

# 淮南市石楠叶片重金属分布特征、来源及对大气污染的指示作用

吴明宏<sup>1</sup>, 方凤满<sup>1,2</sup>, 姚有如<sup>1</sup>, 林跃胜<sup>1</sup>, 武慧君<sup>1</sup>, 匡盈<sup>1</sup>

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003; 2. 自然灾害过程与防控研究安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241003)

**摘要:** 以典型绿化树种石楠叶片为研究对象, 采集了淮南市 6 个不同功能区种植的石楠叶片, 分析石楠叶片中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的分布特征、来源及对大气污染的指示作用。结果表明: 淮南市商业交通区叶片中 Pb、Zn 平均浓度显著大于公园绿地 ( $P < 0.05$ ), 分别是公园绿地的 2.95、1.78 倍; 煤炭运输区叶片中 Cu 平均浓度显著大于居住区 ( $P < 0.05$ ) 和公园绿地 ( $P < 0.05$ ), 其分别是居住区和公园绿地的 2.30、2.81 倍, 而叶片中 Ni 和 Cr 在各功能区的差异无统计学意义。石楠叶片中 Pb、Zn 主要来自交通排放, Cu 主要来自于煤炭开采、燃煤发电以及交通运输, Ni 和 Cr 主要来自自然源。叶片中 Cu、Pb、Zn 浓度与叶面尘中 Cu、Pb、Zn 总量呈显著正相关, 说明石楠叶片中 Cu、Pb、Zn 浓度受到叶面尘中 Cu、Pb、Zn 总量的显著影响。石楠叶片中 Cu、Pb、Zn 主要是从大气中吸收, 而 Ni 和 Cr 主要是从土壤中吸收, 利用石楠叶片对大气中 Cu、Pb、Zn 的监测可以取得良好的效果。

**关键词:** 重金属; 石楠叶片; 分布特征; 淮南

**中图分类号:** X173; X513

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)01-0297-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.047

## Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in *Photinia* Leaves and Their Directive Role in Air Pollution in Huainan

WU Minghong<sup>1</sup>, FANG Fengman<sup>1,2</sup>, YAO Youru<sup>1</sup>, LIN Yuesheng<sup>1</sup>, WU Huijun<sup>1</sup>, KUANG Ying<sup>1</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003;

2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Protection Research, Wuhu, Anhui 241003)

**Abstract:** The study object was the typical tree species of *photinia* leaves in Huainan, samples leaves were collected from six different functional areas to analyze the distribution characteristics and sources of Cr, Ni, Cu, Pb and Zn in *photinia* leaves and their directive role in air pollution. The results showed that the average concentrations of Pb and Zn in leaves of commercial traffic area were significantly higher than those of park green land ( $P < 0.05$ ), and even were 2.95 and 1.78 times of the park green space, respectively. The average concentration of Cu in leaves of coal transportation area was significantly higher than that of the residential area ( $P < 0.05$ ) and park green ( $P < 0.05$ ), and was 2.30 and 2.81 times of the residential and park areas, respectively. However, the differences of Ni and Cr in the different functional areas were not statistically significant. The Pb and Zn in *photinia* leaves mainly came from traffic emissions, Cu mainly came from coal mining, coal-fired power generation and transportation, Ni and Cr primarily from natural sources. There were significant correlations between the concentrations of Cu, Pb and Zn in leaves and the total contents of Cu, Pb and Zn in leaf dust, indicating that the concentrations of Cu, Pb and Zn in *photinia* leaves were significantly affected by their contents in leaf dust. The Cu, Pb and Zn in the *photinia* leaves were mainly absorbed from the atmosphere, while Ni and Cr from the soil. Thus, the monitoring of Cu, Pb and Zn in the atmosphere by *photinia* leaves could achieve good results for air pollution.

