

# 城镇绿化树种叶片滞尘与重金属积累能力研究 ——以浙江省余姚市泗门镇为例

曹旖旎<sup>1</sup>, 吴 灏<sup>1</sup>, 沈立铭<sup>2</sup>, 陈光才<sup>1\*</sup>, 张建锋<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400;

2. 浙江省余姚市林业特产技术推广总站, 浙江 余姚 315400)

**摘要:** [目的]通过实地取样测定浙江省余姚市泗门镇的工业区、商业交通区和休闲娱乐区3个功能区9种常见绿化树种叶片的滞尘量、叶片重金属含量和叶面尘重金属含量,了解长江以南地区城镇常用绿化树种滞尘及重金属吸收能力的差异。[方法]采用重量差值法测定叶片滞尘量,用电感耦合等离子体质谱仪测定叶面尘和叶片重金属含量,用主成分分析法解析叶面尘的重金属来源,分析叶片重金属含量与叶面尘重金属含量的关系。[结果](1)不同绿化树种的滞尘能力差异显著,夹竹桃、海桐和紫薇滞尘能力较强;(2)同一绿化树种在不同功能区的叶片滞尘量和叶片重金属含量存在很大差异,叶片单位面积滞尘量和叶片重金属含量随着环境污染程度的增加而升高;(3)叶面尘重金属在各功能区具有很高的同源性,大气降尘和交通排放是主要贡献因子。[结论]9种常见绿化树种叶片滞尘能力以夹竹桃、海桐和紫薇较强;叶片重金属元素积累能力以紫薇、金边黄杨和红花檵木较强,而夹竹桃、小蜡树和红叶石楠较弱。根据城镇功能区特点,选用滞尘能力和重金属积累能力较强的绿化树种,合理配置乔灌木树种,能够有效改善城镇空气质量。

**关键词:**绿化树种;叶片;功能区;滞尘能力;重金属

中图分类号:S731

文献标识码:A

## Analysis on the Dust Retention and Heavy Metal Absorption Ability of Leaves: A Case Study in Yuyao, Zhejiang Province

CAO Yi-ni<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, SHEN Li-ming<sup>2</sup>, CHEN Guang-cai<sup>1</sup>, ZHANG Jian-feng<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. Forestry Technology Extension Station of Yuyao City, Zhejiang Province, Yuyao 315400, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] To measure the dust retention and heavy metal absorption ability of 9 common landscaping tree species in the industrial area of Simen Town of Zhejiang Province and to determine the differences among common landscaping trees in purifying air and improving the environment quality. [Method] The foliar dust retention, the heavy metal content in leaves, and the correlation between the dust retention and metal content in leaves of 9 landscaping tree species grown in three functional areas (industrial area, commercial and traffic area, and the leisure and entertainment area) were investigated. [Result] (1) The dust retention ability varied significantly among the 9 tree species grown in the same environment. *Nerium indicum*, *Pittosporum tobira* and *Lagerstroemia indica* showed better in dust retention than the other species. (2) The foliar dust retention and heavy metal content of the same tree species varied greatly among different functional areas. The dust quantity and heavy metal content in a unit area increased with the air dust in different functional area. (3) The heavy metals in foliar dust had high homol-

收稿日期:2016-01-31

基金项目:浙江省-中国林科院省院合作林业科技项目(2013SY02);浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027-1)

作者简介:曹旖旎(1991—),女,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事污染物与树木的相互作用研究。

\* 通讯作者:陈光才. E-mail: guangcaichen@sohu.com

ogy in each functional area, suggesting that the atmospheric dust and traffic emissions are the main source of heavy metals. [ **Conclusion** ] This study provides some useful information on the selection of landscaping tree species for improving the urban air quality.

**Keywords:** landscaping species; leaves; functional area; dust retention; heavy metal

颗粒物和粉尘是主要空气污染物,它们直接或间接地威胁着生态安全和人体健康<sup>[1-2]</sup>。在通过城市功能合理规划布局、工业生产设施升级、提高机动车燃油质量,从根源上削减空气颗粒物污染和粉尘污染的同时,人们也从城市森林结构优化、道路防护林带建设等方面对控制城镇空气粉尘和颗粒物进行了探索<sup>[3-5]</sup>。植物因其特殊的叶表形态、结构以及自身的润湿性,可以有效阻滞、吸收和固定大气颗粒物<sup>[3,6-7]</sup>,同时对重金属污染物具有吸附、吸收等功能<sup>[8-10]</sup>,故城市绿化建设对空气中悬浮颗粒及其携带的重金属污染防治具有重要意义,是改善城市环境质量的有力手段。

