18] 并累积颗粒物中的重金属^[19-20]。因此, 可根据同一树种相同时间在不同地区重金属的累积量估计样区空气污染状况, 分析和鉴别环境的污染程度, 进行环境质量评价和污染等级确定等^[21]。在一些国家已利用树木地上器官对污染物的累积值评价大气环境, 并利用树木叶片研究空气颗粒物特征及颗粒源^[22-24]。

二球悬铃木 [*Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.] 是广泛使用的行道树, 其幼叶有细小表皮毛, 成叶上、

下表皮粗糙, 可吸附灰尘, 在淮南市城乡已广泛栽植。有关二球悬铃木叶片对重金属与空气颗粒物以及悬浮颗粒 (非叶片吸附的) 富集和积累效应的相关研究报道不多。为此, 作者以淮南市广泛栽植的二球悬铃木为研究对象, 对淮南矿区污染区及对照区空气颗粒物和二球悬铃木叶片中重金属含量的动态变化及其相关性进行比较分析, 探讨二球悬铃木叶片对空气颗粒物以及重金属污染物的吸收效应, 以为空气污染监测树种的选择以及淮南市空气环境的综合评价提供理论参考。

1 样点选择和研究方法

1.1 采样点的选择

选择安徽淮南潘集区实验中学 (地理坐标为北纬 $32^{\circ}46'55''$ 、东经 $116^{\circ}48'18''$) 为污染区采样点, 周边有 2 个煤矿、1 个电厂和 1 条交通主干道, 分别位于采样点的西北、正北、东南和北方, 距该样点 3.0、1.0、3.5 和 1.0 km。选择淮南师范学院泉山校区 (地理坐标为北纬 $32^{\circ}36'47''$ 、东经 $116^{\circ}57'35''$) 为对照区采样点, 该样点地处市郊, 周边 4 km 内无煤矿和电厂; 其南面依山傍水, 北面 1 km 外有 1 条东西向交通主干道, 机动车辆较多, 白天平均每分钟约 45 辆。

1.2 方法

1.2.1 空气样品采集及处理 每个采样点各设置 KC-120H 型智能中流量 TSP 采样器 (青岛崂山电子仪器总厂有限公司) 1 台, 置于距地面 12 m 的楼顶, 4 种粒径 (PM_{10-100} 、 PM_{5-10} 、 $PM_{2.5-5}$ 和 $PM_{2.5}$) 空气颗粒物可由同一台采样器同时采集; 当空气流过切割器时, PM_{10-100} 、 PM_{5-10} 和 $PM_{2.5-5}$ 颗粒物留在 3 个环形滤膜 (外径 72 mm、孔径 $0.8\ \mu\text{m}$, 青岛崂山电子仪器总厂有限公司) 上, 而 $PM_{2.5}$ 颗粒物被圆形滤膜 (直径 90 mm、孔径 $0.8\ \mu\text{m}$, 青岛崂山电子仪器总厂有限公司) 吸附。2 种滤膜在使用前一天进行标记并于温度 $25\ ^{\circ}\text{C}$ 、空气相对湿度 40% 条件下处理 24 h, 然后用

AEY-210 分析天平(湘仪天平仪器设备有限公司,精确度 0.000 1 g)称取质量;自 2012 年 4 月 23 日开始采样,每天的采样时段从当日 8:00 至次日 8:00,遇雨停止采样,天晴后采样天数顺延,共采集 PM₁₀₋₁₀₀、PM₅₋₁₀、PM_{2.5-5} 和 PM_{2.5} 颗粒物样本各 60 个,采样滤膜用铝箔纸包裹后带回实验室,分析每天的空气颗粒物质量浓度;以 10 d 为 1 个时间段,计算每个时间段内各空气颗粒物的日均质量浓度。

1.2.2 叶片样品采集及处理 在空气颗粒物采样点东、南、西、北 4 个方向(距空气颗粒物采样点 0.5 km 之内)各选择 10 株胸径相似(30 cm 左右)的二球悬铃木,于植株的东、南、西、北 4 个方向的当年生枝条上采摘大小基本一致的健康叶片各 4 个,重复 3 次,每次采集的叶片装入同一自封袋,带回实验室进行分析测定。自 2012 年 4 月 23 日(二球悬铃木叶片展开 10 d)开始,每隔 10 d(无雨天)采集 1 次,每个采样点共采样 6 次;二球悬铃木叶片采样点与空气颗粒物采样保持一致。