**Keywords:** heavy metal; *photinia* leaves; distribution characteristics; Huainan

随着城市人口增加、经济发展和工业化进程的不断加快, 工业、交通、民用燃煤等排放的废气大量增加, 大气颗粒物逐渐成为城市生态系统和危害人体健康的首要污染物<sup>[1]</sup>。近年来, 国内外学者对植物叶片

中重金属富集及利用植物指示大气颗粒物重金属污染方面开展了广泛的研究<sup>[2]</sup>。植物叶片中重金属主要来自于对大气中污染物的吸收, 大气中细颗粒物通过植物叶片表面的气孔进入叶肉组织, 叶片重金属浓

收稿日期: 2017-08-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41371480)

第一作者: 吴明宏(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事区域环境综合评价与环境规划研究。E-mail: 15255315930@163.com

通信作者: 方凤满(1974-), 女, 博士, 教授, 主要从事环境地理与环境生态研究。E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

度与大气颗粒物中重金属的污染程度密切相关<sup>[3-4]</sup>。叶面尘经过长期的积累,能够反映大气环境颗粒物长期的累积污染情况<sup>[5]</sup>。目前主要是通过叶片重金属浓度与叶面尘重金属浓度的相关性,来评价植物叶片对大气重金属污染水平监测的效果<sup>[6]</sup>。但叶面尘重金属积累总量比叶面尘重金属浓度更能反映大气重金属污染的实际水平<sup>[7]</sup>。而目前鲜见利用叶片重金属浓度与相应叶面尘重金属积累总量的关系来评价植物叶片对大气重金属污染监测效果的报道。

石楠(*Photinia serrulata* Lindl.)是淮南市常见绿化树种,在绿化带、公路和校园内广泛种植,石楠叶片是大气环境良好的指示物<sup>[8-9]</sup>。本研究以淮南市石楠叶片为研究对象,分析淮南石楠叶片重金属分布特征及来源,探讨叶面尘重金属总量与叶片中重金属浓度关系,以期评估石楠叶片对大气环境中重金属元素指示的可靠性。为进一步研究植物的生态效益和城市环境污染防护提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

淮南市位于安徽省的中北部,地跨淮河两岸。于1950年依矿建市,是中国较为典型的煤炭资源型城市。2011年淮南煤炭总产量达到1亿t,是中国14个亿吨级煤炭基地之一<sup>[10]</sup>,也是全国9大煤电基地之一,境内有平圩、洛河、田家庵3个主要火力发电厂。按照人类活动、城市规划布局 and 交通流量将淮南市市区划分为煤炭运输区、商业交通区、文教区、公园绿地、居住区、经济开发区(以下简称“经开区”)6个功能区。选取具有代表性的采样点位36个。

文教区包括淮南联合大学、淮南师范学院新老校区、安徽理工大学西校区和北校区,这些学校均位于淮南市主干道两旁,车流量较大,采集校园中不同区域石楠叶片,共5处;商业交通区采样点为淮舜南路、朝阳中路、学院南路、国庆中路、人民中路、国庆西路,均位于商业活动发达和车流量密集道路区域,采集道路两边绿化带中石楠叶片,共8处;公园绿地的4处采样点分别位于八公山风景区(3处)和龙湖公园(1处);居住区选择淮南主城区居民住宅小区,采集小区内不同场所绿化带及路边石楠叶片样品,共6处;煤炭运输区为潘一矿、潘北矿、谢一矿等主要煤矿周边及其运煤路段,采集路旁绿化带中石楠叶片样品,共8处;经开区为大通区内的淮南经济技术开发区,采集周边绿地中石楠叶片,共5处;共36个样点。

### 1.2 样品采集

样树特点:供试树种石楠属蔷薇科,深根性,对土壤要求不严,主要分布在长江流域及秦岭以南地区。石楠

幼叶有细小表皮毛,成叶时大部分表皮毛脱落,但是叶片上下表皮粗糙,细小表皮毛和粗糙叶片表皮可以吸附灰尘。且叶片具向叶脉内凹结构,叶面倾角较小,使得较多的粉尘被截留,滞尘能力较强。

采样过程:于2015年4月,雨后7d,选择晴朗无风的天气采样。每个采样点选择高度和胸径相近的10株健康石楠,每株石楠采样高度在0.7~1.5m,用不锈钢剪刀均匀剪取每株石楠的东南西北4个方向枝条上健康叶片<sup>[11]</sup>,存放于布袋中,同一样点采集的所有叶片混成一个约100g的样品。