研究表明,不同绿化树种,其滞尘有效性及滞尘能力存在显著差异<sup>[11]</sup>。柴一新等<sup>[12]</sup>对哈尔滨28个常见绿化树种进行了研究,发现常绿针叶树种中红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)和杜松(*Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.)滞尘能力最突出,阔叶树种中银中杨(*Populus alba* 'Berolinensis' L.)、金银忍冬(*Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim.)、山桃(*Prunus davidiana* (Carr.) Franch.)、稠李(*P. padus* L.)滞尘能力较强。胡舒等<sup>[13]</sup>对徐州6种常见落叶绿化树种的研究结果表明,滞尘能力最强的树种和最弱的树种滞尘量相差2.9~3.6倍。绿化树种的叶片滞尘是一个复杂的动态过程,受到植物自身的特征如高度、叶片结构、滞尘累积时间、季节、气象条件等诸多因素影响<sup>[11,14]</sup>。陈玮等<sup>[15]</sup>指出,针叶树种在北方冬季具有很强的滞尘能力,其树叶断面形状影响植物的滞尘能力。对于阔叶树种,叶片表面湿润并带有密绒毛的绿化树种一般具有较强的滞尘能力,而叶片表面光滑的树种则滞尘能力较弱<sup>[13]</sup>。高金晖等<sup>[16]</sup>发现,封闭环境下树种的滞尘量明显高于开敞环境下的滞尘量。李海梅等<sup>[17]</sup>指出,降雨可以降低叶表颗粒物附着密度。树木在不同的季节对空气中粉尘的阻滞作用存在显著差异<sup>[18]</sup>,王月菡等<sup>[19]</sup>发现,南京地区大部分绿化树种在同一地点滞尘能力为春季较高,夏季降低,秋季增高,冬季可达一年的最大值。

目前,我国对城市绿化树种滞尘能力的研究大

多集中于北方大气污染较严重的城市,如哈尔滨、沈阳、北京和青岛等地<sup>[12,15-17,20-21]</sup>。近年来,随着全国范围内大气及空气污染的加重,长江以南地区的空气质量也大幅降低,空气粉尘、颗粒物污染也日趋严重。因此,深入研究长江以南地区城镇绿化树种对空气粉尘、颗粒物污染的滞留能力十分必要。文献检索表明,仅有少量关于江南地区常绿树种对空气颗粒物阻滞的研究,如王月菡等<sup>[19]</sup>研究了南京绿化树种滞尘能力的季节变化,刘璐等<sup>[22]</sup>比较了广州18种行道树叶片滞尘量的差异。本文对浙东平原余姚市泗门镇工业区、商业交通区、休闲娱乐区等不同功能区中9种绿化树种的叶片滞尘能力、叶片重金属以及叶面尘重金属进行取样分析,比较了不同树种的滞尘能力及叶片重金属积累能力,并探讨叶片和叶面尘中重金属的来源,以评价长江以南典型小城镇绿化树种叶片滞尘能力和重金属积累能力,为城乡绿化树种的选择、园林绿化效益的提升以及人居环境质量的改善提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

浙江省余姚市位于宁绍平原,中心地理坐标为121°09'E,30°30'N,地处亚热带南缘,为北亚热带季风性湿润气候,阳光充沛,温暖湿润,四季分明,雨热同步。泗门镇位于余姚西北,北濒杭州湾,年平均气温16.2℃,年平均降水量1300mm,年平均日照时数2061h,年平均无霜期228d。泗门镇是一个历史悠久的浙东古镇,工业发达。全镇绿化面积98.6万m<sup>2</sup>,绿化覆盖率达32.6%,建有汝湖公园等休闲公园7个,是全国造林绿化百佳镇,省生态示范镇。

### 1.2 样品采集

1.2.1 采样地点 根据余姚市泗门镇土地利用类型以及绿地分布情况,将研究区域(图1)分为3个功能区:工业区、商业交通区和休闲娱乐区<sup>[12,23]</sup>,其中,以位于固北中路和镇北路交汇干道附近的工业园作为工业区(IA),此试验区有多家电器有限公司和机械厂区,地理位置远离交通要道,车流量相对较小,周围少有居民在此居住;以靠近商业繁华地带的

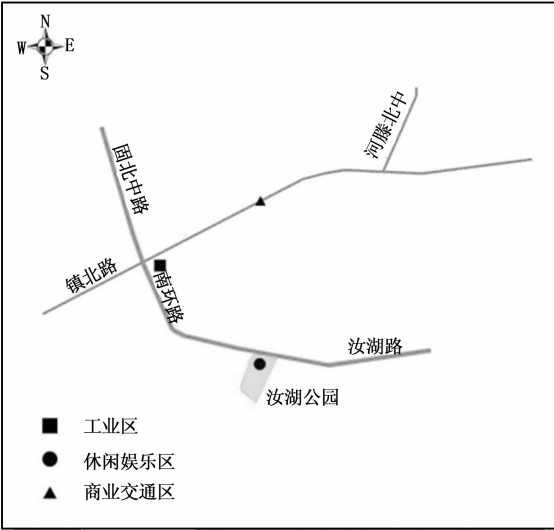


图1 试验采样点(浙江余姚泗门镇)

镇北路为商业交通区(CTA),此试验区行人和车辆较多,且绿化树种多种植于道路两侧,绿化面积相对较少,环境质量相对较差;以位于光明南路与汝湖路交叉口,建园时间较长,群落结构稳定的汝湖公园作为休闲娱乐区(LEA),此试验区有大量的绿色植被覆盖、环境优美,适合居民在此进行休闲娱乐活动,环境质量相对前两个功能区较好。

1.2.2 试验树种 在对余姚市泗门镇园林绿化植物种类及长势等本底调查的基础上,根据绿化树种典型性、多样性原则,在各功能区选择长势良好,绿化使用频率较高的9种绿化树种作为调查研究对象(表1)。