采回的叶片用清水冲洗去尘,用 1 mol · L⁻¹ HCl 溶液浸泡 15 min,再用去离子水润洗 3~4 次,于温度 75 °C 条件下处理 24 h,干燥至恒质量后取出,冷却后用陶瓷研钵研磨成粉,装入自封袋保存于干燥器中,待测。

1.2.3 空气颗粒物日均质量浓度测定 采样完毕后将吸附滤膜小心取出,于温度 25 °C、空气相对湿度 40% 条件下处理 24 h,然后称取质量,采样前后纤维素滤膜的质量差即为该滤膜吸附各类颗粒物的质量;TSP 质量则为 PM₁₀₋₁₀₀、PM₅₋₁₀、PM_{2.5-5} 和 PM_{2.5} 颗粒物的质量之和;颗粒物质量与每日采样体积之比即为该颗粒物的日均质量浓度。称取颗粒物质量后,吸附颗粒物的纤维素滤膜装入自封袋中,于 -20 °C 保存、备用。

1.2.4 重金属含量分析 称取叶片粉末 0.5 g,放入预先用 1 mol · L⁻¹ HCl 溶液及去离子水清洗的烧杯(空白对照不放入叶片粉末^[25])中,加入 10 mL 硝酸-2 mL 高氯酸混合液,浸泡过夜;次日加热消煮,温度由 150 °C 逐渐升到 190 °C,至烧杯中液体近蒸干;冷却后加入 0.5 mL 体积分数 0.1% HNO₃ 溶液和 2.5 mL 去离子水浸润,并用去离子水定容至 10 mL,待测。将每张空气采样滤膜一分为二(视为 2 次重复),分别剪碎后消解,消解过程如上。

采用 OPTIMA 4300DV 型电感耦合等离子体发射

光谱仪(ICP-OES)(美国 PerkinElmer 公司)测定叶片及滤膜消煮液中铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)和锌(Zn)含量,标准样为 GBW10020(GBW-11 柑橘叶,纯度 98%,北京兴林盛业科技发展中心),样品回收率大于 90.2%。

1.3 数据分析

应用 SPSS 13.0 统计分析软件进行数据处理;采用 ANOVA 单因素方差分析组间差异;采用 Spearman 法进行相关性分析($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 污染区和对照区各类空气颗粒物日均质量浓度及空气 TSP 中重金属质量浓度的比较

淮南矿区污染区和对照区各类空气颗粒物日均质量浓度的动态变化见表 1。由表 1 可见:在 6 个采样时间段污染区 TSP 和 PM_{2.5} 的日均质量浓度均高于对照区,除第 1 个时间段(1~10 d)采集的样品外,采样期内污染区 PM_{2.5} 日均质量浓度都超过对照区的 2 倍以上,而对照区 PM₁₀₋₁₀₀、PM₅₋₁₀ 和 PM_{2.5-5} 日均质量浓度大部分高于污染区。表明煤炭开采、运输和燃烧会给空气带来细颗粒物污染,而对照区空气颗粒物中的主要成分是粗颗粒。

仅仅根据 PM 的浓度不能反映颗粒物的毒性,其化学组成也是重要的判断指标^[26]。不同采样区空气 TSP 中重金属质量浓度的比较结果见表 2。由表 2 可知:污染区和对照区 TSP 中 Pb 和 Zn 质量浓度远超过 10 ng · m⁻³,且远高于 Ni、Cd、Cr 和 Cu 的质量浓度。污染区和对照区 6 种重金属的质量浓度由高到低的顺序一致,均依次排序为 Zn、Pb、Ni、Cd、Cr、Cu。污染区 TSP 中的 Cd、Cr、Cu 和 Zn 的质量浓度均高于对照区,且 Cd、Cu 和 Zn 的质量浓度间存在显著差异;2 个采样区 TSP 中 Ni 质量浓度几乎相同;对照区 TSP 中 Pb 质量浓度高于污染区。

上述研究结果表明:Pb 和 Zn 在淮南矿区空气 TSP 中质量浓度较高。虽然对照区周边没有煤矿、环境较污染区清洁,但是由于对照区位于市郊,来往车辆较多、餐饮业发展很快,人为排放的烟尘可能高于污染区,所以空气中的 Pb 含量较高。