### 1.3 测定指标与方法

叶片样品用清水洗净后,再用超纯水冲洗3~4次,置于烘箱内105℃杀青2h后70℃烘干至恒重,粉碎后过60目筛备用称取1.0000g备用样品,加20mL混酸(硝酸与高氯酸体积比4:1),静置过夜,次日于电热板消解至近干,消化液冷却后过滤于25mL比色管,2%硝酸定容<sup>[11]</sup>。使用ICP-OES(美国PE公司)测定Cr、Cu、Ni、Pb、Zn浓度。分析过程中加入国家标准植物样品(GSV-1)进行质量控制,其回收率为85%~117%。每5个样品做一个平行样,重复3次,每批样品均添加空白样,结果符合质控要求。所有试剂均为优级纯,水为二次去离子水,器皿均采用10%硝酸浸泡24h以上。

## 2 结果与分析

### 2.1 石楠叶片重金属含量分布

淮南市石楠叶片中各重金属浓度变化范围较大(表1),重金属平均浓度表现为Zn>Cu>Ni>Pb>Cr。戴彬等<sup>[12]</sup>将变异系数分为高度变异(CV>0.36)、中等变异(0.16<CV<0.36)和低度变异(CV<0.16),Cu、Pb的变异系数达到高度变异,Cr、Ni、Zn属于中等变异,说明叶片中Cu、Pb受到人类活动的较大影响而产生较高的变异系数。

表1 石楠叶片中重金属浓度

单位:mg/kg					
项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值	1.51	8.38	4.22	1.03	18.81
最大值	4.40	32.16	16.47	6.38	71.29
均值	2.61	16.08	8.79	2.80	37.66
标准差	0.75	6.29	2.92	1.24	11.16
变异系数(CV)	0.29	0.39	0.33	0.44	0.30

与国内外不同地区石楠叶片重金属浓度(表2)相比,淮南市叶片中Cr的平均浓度与托斯卡纳、昆明和丽江石楠叶片中Cr的平均浓度差异较小。这是因为Cr为植物生长的毒性元素,被植物吸收的较少<sup>[14-15]</sup>,导致富集差异较小。淮南市石楠叶片中Cu的平均浓度高于昆明、丽江、思茅市3个地方。城市

大气环境中的 Cu 主要来自交通排放,但是工矿城市大气环境的 Cu 为混合来源<sup>[7,12]</sup>。淮南作为我国重要的煤炭基地,其石楠叶片 Cu 浓度与其他 3 地比较,除了受到交通排放的影响,也会受到煤炭开采、运输、燃烧的影响,有研究<sup>[16]</sup>表明煤炭开采、运输、燃烧时会产生大量 Cu,导致淮南石楠叶片中的 Cu 浓度高于其他 3 地。淮南市石楠叶片中 Cu 的平均浓度低于托斯卡纳石楠叶片中 Cu 的平均浓度,托斯卡纳采样点位于历史悠久花卉种植基地,农药的使用和交通排放使其研究区环境介质中的 Cu 严重超标<sup>[9]</sup>。淮

南石楠叶片 Pb 的平均浓度低于宝钢厂区植物叶片 Pb 的平均浓度,这是宝钢钢铁冶炼排放 Pb 造成的<sup>[17]</sup>。淮南市石楠叶片中 Zn 的平均浓度高于宝钢工业园区石楠叶片中 Zn 的平均浓度,淮南市采样点多位于道路附近,而宝钢石楠叶片采样点在车流量较少的河道两侧和绿地。相比宝钢而言,淮南市植物样品受到交通排放的影响较大,有研究表明车流量在很大程度上影响了环境介质中 Zn 浓度<sup>[18]</sup>。总体上淮南石楠叶片中的 Cu、Pb、Zn 浓度高于其他城市,说明淮南市大气环境遭受了一定程度的污染。