表1 9种绿化树种生物学特性

编号	树种	树高/m	种类	冠幅/m	叶表特征
1	红叶石楠	0.8~1.0	灌木	0.8~1.5	叶片光滑无毛
2	紫薇	2.5~3.3	灌木	1.2~1.8	叶表光滑无毛,叶背中有毛
3	海桐	1.0~1.3	灌木	0.8~1.5	叶革质,边缘反卷,全缘无毛,有光泽
4	香樟	5.5~6.0	乔木	5.5~6.5	叶薄革质
5	小蜡树	1.0~1.5	灌木	0.8~1.2	叶薄革质,背面有毛,脉腋及中脉有密毛
6	红花檵木	1.0~1.5	灌木	0.8~1.2	叶革质互生,基部圆而偏斜,两面均有星状毛
7	金边黄杨	0.6~1.0	灌木	0.8~1.5	叶片光滑无毛
8	夹竹桃	1.8~2.3	灌木	1.5~2.0	含水液,被微毛,老时脱落,叶片蜡被
9	杜英	5.0~5.5	乔木	4.5~5.5	叶革质,表面平滑无毛

注:红叶石楠(*Photinia serrulata* Lindl.)、紫薇(*Lagerstroemia indica* L.)、海桐(*Pittosporum tobira* Thunb. Ait.)、香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Prest)、小蜡树(*Fraxinus mariesii* Hook. f)、红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum* Yieh)、金边黄杨(*Euonymus japonicus* cv. *Aureo-ma*)、夹竹桃(*Nerium indicum* Mill.)、杜英(*Elaeocarpus decipiens* Hemsl.)。

1.2.3 采样方法 研究表明,降雨量大于15 mm或风速大于 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,便会冲掉或吹落植物叶片附着的粉尘<sup>[24]</sup>。根据余姚市降雨特点,在2015年9月,选择大雨后5 d晴朗无风天气进行样品的采集。在各功能区随机选择4株树高、胸径等长势一致的样树采样,采样位置选择树冠四周各部位,并对同一批植物样品进行3次重复测定。

### 1.3 测定方法

1.3.1 滞尘量测定 采用重量差值法进行叶片滞尘量的分析测定<sup>[1,25]</sup>。将当天采回的叶片浸泡于蒸馏水中2 h,充分浸洗,洗下叶片附着物,然后用镊子小心夹出叶片并用蒸馏水进行冲洗,放在白纸上晾干。将浸泡叶片的母液用事先称质量( $W_0$ )的微孔滤膜( $\Phi = 0.45 \mu\text{m}$ )抽滤,后放置于表面皿上,再用烘箱在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干降尘至恒质量,称质量( $W_1$ ),2次质量之差即为叶片的滞尘总量(即总滞尘量 $W = W_1 - W_0$ )。叶片晾干后,用Epson Perfection V700 Photo扫描仪扫描叶片,再用WinRHIZO Pro2005b(加拿大Regent Instruments公司)根系分析系统分析测量叶面积( $A$ ), $(W_1 - W_0)/A$ 即为叶片单位面积滞尘量,单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.3.2 重金属含量测定 叶片、叶面尘分别采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 和 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法在电热板上加热消解。将干燥的叶片样品粉碎、混匀,并称取0.5 g到100 mL的玻璃三角瓶中;叶面尘样品则将载尘滤膜放入100 mL的玻璃三角瓶中。各加入10 mL的 $\text{HNO}_3$ 与 $\text{HClO}_4$ 的混合酸( $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HClO}_4} = 4:1$ ),混匀,放置过夜,然后将冷消化过夜的样品放置于电热板上消煮直至液体变澄清。将消解好的溶液转移至25 mL的容量瓶中,用去离子水定容。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7700x)测定消解液中锌(Zn)、锰(Mn)、铜(Cu)、镍(Ni)、铬(Cr)、铅(Pb)和镉(Cd)含量,据此计算叶片和叶面尘中重金属含量。

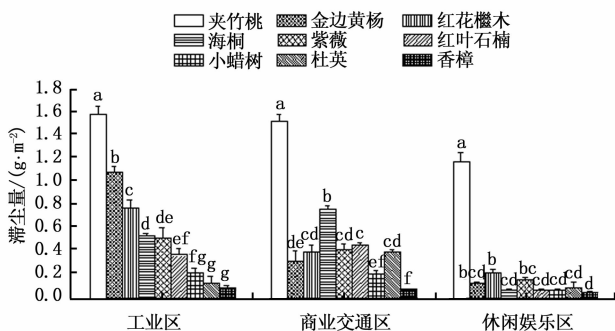
### 1.4 数据处理

对不同绿化树种的叶片滞尘量和重金属含量应用SPSS13.0统计软件进行单因素方差分析和多重比较(LSD,  $P < 0.05$ ),用R语言对各功能区树种叶片和叶面尘重金属含量进行主成分分析,并对叶面尘重金属含量进行Pearson检验,图表用Origin7.5和ArcGIS9.3绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同绿化树种的叶片滞尘能力

9种乔木、灌木叶片单位面积滞尘量见图2。工业区不同树种的滞尘量差异显著,滞尘量由大到小为:夹竹桃>金边黄杨>红花檵木>海桐>紫薇>红叶石楠>小蜡树>杜英>香樟。夹竹桃的滞尘量可达 $1.5765\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,而香樟的滞尘量为 $0.0947\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,夹竹桃的单位面积滞尘能力是香樟的近17倍。商业交通区各绿化树种的滞尘量由大到小为:夹竹桃>海桐>红叶石楠>紫薇>红花檵木>杜英>金边黄杨>小蜡树>香樟。此区域内夹竹桃、海桐和红叶石楠的滞尘能力较强,分别为香樟滞尘能力的19、10、6倍。休闲娱乐区各绿化树种也是夹竹桃的滞尘量最大,可达 $1.1760\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,而香樟的滞尘量最低,为 $0.0512\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。综合以上分析,在同一尘源条件下不同绿化树种滞尘能力差异显著,滞尘能力较强的树种有夹竹桃、海桐和紫薇等,而小蜡树和香樟的滞尘能力较弱。