2.2 污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属含量的动态变化

淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重

表1 淮南矿区污染区和对照区各类空气颗粒物日均质量浓度的动态变化($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 1 Dynamic change of daily average mass concentration of different atmosphere particulate matters at polluted area and control area in Huainan mining area ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

采样区 Sampling area	采样时间段/d Sampling time period	各类空气颗粒物的日均质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Daily average mass concentration of different atmosphere particulate matters				
		TSP	PM ₁₀₋₁₀₀	PM ₅₋₁₀	PM _{2.5-5}	PM _{2.5}
污染区 Polluted area	1-10	189±31a	25±5a	32±2a	57±7a	75±2a
对照区 Control area	1-10	162±12b	11±3b	40±5a	57±8a	54±1b
污染区 Polluted area	11-20	353±28a	11±1b	8±5b	34±5a	284±22a
对照区 Control area	11-20	171±20b	41±3a	34±5a	46±11a	46±6b
污染区 Polluted area	21-30	518±67a	10±2b	24±3b	68±11a	420±19a
对照区 Control area	21-30	241±23b	33±7a	63±14a	78±6a	69±7b
污染区 Polluted area	31-40	333±19a	4±1b	15±4b	39±3a	275±25a
对照区 Control area	31-40	181±21b	33±7a	49±3a	54±11a	44±3b
污染区 Polluted area	41-50	476±42a	1±1b	12±3b	55±6b	408±71a
对照区 Control area	41-50	234±35b	32±4a	56±5a	78±18a	68±10b
污染区 Polluted area	51-60	852±89a	115±17a	98±10a	152±9b	487±56a
对照区 Control area	51-60	615±52b	73±6b	112±21a	195±8a	236±30b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一采样时间段污染区与对照区差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$) between polluted area and control area during the same sampling time period.

表2 淮南矿区污染区和对照区空气 TSP 中重金属元素质量浓度比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 Comparison of mass concentration of heavy metal elements in atmosphere TSP at polluted area and control area in Huainan mining area ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

采样区 Sampling area	不同元素的质量浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ Mass concentration of different elements					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
污染区 Polluted area	9.8±4.4a	6.9±6.8a	6.1±5.7a	11.8±2.8a	81.2±14.6a	302.2±48.9a
对照区 Control area	6.6±3.7b	5.8±3.5a	3.1±1.6b	11.6±4.3a	86.6±26.8a	172.2±40.6b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

金属含量的动态变化见表3。由表3可知:污染区和对照区二球悬铃木叶片中Cd含量的变化趋势相似,在前50d叶片中Cd含量持续上升,在第50天达到峰值(分别为0.14和0.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),然后下降。污染区叶片中Cr、Cu和Ni含量具有相同的变化趋势,在叶片生长幼期(叶展开的第20天)达到第1个峰值,然后下降,在第40天出现第2个峰值,分别是2.72、4.78和0.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而对照区叶片中Cr、Cu和Ni的含量先逐渐增加然后降低。污染区和对照区叶片中Zn含量呈先增加再降低的趋势,在第40天达到峰值。污染区叶片中Pb含量呈先增加后降低的趋势,在第40天达到峰值;而对照区叶片中Pb含量的变化趋势与污染区叶片中Cr、Cu和Ni含量的变化趋势相似。

此外,在同一采样时间,污染区二球悬铃木叶片中重金属含量(除Pb外)均高于对照区。二球悬铃木叶片在生长过程中累积重金属,使叶片中重金属含量

均高于初始含量。因此,二球悬铃木叶片中重金属含量的变化可作为监测不同区域空气重金属污染的指标。

2.3 污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属含量与空气TSP中重金属质量浓度的相关性分析

淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属含量与空气TSP中重金属质量浓度的相关系数见表4。

由表4可知:在污染区,二球悬铃木叶片中Pb含量与空气TSP中Cu和Zn的质量浓度以及总重金属质量浓度呈负相关,而二球悬铃木叶片中其他重金属元素含量与空气TSP中重金属质量浓度均呈正相关。其中,叶片的Cr、Cd和Ni含量与空气TSP的Cr、Cu、Ni和Pb质量浓度的相关性达显著水平,叶片中Cu含量与空气TSP中Cu和Ni质量浓度、叶片中Zn含量与空气TSP中总重金属质量浓度、叶片中总重金属含量与空气TSP中Cu和Ni质量浓度以及总重金属