表 2 国内外不同城市市区石楠叶片中重金属浓度

单位:mg/kg

城市	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	采样点	文献
托斯卡纳	3.55	29.39	—	2.18	—	道路附近	[9]
昆明	2.38	14.45	—	1.52	—	市区	[12-13]
丽江	2.60	12.82	—	1.46	—	市区	[12-13]
思茅	—	8.33	—	—	—	绿化苗圃	[13]
宝钢	—	—	—	7.92	25.73	附近绿地	[16]
淮南	2.61	16.08	8.79	2.80	37.66	市区	本研究

注:—表示无数据。

## 2.2 不同功能区石楠叶片的重金属浓度分布特征

由图 1 可知,石楠叶片中 Pb、Zn 积累表现为商业交通区>文教区>煤炭运输区>居住区>经开区>公园绿地;叶片中 Cu 的积累表现为煤炭运输区>商业交通区>经开区>文教区>居住区>公园绿地;Ni 在石楠叶片中的积累表现为商业交通区>经开区>文教区>煤炭运输区>居住区>公园绿地;Cr 的积累表现为商业交通区>经开区>文教区>居住区>煤炭运输区>公园绿地。商业交通区叶片中 Pb、Zn 平均浓度显著大于公园绿地( $P=0.001<0.05$ ),煤炭运输区的叶片中 Cu 平均浓度显著大于居住区( $P=0.001<0.05$ )和公园绿地( $P\approx 0.000<0.05$ )。商业交通区叶片中 Pb 和 Zn 的平均浓度分别为 4.36, 48.69 mg/kg,其值分别是公园绿地的 2.95, 1.78 倍,煤炭运输区叶片中 Cu 的平均浓度为 25.70 mg/kg,其值分别是居住区和公园绿地的 2.30, 2.81 倍,而叶片中的 Ni 和 Cr 平均浓度在各功能区的差异无统计学意义。

城市环境中 Pb、Zn 主要来自于交通排放<sup>[19]</sup>,淮南商业交通区采样点均在繁忙的道路附近,其车流量大,会加剧该地 Pb、Zn 污染。与商业交通区相比,淮南公园样点周围树木和灌木较多且盖度较大,交通排放对公园的影响明显弱于道路<sup>[20]</sup>,因此呈现出商业交通区的 Pb、Zn 显著大于公园绿地。煤炭运输区的叶片中 Cu 累积显著大于居住区( $P=0.01<0.05$ )和公园绿地( $P\approx 0.000<0.05$ ),有研究<sup>[21]</sup>表明,运用重型车辆对煤炭的运输会造成大气环境中 Cu 的浓度显著增高。淮南煤炭运输区是重型车辆运输煤炭的主要通道,而公园绿地和居住区周围很少有运输煤炭的重型车

辆。加之居住区和公园绿地绿化较好,其绿化植物对来自城市其他地区大气颗粒物具有一定的截留作用,从而减少外来 Cu 的污染。所以煤炭运输区叶片中 Cu 的平均浓度高于居住区和公园绿地。叶片中的 Ni 和 Cr 主要来自自然源<sup>[22]</sup>,其受人为影响小,故叶片中的 Ni 和 Cr 平均浓度在各功能区的差异无统计学意义。

## 2.3 石楠叶片中重金属与叶面尘中重金属的关系

已有研究<sup>[23]</sup>表明,叶片重金属浓度随着叶面尘重金属浓度的升高及滞尘量的增加而升高。淮南市石楠叶片重金属浓度与叶面尘重金属浓度相关性并不显著(表 3),这主要是因为滞尘量差异造成的。煤炭运输区和商业交通区叶片上的叶面尘重金属浓度虽然较低,但叶片上滞尘量高,而其他功能区叶片上的叶面尘重金属浓度相对较高,但其滞尘量低<sup>[24]</sup>。淮南市叶面尘重金属浓度与滞尘量对叶片中重金属浓度的影响较复杂。为了综合考虑叶面尘重金属浓度和滞尘量对叶片重金属浓度的综合影响,本文引入了叶片上叶面尘重金属总量(叶面尘重金属总量=叶面尘重金属浓度×叶片滞尘量)这一综合影响因素。研究叶面尘重金属总量与叶片重金属浓度的相关性(表 3),发现对应叶面尘的 Cu、Pb、Zn 总量与叶片 Cu、Pb、Zn 浓度呈显著正相关,说明石楠叶片体内 Cu、Pb、Zn 受到叶面重金属总量的显著影响,而叶面尘主要来自于大气颗粒物的沉降<sup>[5]</sup>,说明石楠叶片体内 Cu、Pb、Zn 主要来自大气。叶面尘的 Ni 和 Cr 总量与叶片中的 Ni 和 Cr 浓度无显著相关关系,一些研究认为植物 Ni、Cr 主要由根固定,再转移到其他器官<sup>[25]</sup>,所以 Ni 和 Cr 可能主要来自土壤。