同一功能区的不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同

图2 不同绿化树种叶片单位面积滞尘量

不同树种叶片滞尘能力除受植物种类、垂直高度、叶片形态、叶片密集程度等植物自身特性影响外,还与所处环境的空气污染程度密切相关。对3个功能区的9个绿化树种的单位叶面积滞尘量在不同功能区的数值进行比较分析发现,同一树种在不同功能区的滞尘量差异显著( $P < 0.05$ ),其顺序为工业区>商业交通区>休闲娱乐区。由此可见,粉尘含量高的区域内的树种滞尘能力较强,树种的滞尘能力受到环境污染程度的影响。

### 2.2 不同绿化树种叶片的重金属含量

由表2可知:各树种叶片重金属含量随着采样

地点空气环境质量的同而变化,工业区和商业交通区的树种叶片重金属含量普遍高于休闲娱乐区。综合3个功能区所测树种叶片重金属含量结果,对Pb和Cr积累作用较强的有紫薇、夹竹桃和香樟等,而杜英和海桐相对较弱。从每个功能区所采集的绿化树种看,不同绿化树种的Zn和Mn平均含量均最高,Cu和Ni次之,Cr和Pb较少,Cd平均含量最低。分析其原因,可能是Mn、Zn、Cu为植物生长的必需元素<sup>[26]</sup>,故植物体内的Zn、Mn含量远高于Cr和Pb,而Cr和Pb含量也远高于Cd。从主成分分析综合得分和排名可知:杜英、香樟和金边黄杨在工业区内对于各种重金属元素的积累能力较强,小蜡树对重金属的积累能力较弱;商业交通区中紫薇、红花檵木和金边黄杨对于重金属的积累能力较突出;休闲娱乐区中紫薇和小蜡树等绿化树种的重金属积累能力较强,夹竹桃和红叶石楠的积累能力较弱。

### 2.3 叶面尘重金属来源及与叶片重金属的关系

2.3.1 叶面尘重金属之间的相关性分析 重金属元素之间的相关性能够有效地说明重金属的来源或其迁移途径<sup>[27]</sup>。各功能区叶面尘重金属的Pearson相关系数矩阵见表3~5。休闲娱乐区绿化树种叶面尘的所有重金属元素均显著相关,说明此功能区内这7种重金属来源相似。工业区绿化树种叶面尘中Mn只与Cu相关,与其它重金属元素不相关;Zn与其它各种金属元素都不相关,说明此区域内叶面尘重金属元素来源于多因素。商业交通区绿化树种叶面尘重金属除Cd与Cu、Zn、Cr不相关,Pb与Zn、Cd不相关外,其它重金属元素之间的相关性均显著。

2.3.2 叶面尘重金属来源的主成分分析 对不同功能区绿化树种的叶面尘重金属进行K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验,发现各种金属元素含量均服从正态分布。休闲娱乐区的Pearson检验结果表明:各重金属同源性高,第1主成分的累积贡献率就已超过80%,因此不再作进一步的主成分分析。对工业区和商业交通区这2个功能区分别进行主成分分析,其对应的载荷矩阵见表6。工业区和商业交通区提取2个主成分,它们的累积贡献率分别达到了89.15%和86.41%。结果显示:工业区的绿化树种叶面尘中Cr、Ni、Cu、Pb在第1主成分有较大的载荷量(贡献率71.44%),Mn和Zn在第2主成分有较大