表 3 淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属元素含量的动态变化 ($\bar{X} \pm SD$)
 Table 3 Dynamic change of content of heavy metal elements in leaf of *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd. at polluted area and control area in Huainan mining area ($\bar{X} \pm SD$)

元素 Element	采样区 Sampling area	不同采样时间元素含量/mg · kg ⁻¹ Element content at different sampling times					
		第 10 天 The 10th day	第 20 天 The 20th day	第 30 天 The 30th day	第 40 天 The 40th day	第 50 天 The 50th day	第 60 天 The 60th day
Cd	污染区 Polluted area	0.05±0.02	0.11±0.04	0.12±0.04	0.13±0.03	0.14±0.04	0.12±0.02
	对照区 Control area	0.03±0.01	0.04±0.02	0.10±0.02	0.11±0.03	0.11±0.01	0.08±0.01
Cr	污染区 Polluted area	0.13±0.16	1.61±0.65	1.25±1.04	2.72±0.97	1.39±0.50	1.56±1.00
	对照区 Control area	0.05±0.05	0.39±0.33	1.07±0.50	1.08±0.50	1.16±0.75	0.90±0.32
Cu	污染区 Polluted area	1.44±0.40	2.95±0.68	2.53±0.19	4.78±0.81	2.77±0.51	2.17±0.96
	对照区 Control area	1.28±0.51	1.37±0.52	1.65±0.57	2.52±0.39	1.92±0.75	1.74±0.25
Ni	污染区 Polluted area	0.27±0.10	0.42±0.08	0.29±0.22	0.67±0.15	0.35±0.11	0.43±0.12
	对照区 Control area	0.19±0.10	0.29±0.11	0.27±0.13	0.38±0.11	0.31±0.07	0.36±0.14
Pb	污染区 Polluted area	0.23±0.21	0.39±0.27	0.60±0.33	0.87±0.12	0.57±0.21	0.60±0.37
	对照区 Control area	0.28±0.18	1.09±0.30	0.67±0.18	1.27±0.17	0.74±0.30	0.97±0.20
Zn	污染区 Polluted area	4.54±1.43	5.64±0.65	6.23±2.51	12.61±0.82	5.77±2.96	7.10±3.06
	对照区 Control area	2.77±1.29	4.55±1.85	5.03±0.93	7.19±1.88	4.65±0.17	4.77±1.40

表 4 淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属元素含量与空气 TSP 中重金属元素质量浓度的相关系数¹⁾
 Table 4 Correlation coefficient between content of heavy metal elements in leaf of *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd. and mass concentration of heavy metal elements in atmosphere TSP at polluted area and control area in Huainan mining area¹⁾

指标 Index	不同指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes						
	Cd _A	Cr _A	Cu _A	Ni _A	Pb _A	Zn _A	T _A
污染区 Polluted area							
Cd _L	0.531	0.725 *	0.866 *	0.882 *	0.712 *	0.249	0.516
Cr _L	0.602	0.787 *	0.896 *	0.902 *	0.786 *	0.210	0.501
Cu _L	0.405	0.612	0.775 *	0.745 *	0.566	0.395	0.614
Ni _L	0.657	0.785 *	0.849 *	0.825 *	0.784 *	0.193	0.483
Pb _L	0.095	0.321	-0.091	0.059	0.080	-0.422	-0.441
Zn _L	0.238	0.486	0.671	0.651	0.488	0.654	0.834 *
T _L	0.380	0.625	0.788 *	0.774 *	0.606	0.521	0.753 *
对照区 Control area							
Cd _L	0.432	-0.829 *	-0.853 *	0.752 *	0.783 *	-0.845 *	-0.847 *
Cr _L	0.203	-0.786 *	-0.635	0.525	0.455	-0.587	-0.601
Cu _L	-0.107	-0.570	-0.356	0.285	0.267	-0.307	-0.318
Ni _L	0.138	-0.651	-0.422	0.347	0.229	-0.368	-0.383
Pb _L	0.331	-0.653	-0.685	0.741 *	0.725 *	-0.648	-0.640
Zn _L	0.099	-0.499	-0.385	0.432	0.359	-0.330	-0.331
T _L	0.087	-0.594	-0.451	0.444	0.383	-0.398	-0.404

¹⁾ Cd_A, Cr_A, Cu_A, Ni_A, Pb_A, Zn_A, T_A: 分别表示空气 TSP 中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 以及总重金属的质量浓度 Representing to mass concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and total heavy metals in atmosphere TSP, respectively; Cd_L, Cr_L, Cu_L, Ni_L, Pb_L, Zn_L, T_L: 分别表示二球悬铃木叶片中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 以及总重金属的含量 Representing to contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and total heavy metals in leaf of *P. × acerifolia*, respectively. *: P<0.05.