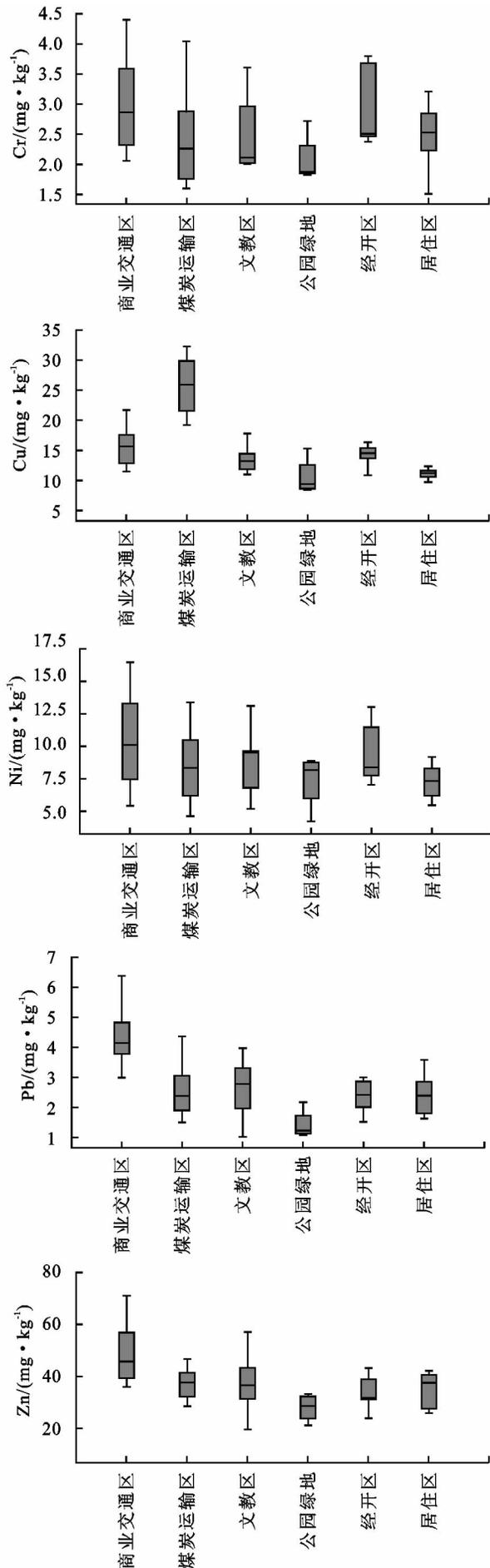


图 1 不同功能区石楠叶片重金属分布特征

## 2.4 淮南市石楠叶片中重金属的来源

聚类分析是广泛用于重金属判源的方法,对于变量聚类中归在一类的变量,可以说明这些变量具有相同的来源,再根据不同行业排放的重金属特点及自然界中重金属的分布特点,可以判别出每类重金属的来源<sup>[26]</sup>。以淮南市叶片中重金属浓度数据为依据,由于数据的数量级不同,采用标准化法对数据进行无量纲化处理,然后进行聚类分析(图 2)。当距离为 10~15 时,淮南市叶片中的重金属可分为 3 类,Pb 和 Zn 为一类,Ni 和 Cr 为一类,Cu 单独为一类。结合前文分析,叶片中 Cu、Pb、Zn 主要是从大气中吸收,Ni 和 Cr 主要是从土壤中吸收。叶片中的 Pb 和 Zn 主要来自交通运输,有研究<sup>[19,27-29]</sup>表明城市大气中的 Pb 和 Zn 主要来自交通运输,包括燃料的燃烧(汽车尾气)、轮胎的磨损、机动车零部件的老化、车身的磨损掉漆以及含重金属的发动机机油的泄漏。作为煤矿城市的淮南,该地石楠叶片中 Pb 和 Zn 浓度除了受到日常交通运输的影响,还受到大量煤炭运输的影响,加剧了交通排放对淮南市石楠叶片中 Pb、Zn 浓度的影响。商业交通区石楠叶片中 Pb 和 Zn 浓度较高,也证实了交通运输对于叶片中 Pb 和 Zn 富集的影响。从聚类分析中可以看出 Cu 单属一类,Cu 的来源比较复杂,煤矿区附近的 Cu 主要来自煤炭开采过程中的三废排放,同时燃煤发电也可产生 Cu 污染<sup>[30]</sup>,而淮南市是典型的煤炭资源型城市,该地有 3 大火力发电厂。同时汽车金属部件的磨损可以释放 Cu<sup>[31]</sup>,结合其采样点大多位于道路附近,说明叶片中的 Cu 也有部分来自交通运输。植物叶片 Cr 和 Ni 的空间分布与工业企业的分布无关<sup>[7]</sup>。