表2 不同绿化树种叶片重金属含量(平均值±标准误差)及主成分分析

功能区	树种	重金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )							综合得分	排名	
		Zn	Mn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd			
工业 区	夹竹桃	33.65 ± 1.53de	70.30 ± 4.41d	10.75 ± 0.86c	2.85 ± 0.45cd	4.52 ± 0.73ab	2.73 ± 0.24a	0.14 ± 0.02cd	-0.076	3	6
	金边黄杨	31.98 ± 1.54de	24.02 ± 1.54e	8.66 ± 1.25cd	2.51 ± 0.29cd	4.25 ± 1.17ab	1.91 ± 0.50ab	0.05 ± 0.01e	-0.444	7	3
	红花檵木	45.70 ± 6.56cd	17.39 ± 1.42e	16.12 ± 0.57b	7.95 ± 1.45b	4.97 ± 0.77ab	1.96 ± 0.28ab	0.11 ± 0.02de	1.107	3	8
	海桐	81.07 ± 0.92a	39.60 ± 0.92de	8.40 ± 0.95cd	1.26 ± 0.13d	3.19 ± 0.99b	1.71 ± 0.66ab	0.22 ± 0.06b	-0.400	4	4
	紫薇	61.77 ± 8.48b	133.55 ± 10.19c	14.46 ± 1.60b	11.81 ± 1.98a	3.28 ± 0.55b	1.89 ± 0.12ab	0.40 ± 0.05a	0.854	5	7
	红叶石楠	50.62 ± 2.70bc	32.50 ± 2.70e	9.56 ± 1.23c	5.06 ± 1.51bc	2.96 ± 0.32b	2.40 ± 0.51ab	0.29 ± 0.02b	-0.163	1	5
	小蜡树	64.05 ± 4.54b	66.98 ± 6.13d	19.62 ± 1.12a	5.89 ± 0.61b	5.09 ± 1.13ab	1.86 ± 0.21ab	0.09 ± 0.01de	1.353	6	9
	杜英	23.12 ± 3.88e	287.25 ± 9.92a	6.30 ± 0.99d	1.76 ± 0.23d	2.87 ± 0.28b	1.36 ± 0.41b	0.05 ± 0.02e	-1.762	7	1
	香樟	35.47 ± 8.50de	207.56 ± 31.86b	8.36 ± 0.59cd	2.04 ± 0.41d	5.64 ± 0.94a	1.97 ± 0.29ab	0.10 ± 0.01de	-0.468	2	2
商业 交通 区	夹竹桃	29.29 ± 1.33d	64.35 ± 0.50cde	8.64 ± 0.43b	1.78 ± 0.48a	3.72 ± 0.34a	3.37 ± 0.20a	0.10 ± 0.01c	-0.311	8	4
	金边黄杨	24.18 ± 0.19de	24.82 ± 2.73e	9.30 ± 0.11b	2.38 ± 0.24a	3.03 ± 0.08bc	1.56 ± 0.20bcd	0.04 ± 0.01c	-0.700	7	3
	红花檵木	25.98 ± 1.76d	22.72 ± 0.66e	9.13 ± 0.55b	2.49 ± 0.47a	2.97 ± 0.24ab	1.68 ± 0.27bc	0.04 ± 0.01c	-0.802	1	2
	海桐	122.62 ± 4.90a	51.60 ± 2.82de	8.28 ± 1.66b	1.98 ± 0.95a	1.78 ± 0.04de	1.13 ± 0.12cd	0.24 ± 0.01b	0.161	9	5
	紫薇	41.25 ± 2.01c	73.04 ± 2.36cd	14.20 ± 1.43a	2.60 ± 0.33a	2.67 ± 0.48bc	1.72 ± 0.26bc	0.40 ± 0.07a	-1.886	3	1
	红叶石楠	54.99 ± 2.33b	100.35 ± 10.38c	7.36 ± 0.12bc	1.65 ± 0.08a	2.15 ± 0.41cd	1.26 ± 0.08cd	0.10 ± 0.004c	0.677	5	7
	小蜡树	55.07 ± 5.73b	66.66 ± 9.01cde	9.64 ± 3.36b	1.63 ± 0.24a	1.29 ± 0.31e	1.07 ± 0.31bc	0.04 ± 0.01c	0.620	7	6
	杜英	17.22 ± 2.81e	268.53 ± 29.51b	3.99 ± 0.87c	1.79 ± 0.14a	3.28 ± 0.21bc	0.98 ± 0.20d	0.03 ± 0.01c	1.115	6	8
	香樟	25.49 ± 1.40de	446.23 ± 32.45a	7.16 ± 0.46bc	1.74 ± 0.17a	2.57 ± 0.11bcd	1.91 ± 0.24b	0.07 ± 0.01c	1.125	2	9
休闲 娱乐 区	夹竹桃	26.28 ± 2.06de	98.96 ± 4.76d	8.74 ± 0.31cd	2.77 ± 0.13bc	1.74 ± 0.24bc	0.79 ± 0.09ef	0.14 ± 0.01cd	0.737	7	8
	金边黄杨	26.73 ± 2.52de	25.52 ± 1.07e	5.99 ± 0.17de	2.71 ± 0.39bc	3.20 ± 0.28a	1.94 ± 0.29c	0.08 ± 0.02de	0.512	6	5
	红花檵木	19.25 ± 2.55e	12.82 ± 1.45e	12.26 ± 1.06b	2.04 ± 0.25bc	2.17 ± 0.32abc	1.07 ± 0.04def	0.80 ± 0.45de	-0.112	0	3
	海桐	45.52 ± 2.22c	69.98 ± 2.79de	6.53 ± 0.25cde	1.57 ± 0.15c	1.30 ± 0.12c	0.73 ± 0.09f	0.25 ± 0.02b	0.622	2	6
	紫薇	100.39 ± 3.90a	253.41 ± 13.13bc	27.85 ± 2.21a	4.09 ± 1.54ab	3.18 ± 0.61a	3.72 ± 0.55a	0.97 ± 0.07a	-3.248	3	1
	红叶石楠	23.03 ± 1.56de	36.49 ± 5.45de	5.28 ± 0.90e	1.83 ± 0.44c	1.37 ± 0.19c	0.67 ± 0.17f	0.20 ± 0.05bc	1.056	5	9
	小蜡树	54.37 ± 5.53b	302.92 ± 5.34b	13.03 ± 0.76b	3.06 ± 0.95abc	2.40 ± 0.34abc	1.70 ± 0.11cd	0.11 ± 0.03cde	-0.198	0	2
	杜英	20.09 ± 1.34de	775.19 ± 73.07a	6.39 ± 0.64de	4.80 ± 0.58a	2.62 ± 0.12ab	1.50 ± 0.07cde	0.04 ± 0.003e	0.630	9	7
	香樟	27.95 ± 1.17d	188.73 ± 12.26c	9.20 ± 0.60c	3.92 ± 0.77ab	3.21 ± 0.75a	2.68 ± 0.35b	0.12 ± 0.01cde	-0.001	6	4