质量浓度的相关性也均达显著水平,相关系数为 0.712~0.902。

由表 4 还可见:对照区二球悬铃木叶片中 Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量以及总重金属含量与空气 TSP 的 Cd、Ni 和 Pb 质量浓度呈正相关,叶片中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量以及总重金属含量与空气 TSP 中

Cr、Cu 和 Zn 质量浓度以及总重金属质量浓度呈负相关,说明对照区二球悬铃木叶片中的 Cd、Ni 和 Pb 来自于空气,而其中的 Cr、Cu 和 Zn 可能来自于地表。其中,叶片中 Cd 含量与空气 TSP 中 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 质量浓度以及总重金属质量浓度的相关性达显著水平,叶片中 Cr 含量与空气 TSP 中 Cr 质量浓度以及

叶片中 Pb 含量与空气 TSP 中 Ni 和 Pb 质量浓度的相关性也达显著水平。

上述分析结果表明:污染区叶片中的重金属多来自大气,不同地区的空气污染程度不同,树木叶片累积的重金属间的相关性有一定差异。

2.4 污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属含量与空气颗粒物日均质量浓度的相关性分析

淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属含量与空气颗粒物日均质量浓度的相关系数见表 5。由表 5 可见:污染区二球悬铃木叶片中 6 种重

金属元素的含量均与空气中 $PM_{2.5}$ 的日均质量浓度呈正相关,其中叶片中 Cd 含量与空气中 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度的相关性达显著水平。对照区叶片中 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的含量以及总重金属含量与空气中 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度呈正相关,叶片中 Cu 和 Zn 含量与空气中 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度呈负相关,但相关性均不显著;叶片中 Cd、Cr 和 Ni 含量与空气中 TSP、 PM_{10-100} 、 PM_{5-10} 和 $PM_{2.5-5}$ 的日均质量浓度均呈正相关,叶片中 Pb 含量只与空气 TSP 日均质量浓度呈负相关,而 Cu 和 Zn 含量主要与空气粗颗粒的日均质量浓度呈正相关。

表 5 淮南矿区污染区和对照区二球悬铃木叶片中重金属元素含量与空气颗粒物日均质量浓度的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficient between content of heavy metal elements in leaf of *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd. and daily average mass concentration of atmosphere particulate matters at polluted area and control area in Huainan mining area¹⁾

指标 Index	不同指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes						
	Cd _L	Cr _L	Cu _L	Ni _L	Pb _L	Zn _L	T _L
污染区 Polluted area							
TSP	0.519	0.223	-0.127	0.022	0.349	0.023	0.041
PM ₁₀₋₁₀₀	-0.061	-0.077	-0.387	-0.010	-0.021	-0.073	-0.142
PM ₅₋₁₀	-0.061	-0.102	-0.397	-0.041	0.030	-0.045	-0.131
PM _{2.5-5}	0.077	-0.100	-0.416	-0.127	0.076	-0.106	-0.169
PM _{2.5}	0.811 *	0.414	0.126	0.077	0.513	0.107	0.188
对照区 Control area							
TSP	0.159	0.282	0.034	0.456	-0.145	0.017	0.086
PM ₁₀₋₁₀₀	0.210	0.384	0.155	0.691	0.099	0.291	0.316
PM ₅₋₁₀	0.306	0.414	0.133	0.487	0.229	0.101	0.185
PM _{2.5-5}	0.171	0.282	0.024	0.411	0.172	-0.025	0.056
PM _{2.5}	0.083	0.201	-0.025	0.397	0.153	-0.055	0.010

¹⁾ TSP, PM₁₀₋₁₀₀, PM₅₋₁₀, PM_{2.5-5}, PM_{2.5}: 分别表示空气中各类颗粒物的日均质量浓度 Representing to daily average mass concentration of different particulate matters in atmosphere, respectively; Cd_L, Cr_L, Cu_L, Ni_L, Pb_L, Zn_L, T_L: 分别表示二球悬铃木叶片中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 以及总重金属的含量 Representing to contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and total heavy metals in leaf of *P. × acerifolia*, respectively. *: $P < 0.05$.