Ni 和 Cr 主要来自自然源,主要受土壤母质的影响<sup>[22]</sup>。结合石楠叶片中 Ni 和 Cr 主要来自对土壤的吸收,表明 Ni 和 Cr 主要来自自然源,且淮南市石楠叶片中的 Ni 和 Cr 浓度在不同功能区无显著差异( $P>0.05$ ),也说明叶片中的 Ni 和 Cr 受人为活动排放的影响较小。

## 2.5 石楠叶片重金属浓度对大气环境污染程度的指示作用

叶片与大气中相应重金属的浓度如果存在良好的相关性,则叶片就可以用来监测大气相应重金属的污染程度<sup>[32]</sup>,叶面尘主要来自大气沉降,叶面尘重金属总量能反映大气环境的颗粒物重金属污染水平<sup>[5,7]</sup>,结合石楠叶片中 Cu、Pb、Zn 浓度与叶面尘重金属 Cu、Pb、Zn 总量有显著的正相关关系,说明石楠叶片对大气 Cu、Pb、Zn 的监测效果是可靠的。利用石楠叶片对淮南市大气环境进行监测,发现大气中 Cu 的污染表现为煤炭运输区>公园绿地和居住区,Pb、Zn 的污染表现为商业交通区>公园绿地。刘玲

等<sup>[11]</sup>为了长期监测淮南市大气污染程度,对不同功能区的 TSP 和 PM<sub>2.5</sub> 的重金属浓度进行了 60 d 的监测,其研究结果与石楠叶片对不同功能区大气中 Cu、

Pb、Zn 污染程度大小的监测是一致的。可见利用石楠叶片对大气中 Cu、Pb、Zn 的监测可以取得良好的效果。

表 3 叶片重金属与叶面尘的各重金属浓度及总量的相关性( $n=36$ )

指标	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
叶面尘相应重金属浓度	0.023	-0.328	0.182	-0.292	-0.003
叶面尘相应重金属总量	0.007	0.403*	0.106	0.439**	0.427**