表3 工业区绿化树种叶面尘重金属的 Pearson

相关系数矩阵

重金属	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Cr	1						
Mn	0.608	1					
Ni	0.878**	0.541	1				
Cu	0.826**	0.719*	0.872**	1			
Zn	0.219	0.656	0.259	0.569	1		
Cd	0.784*	0.532	0.806**	0.838**	0.192	1	
Pb	0.896**	0.483	0.900**	0.885**	0.171	0.808**	1

表4 商业交通区绿化树种叶面尘重金属的 Pearson

相关系数矩阵

重金属	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Cr	1						
Mn	0.730*	1					
Ni	0.841**	0.894**	1				
Cu	0.886**	0.847**	0.905**	1			
Zn	0.713*	0.741*	0.745*	0.790*	1		
Cd	0.556	0.676*	0.798**	0.616	0.431	1	
Pb	0.692*	0.746*	0.733*	0.894**	0.541	0.573	1

表5 休闲娱乐区绿化树种叶面尘重金属的 Pearson

相关系数矩阵

重金属	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Cr	1						
Mn	0.919**	1					
Ni	0.934**	0.994**	1				
Cu	0.961**	0.968**	0.978**	1			
Zn	0.843**	0.893**	0.888**	0.890**	1		
Cd	0.811**	0.816**	0.818**	0.817**	0.803**	1	
Pb	0.962**	0.791*	0.818**	0.872**	0.750*	0.762*1	1

的载荷量(贡献率17.71%)。交通区绿化树种叶面尘中Mn、Ni、Cu是第1主成分的主要元素(贡献率77.47%),Zn和Cd在第2主成分的载荷量较大(贡献率8.93%)。结合2个功能区在主成分的得分和综合得分,可对工业区和商业交通区绿化树种叶面尘重金属含量进行排名,结果显示:工业区的海桐和红叶石楠,商业交通区的香樟和小蜡树的叶面尘重金属元素含量高。

表6 工业区和商业交通区绿化树种叶面尘重金属主成分分析

树种	工业区			商业交通区		
	PC1	PC2	排名	PC1	PC2	排名
红花檵木	1.023	1.193	6	1.045	0.602	7
小蜡树	-1.673	1.541	4	-3.309	0.927	2
紫薇	-0.098	0.992	5	0.249	0.872	5
香樟	-0.845	-1.822	3	-4.247	-1.542	1
杜英	1.428	0.846	8	2.612	-0.784	8
红叶石楠	-1.467	-0.671	2	-0.381	0.229	3
金边黄杨	1.530	-0.210	7	1.084	-0.224	6
夹竹桃	4.168	-1.160	9	3.232	-0.560	9
海桐	-4.066	-0.708	1	-0.285	0.481	4
因子贡献率/%	71.44	17.71		77.48	8.93	
累积贡献率/%	71.44	89.15		77.48	86.41	

### 2.3.3 叶面尘重金属与叶片重金属含量的关系

不同绿化树种的叶面尘重金属含量见表7。以叶面尘重金属含量作为参照与叶片重金属进行对比,发现只有叶片重金属Mn含量高于叶面尘,其它叶片重金属含量均低于叶面尘的含量,其中,Pb在3个功能区(工业区、商业交通区、休闲娱乐区)的含量远低于叶面尘重金属含量,均占叶面尘含量的1/10,叶片中Cd含量略低于叶面尘中的Cd含量。将叶面尘Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb含量与叶片重金属含量作相关分析(表8),不同绿化树种叶片重金属含量与其对应的叶面尘重金属含量之间的相关关系不显著,甚至有的呈负相关,说明本研究中叶面尘重金属含量对植物叶片重金属含量的影响不显著。

表7 不同绿化树种叶面尘重金属含量

功能区	来源	重金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )						
		Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
工业 区	叶片	4.09	97.68	4.57	11.36	47.49	0.16	1.98
	叶面尘	15.76	48.98	6.97	21.30	105.10	0.26	18.84
	叶片/叶面尘	0.26	1.99	0.66	0.53	0.45	0.62	0.11
商业 交通 区	叶片	2.61	124.26	2.00	8.64	44.01	0.12	1.63
	叶面尘	19.09	67.24	6.85	29.96	147.35	0.19	17.43
	叶片/叶面尘	0.14	1.85	0.29	0.29	0.30	0.63	0.09
休闲 娱乐 区	叶片	2.35	196.00	2.98	10.59	38.18	0.26	1.64
	叶面尘	17.18	49.36	9.82	22.60	105.35	0.45	23.62
	叶片/叶面尘	0.14	3.97	0.30	0.47	0.36	0.58	0.07

表8 不同绿化树种叶面尘与叶片重金属含量的相关系数

重金属元素	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
相关系数	-0.304	0.056	-0.053	0.030	0.253	-0.040	0.030