3 讨论和结论

木本植物一般具有较深的直根系,可以吸收土壤中的重金属元素,然而根吸收的重金属元素主要滞留在根部^[27],由于植物的地上部分主要器官是叶片,所以树木叶片是大气污染物的重要吸收器官^[28]。本研究结果表明:在同一时间,污染区二球悬铃木叶片中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量均高于对照区,表明二球悬铃木叶片对重金属的累积与其生长环境的污染程度密切相关。这与前人的研究结果^[29-31]基本一致。

研究结果显示:二球悬铃木叶片中 Zn 和 Cu 的含量较高,而 Cr、Cd、Ni 和 Pb 的含量较低。因为 Cu 是植物代谢过程中一些氧化酶激活的必需元素,而 Zn 是合成分生长素类激素所必需的矿质元素^[32],这 2 种

重金属元素不仅来源于地表,也包含在人为释放的污染物中^[33],因而,树木的不同器官对 Zn 和 Cu 的积累量都较高^[34]。

此外,树木对污染物的积累与自身的生长状况和代谢水平^[35]、影响树木生长的外界环境^[36]和生长季节^[37]等因素有关,其中某种重金属含量的变化会影响植物对其他元素的吸收^[38],空气悬浮颗粒粒径的大小也会影响叶片内元素的分配^[39]。本研究结果表明:污染区二球悬铃木叶片中重金属含量和空气 TSP 中重金属质量浓度的 18 对指标的相关性达显著水平;叶片中 6 种重金属元素含量与空气中 $PM_{2.5}$ 的日均质量浓度均呈正相关。空气污染程度不同,树木叶片积累的重金属元素间的相关性有一定差异;随着污染程度加剧,叶片吸收的重金属元素之间协同效应加

强;二球悬铃木叶片在污染较重的区域重金属累积多,这与前人的研究结果^[40]相似。

在污染区,二球悬铃木叶片由嫩叶生长至成熟叶的过程中,幼叶对重金属元素的累积较多,及时吸收-消减的现象非常明显;而在相对清洁区(对照区),叶片对重金属元素的累积较缓慢,及时吸收-消减的现象没有污染区明显;但是在污染区和对照区20 d后采集的叶片中重金属含量都高于第1次采样(第10天,4月23日)时的测定值,表明二球悬铃木叶片对6种重金属元素均有一定的吸收和累积能力。

淮南矿区污染区空气TSP和PM_{2.5}日均质量浓度及二球悬铃木叶片对6种重金属元素(除Pb外)的累积量均高于相对清洁区(对照区),消减的频率较快;二球悬铃木叶片对6种重金属元素的累积量与大气PM_{2.5}的日均质量浓度均呈正相关。表明空气污染程度在一定范围内,随空气污染程度的加重,二球悬铃木叶片对重金属元素的累积量增加,因此,利用二球悬铃木叶片监测大气中的PM_{2.5}和重金属污染具有可行性。

参考文献:

[1] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:5-10.

[2] 国家环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. GB 3095—2012环境空气质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.

[3] LU X, WANG L, LI L Y, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173: 744-749.

[4] MADRID F, DÍAZ-BARRIENTOS E, MADRID L. Availability and bio-accessibility of metals in the clay fraction of urban soils of Sevilla[J]. Environmental Pollution, 2008, 156: 605-610.

[5] HSU S C, LIU S C, JENG W L, et al. Variations of Cd/Pb and Zn/Pb ratios in Taipei aerosols reflecting long-range transport or local pollution emissions[J]. Science of the Total Environment, 2005, 347: 111-121.

[6] DENG W J, LOUIE P K K, LIU W K, et al. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM_{2.5} at an electronic waste recycling site in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 6945-6955.

[7] BRUNKEKEEF B, HOLGATE S T. Air pollution and health[J]. The Lancet, 2002, 360: 1233-1242.

[8] KUO C Y, CHEN P T, LIN Y C, et al. Factors affecting the concentrations of PM₁₀ in central Taiwan[J]. Chemosphere, 2008, 70: 1273-1279.

[9] OANH N T K, THIANATHIT W, BOND T C, et al. Compositional characterization of PM_{2.5} emitted from in-use diesel vehicles[J].

Atmospheric Environment, 2010, 44: 15-22.

[10] SHU J, DEARING J A, MORSE A P, et al. Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 2615-2625.