注: \*\* 表示在  $P<0.01$  水平上显著相关; \* 表示在  $P<0.05$  水平上显著相关。

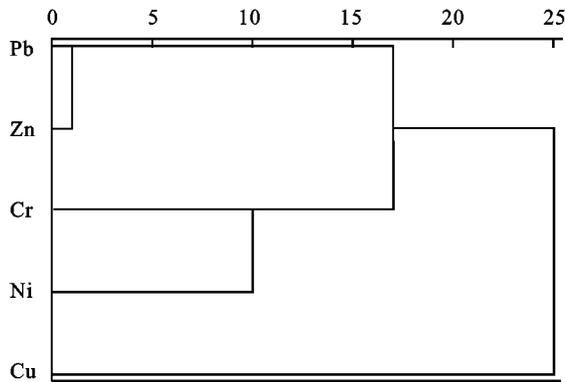


图 2 淮南市石楠叶片中重金属聚类分析

### 3 结论

(1)与国内外城市石楠叶片中重金属浓度的研究结果相比,淮南与国内外城市石楠叶片中 Cr 和 Ni 浓度差异均较小,说明淮南石楠叶片中 Cr 和 Ni 受到人类活动的影响较小,而淮南石楠叶片中 Cu、Pb、Zn 的浓度总体较国内外城市高,说明叶片中 Cu、Pb、Zn 的浓度受到人类活动的显著影响,且大气环境受到一定程度的重金属污染。

(2)商业交通区叶片中 Pb、Zn 平均浓度显著大于公园绿地( $P=0.001<0.05$ ),煤炭运输区的叶片中 Cu 平均浓度显著大于居住区( $P=0.001<0.05$ )和公园绿地( $P\approx 0.000<0.05$ )。商业交通区叶片中 Pb 和 Zn 的平均浓度分别为 4.36, 48.69 mg/kg,其值分别是公园绿地的 2.95, 1.78 倍,煤炭运输区叶片中 Cu 的平均浓度为 25.70 mg/kg,其值分别是居住区和公园绿地的 2.30, 2.81 倍,而叶片中的 Ni 和 Cr 的平均浓度在各功能区的差异无统计学意义。

(3)淮南石楠叶片中 Pb、Zn 主要来自交通运输, Cu 的来源比较复杂,主要来自煤炭开采和燃煤发电以及交通运输。叶片中的 Ni 和 Cr 主要来自自然源。叶面尘中 Cu、Pb、Zn 总量与叶片中 Cu、Pb、Zn 浓度呈显著正相关,叶面尘的 Ni 和 Cr 总量与叶片中的 Ni 和 Cr 浓度无显著相关关系,说明石楠叶片中的 Cu、Pb、Zn 主要是从大气中吸收, Ni 和 Cr 主要是从土壤中吸收。淮南市可以利用石楠叶片来监测大气环境中 Cu、Pb、Zn 的污染程度,然而石楠叶片对大气中的 Ni 和 Cr 监测效果差。

### 参考文献:

- [1] Naidoo G, Tuffers A V, Vonwillert D J. Changes in gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of two mangroves and a mangrove associate in response to salinity in the natural environment [J]. *Trees*, 2002, 16(2/3): 140-146.
- [2] 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.
- [3] 潘如圭. 3种经济植物对重金属吸收积累的研究[J]. *环境科学学报*, 1991, 11(2): 231-235.
- [4] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2002: 7-15.
- [5] 庞博,张银龙,王丹. 城市不同功能区内叶面尘与地表灰尘的粒径和重金属特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1312-131.
- [6] Triratnesh G, Sudhir K P, Ki-Hyun K, et al. Airborne foliar transfer of PM bound heavy metals in *Cassia siamea*: A less common route of heavy metal accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573(4): 123-130.
- [7] 戴斯迪,马克明,宝乐,等. 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*, 2013, 33(1): 154-162.
- [8] 张丹龙,方凤满,朱哲,等. 淮南城区小学校园石楠叶面尘重金属污染特征及健康风险评价[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 328-333.
- [9] Mori J, Arne S, Hanslin H M, et al. Deposition of traffic-related air pollutants on leaves of six evergreen shrub species during a Mediterranean summer season [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 264-273.
- [10] 范佳民,郑刘根,姜春露,等. 淮南市城区地表灰尘重金属分布特征及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1643-1649.
- [11] 刘玲,方炎明,王顺昌,等. 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[J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(1): 85-92.
- [12] 戴彬,吕建树,战金成,等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 507-515.
- [13] 何蓉,张学星,周筑,等. 几种城市绿化树种叶片中铅镉汞元素的含量特征[J]. *西部林业科学*, 2005, 3