## 3 讨论

### 3.1 不同绿化树种的叶片滞尘能力

不同绿化树种的滞尘能力存在差异,这主要与

其形态、树冠总叶面积、叶片表面的特征(皱纹、粗糙、有无绒毛、蜡质结构与形态等)以及植物自身的润湿性和植物高度有关<sup>[28]</sup>。通常叶片粗糙、凹凸不平、有密集纤毛或可分泌粘液的树种滞尘能力强;反之叶片表面光滑、结构平整,叶片下倾则滞尘能力弱<sup>[2,12,29]</sup>。绿化树种叶片的滞尘方式主要有4种:滞留为主、附着为主、滞留与附着相间形式和粘附形式<sup>[24]</sup>,这几种方式通常同时进行,但不同滞尘方式其作用机理存在差异<sup>[14,30]</sup>。附着方式的降尘主要依靠较大的降雨量冲刷,滞留或附着方式的滞尘需靠风吹走降尘颗粒,粘附作用在某些能产生分泌物的树种中存在,如夹竹桃,这种方式可对颗粒物起到固定作用<sup>[14]</sup>。王建辉<sup>[2]</sup>等研究表明,海桐的滞尘量比其它灌木大,滞尘能力较强,这与本研究结果有类似之处。在本研究中,同一尘源条件下,夹竹桃、海桐和紫薇等有较强的滞尘能力,而小蜡树和樟树的滞尘能力较弱。从叶面特征分析,夹竹桃叶表可分泌粘性物质,而香樟叶表光滑有革质,故和夹竹桃相比滞留粉尘能力弱。香樟的叶片面积虽大于夹竹桃,但叶片厚度相对于夹竹桃较薄,且香樟属于乔木,树种相对高大,对于近地面粉尘吸滞能力较差。商业交通区车辆频繁、人群聚集,易造成地面扬尘,因此商业交通区内的灌木较乔木更容易接触到尘埃,但灌木树种小蜡树,由于叶片较薄且叶面积小,其吸滞粉尘的能力较海桐和红花檵木低得多。本研究发现,休闲娱乐区内的乔木树种杜英和香樟,其滞尘能力相对较弱。乔木树种叶片面积虽相对灌木树种较大,但它们的滞尘能力却不如一些灌木树种(如金边黄杨和红花檵木)。由此可见,对于粉尘颗粒物来源于近地面尘的区域内,灌木树种对粉尘的吸滞效果高于乔木树种。

绿化树种的滞尘能力与植物种类和所处环境有关。研究表明,同一树种在不同功能区的滞尘能力差异显著,植物滞尘能力与环境污染程度有关,在工业区和商业交通区单位叶面积滞尘量大于清洁区,这与邱媛等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。

### 3.2 不同绿化树种的叶片重金属含量

绿化树种对大气中颗粒污染物和其中的重金属具有一定吸滞能力。不同树种叶片结构存在差异,对重金属的吸收能力不同。叶片中重金属一部分来源于尘埃中的重金属,通过气孔进入叶片内部,一部分来源于树木对土壤中重金属的吸收和转运<sup>[31]</sup>。因此,利用常见的园林绿化树种治理大气重金属污染也具有一定的局限性<sup>[32]</sup>。

不同功能区同一树种叶片重金属含量存在一定差异,其含量随着环境污染程度的增加而升高。一般而言,工业区和商业交通区的重金属含量明显高于休闲娱乐区,可能是因为工业区位于余姚市泗门镇工业园,此功能区内有许多工业污染源,能够造成很多重金属的释放;商业交通区位于国道附近,由于汽车尾气的排放以及发动机、汽车轮胎的磨损都会释放 Zn、Cu 和 Pb 等重金属元素,造成大气重金属污染<sup>[31]</sup>。因为植物可通过叶片气孔吸收大气尘埃中的重金属元素,可能导致工业区植物叶片 Zn 和 Cu 的平均含量高于商业交通区和休闲娱乐区。这表明在一定浓度范围内,大气环境污染程度严重的地方,植物叶片对污染物的吸收能力也会随着污染程度的增加而被动增强。在车流量较大的商业交通区,由于受汽车尾气的影响,植物叶片中 7 种重金属元素含量明显高于对照区,尤其 Pb 和 Cr 含量,当地大气污染中汽车尾气排放量可能在一定程度上影响植物的生理生态特征<sup>[33-36]</sup>。同一功能区中绿化树种叶片的重金属含量也存在一定差异,由于各树种生理生长特性及吸收、积累重金属的能力不同,从而导致不同树种的重金属含量也不同。综合比较同一功能区不同树种及不同功能区相同树种叶片重金属含量,再根据各功能区主成分分析结果得知,紫薇、金边黄杨和红花檵木等叶片对重金属元素有较强的积累作用,而红叶石楠、小蜡树和夹竹桃较弱。因此,在城市绿化和生态建设中,选用重金属积累能力较强的树种,对大气污染的鉴别、治理和控制均有重要意义<sup>[31]</sup>。