[11] MUXWORTHY A R, MATZKA J, DAVILA A F, et al. Magnetic signature of daily sampled urban atmospheric particles[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 4163-4169.

[12] SPASSOV S, EGLI R, HELLER F, et al. Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter[J]. Geophysical Journal International, 2004, 159: 555-564.

[13] MCINTOSH G, GÓMEZ-PACCARD M, OSETE M L. The magnetic properties of particles deposited on *Platanus × hispanica* leaves in Madrid Spain and their temporal and spatial variations[J]. Science of the Total Environment, 2007, 382: 135-146.

[14] HUNT A, JONES J, OLDFIELD F. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin[J]. Science of the Total Environment, 1984, 33: 129-139.

[15] FLANDERS P J. Collection, measurement, and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75: 5931-5936.

[16] MCCLEAN R G, SCHOFIELD M A, KEAN W F, et al. Botanical iron minerals: correlation between nanocrystal structure and modes of biological self-assembly[J]. European Journal of Mineralogy, 2001, 13: 1235-1242.

[17] 粟志峰,刘艳,彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境监测, 2002, 16(3): 162-163.

[18] 王亚超. 城市植物叶面尘理化特性及源解析研究[D]. 南京:南京林业大学森林资源与环境学院, 2007: 3-7.

[19] BARGAGLI R, MONACI F, AGNORELLI C. Oak leaves as accumulators of airborne elements in an area with geochemical and geothermal anomalies[J]. Environmental Pollution, 2003, 124: 321-329.

[20] AL-ALAWI M M, MANDIWANA K L. The use of Aleppo pine needles as a bio-monitor of heavy metals in the atmosphere[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148: 43-46.

[21] 王建龙,文湘华. 现代环境生物技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 315-317.

[22] HANESCH M, SCHOLGER R, REY D. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 5125-5133.

[23] MORENO E, SAGNOTTI L, DINARÈS-TURELL J, et al. Bio-monitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2967-2977.

[24] URBAT M, LEHNDORFF E, SCHWARK L. Biomonitoring of air quality in the Cologne Conurbation using pine needles as a passive sampler-part I: magnetic properties[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 3781-3792.

[25] WANG C R, WANG X R, TIAN Y, et al. Oxidative stress,

- defense response, and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27: 970-977.
- [26] KIM H S, HUH J B, HOPKE P K, et al. Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 6762-6770.
- [27] 王焕校. 污染生态学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 7-15.
- [28] STERNBERG T, VILES H, CATHERSIDES A, et al. Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L.) on historic walls in urban environments[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409: 162-168.
- [29] GRATANI L, CRESCENTE M F, PETRUZZI M. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome) [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 19-28.
- [30] MONACI F, MONI F, LANCIOTTI E, et al. Biomonitoring of airborne metals in urban environments: new tracers of vehicle emission, in place of lead[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107: 321-327.
- [31] De NICOLA F, MAISTO G, PRATI M V, et al. Leaf accumulation of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Quercus ilex* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 376-383.
- [32] 潘瑞焜. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 35-37.
- [33] STERNBECK J, SJÖDIN Å, ANDRÉASSON K. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 4735-4744.
- [34] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 等. 行道树对重金属污染的响应及其功能型分组[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 177-183.
- [35] ZECHMEISTER H G, HOHENWALLNER D, RISS A, et al. Variations in heavy metal concentrations in the moss species *Abietinella abietina* (Hedw.) Fleisch., according to sampling time, within site variability and increase in biomass[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 301: 55-65.
- [36] 吴玉环, 高谦, 程国栋, 等. 苔藓植物对全球变化的响应及其生物指示意义[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 895-900.
- [37] COUTO J A, FERNÁNDEZ J A, ABOAL J R, et al. Annual variability in heavy-metal bioconcentration in moss: sampling protocol optimization [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 3517-3528.
- [38] ALBASEL N, COTTENIE A. Heavy metal contamination near major highways, industrial and urban areas in belgian grassland [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1985, 24: 103-109.
- [39] GIDHAGEN L, JOHANSSON C, STRÖM J, et al. Model simulation of ultrafine particles inside a road tunnel[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 2023-2036.
- [40] SAWIDIS T, BREUSTE J, MITROVIC M, et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 3560-3570.

(责任编辑: 张明霞)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流,充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等数据库,因此,凡在本刊发表的论文将编入数据库供交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将论文编入数据库,请在来稿时声明,本刊将进行适当处理。