- (3):11-24.
- [14] 何蓉,张学星,施莹,等. 16 种城市绿化树种叶片中铁锰铜锌元素的含量特征[J]. 西部林业科学, 2006, 35(1):23-35.
- [15] 潘瑞焱. 植物生理学[M]. 7 版. 北京:高等教育出版社, 2012:35-37.
- [16] Rampazzo G, Masiol M, Visin F, et al. Gaseous and PM 10-bound pollutants monitored in three site with differing environmental conditions in the Venice area (Italy) [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 195(1/4): 161-176.
- [17] 张峰,陈正勇. 上海宝钢工业园区大气 PM 2.5 元素污染特征及溯源分析[C]//中国金属学会. 2015“第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”论文集. 上海:中国金属学会, 2015.
- [18] Charlesworth S, Everett M, Mc Carthy R, et al. A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. Environment International, 2003, 29(5): 563-573.
- [19] 刘春华,岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7):1181-1188.
- [20] 梅凡民,徐朝友,周亮. 西安市公园大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的化学形态特征及其生物有效性[J]. 环境化学, 2011, 30(7):1284-1290.
- [21] 白建峰,崔龙鹏,黄文辉,等. 煤矸石释放重金属环境效应研究:淮南煤矿塌陷区水体试验场实例调查[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(4):7-10.
- [22] Lü J, Liu Y, Zhang Z L, et al. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(1): 163-178.
- [23] 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.
- [24] 张丹龙,方凤满,姚有如,等. 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, 2016, 36(9):3322-3332.
- [25] Dahmani M H, Van O F, Gelie B, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a mental smelter Original research article [J]. Environmental Pollution, 2002, 109(2): 231-238.
- [26] 林燕萍,赵阳,胡恭任,等. 多元统计在土壤重金属污染源解析中的应用[J]. 地球与环境, 2011, 39(4):536-542.
- [27] 方晰,金文芬,李开志,等. 长沙市韶山路沿线不同绿地土壤重金属含量及其潜在生态风险[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):64-70.
- [28] 方凤满,蒋炳言,王海东,等. 芜湖市地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2010, 29(7):1193-1202.
- [29] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [J]. Environmental Pollution, 2003, 123(1): 95-105.
- [30] 李丽君,张强,刘平,等. 火电厂烟气脱硫石膏重金属含量监测与分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):209-214.
- [31] 方凤满,林跃胜,王海东,等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J]. 生态学报, 2011, 31(23):316-325.
- [32] Nicola D 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(2): 376-383.
- (上接第 296 页)
- [10] 林立金,罗丽,杨代宇,等. 混种富集植物对牛膝菊镉积累的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):319-324.
- [11] 王兴伟,刘子芳,范燕,等. 混种黑麦草和三叶草对假繁缕镉积累的影响[J]. 四川环境, 2017, 36(2):1-6.
- [12] 徐强,程智慧,卢涛,等. 间作对植株生长及养分吸收和根际环境的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(2):350-356.
- [13] 程籍,廖明安,林立金,等. 不同生态型小飞蓬对酸樱桃镉积累及土壤酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(6):153-158.
- [14] 黄科文,廖明安,林立金. 2 种生态型三叶鬼针草的不同株数混种比例对其镉累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5):753-759.
- [15] 王激清,茹淑华,苏德纯. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):890-894.
- [16] 陈兴,郭先华,祖艳群,等. 蚕豆与小花南芥间作体系中 Cd、Pb 在植物中的累积特征[J]. 云南农业大学学报, 2016, 31(1):167-172.
- [17] 蒋成爱,吴启堂,吴顺辉,等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9):985-990.
- [18] 李春俭,马玮,张福锁. 根际对话及其对植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1):178-183.
- [19] 林立金,廖明安,梅洛银,等. 不同生态型小飞蓬对镉胁迫木樱桃植株磷钾吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12):1565-1568.
- [20] 刘领. 种间根际相互作用下植物对土壤重金属污染的响应特征及其机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.