### 3.3 叶面尘重金属来源分析

Zn、Cu 和 Mn 主要来自于工业排放、交通排放

和土壤母质<sup>[37]</sup>。Ni 主要来自于土壤母质<sup>[38]</sup>,部分来源于工业排放和路面材料的磨损<sup>[39]</sup>,由于后者富集程度小,故认为土壤母质是 Ni 的主要来源。结合相关分析发现,工业区 Cr、Ni、Cu、Pb、Cd 这 5 种元素显著正相关,说明它们同源性较高,其中,Cr、Ni、Cu 也是第 1 主成分的主要元素,据此认为该功能区的主要驱动因子为大气降尘,是融合工业、土壤母质、建筑材料等多种混合源。叶面尘中重金属元素 Cu、Mn、Zn 在商业交通区的富集程度最高,它们的扩散能力由大到小依次为 Zn、Mn、Cu,推测此功能区交通排放为主要驱动因子。工业区的叶面尘重金属含量一般高于道路交通区叶面尘,可能是因为 2 个功能区环境中的颗粒物粒径不同,工业区的主要污染源为工业源非交通排放,空气中颗粒物多为小颗粒,而交通环境中含有很多大粒径颗粒物,从而稀释叶面尘重金属含量。工业区和商业交通区绿化树种叶面尘中的重金属元素具有很高的同源性,融合多种工业源的大气降尘是工业区叶面尘的主要贡献者,道路交通排放则是商业交通区的主要驱动力。因此,大气降尘、路面扬尘和交通排放是叶面尘的重要来源。

试验结果表明,植物叶片重金属含量与叶面尘重金属含量不存在明显的正相关关系,即叶片中的重金属含量只有很少一部分来源于大气粉尘,这与部分研究结果不一致<sup>[10,40-42]</sup>。分析其原因,粉尘虽直接与叶表面接触,但其进入叶片内部的途径可能受到粉尘粒径大小限制,进而影响其在叶片内的富集。不同绿化树种在不同环境中对重金属的吸收积累机制也可能存在差异。本研究发现,从大气粉尘中吸收的重金属不是植物叶片重金属富集的主要来源,叶片中的重金属含量很可能受土壤背景值影响。叶片重金属的可能来源是树木对土壤中重金属的吸收和转运<sup>[28]</sup>,或者是源于尘埃中的重金属通过气孔进入叶片内部。不同树种叶片结构存在差异,对重金属的吸收能力不同。绿化树种对一定浓度范围内的大气污染物具有吸滞能力,利用常见的园林绿化树种治理大气重金属污染也具有一定的局限性<sup>[31]</sup>。

## 4 结 论

浙东平原余姚市泗门镇的工业区、商业交通区和休闲娱乐区内 9 种常见绿化树种叶片滞尘能力和叶片重金属积累能力存在显著差异。叶片滞尘能力以夹竹桃、海桐和紫薇较强;叶片重金属元素积累能

力以紫薇、金边黄杨和红花檵木较强,而夹竹桃、小蜡树和红叶石楠较弱。根据城镇功能区特点,适当选用滞尘能力较强以及对重金属元素有较强积累作用的树种,合理配置乔灌木树种,对改善城镇空气质量发挥积极作用。绿化树种在不同季节的叶片滞尘及重金属吸收能力、叶片滞尘能力与重金属积累能力的关系尚需继续研究。

## 参考文献:

- [1] 刘霞,李海梅. 园林植物滞尘效应的研究[J]. 北方园艺,2007(8):73-76.
- [2] 王建辉,刘奕清,邹敏. 永州城区主要绿化植物的滞尘效应[J]. 环境工程学报,2013,7(3):1079-1084.
- [3] Zhang W K, Wang B, Niu X. Study on the adsorption capacities for airborne particulates of landscape plants in different polluted regions in Beijing (China) [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(8):9623-9638.
- [4] EL-Khatib A A, El-Rahman A M, Elsheikh O M. Leaf geometric design of urban trees: Potentiality to capture airborne particle pollutants [J]. Journal of Environmental Studies, 2011, 7: 49-59.
- [5] Beckett K P, Freer Smith P, Taylor G. Effective tree species for local air quality management[J]. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1):12-19.
- [6] 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):170-173.
- [7] 王会霞,石辉,李秧秧,等. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3077-3082.
- [8] 曹秀春,孟庆繁. 城市绿化带对大气污染的防护效能[J]. 东北林业大学学报,2007,35(10):20-21.
- [9] 王成,郟光发,杨颖,等. 高速路林带对车辆尾气重金属污染的屏障作用[J]. 林业科学,2007,43(3):1-6.
- [10] 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.
- [11] 廖莉团,苏欣,李小龙,等. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述[J]. 森林工程,2014,30(2):21-28.
- [12] 柴一新,祝宁,韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1121-1126.
- [13] 胡舒,肖昕,贾帅师,等. 徐州市主要落叶绿化树种滞尘能力比较与分析[J]. 中国农学通报,2012,28(16):95-98.
- [14] 郭伟,申屠雅瑾,郑述强,等. 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,2010,19(6):1465-1470.
- [15] 陈玮,何兴元,张粤,等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2113-2116.
- [16] 高金晖,王冬梅,赵亮,等. 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例[J]. 北京林业大学学报,2007,29(2):94-99.
- [17] 李海梅,刘霞. 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1659-1662.
- [18] 江胜利. 杭州地区常见园林绿化植物滞尘能力研究[D]. 浙江临安:浙江农林大学,2012.
- [19] 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[D]. 南京:南京林业大学,2004.
- [20] 陈自新,苏雪痕,刘少宗. 北京城市园林绿化生态效益的研究[J]. 中国园林,1998,14(5):51-54.
- [21] 赵松婷,李延明,李新宇,等. 园林植物滞尘规律研究进展[J]. 北京园林,2013,29(1):25-30.
- [22] 刘璐,管东生,陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力[J]. 生态学报,2013,33(8):2604-2614.
- [23] 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.
- [24] 赵勇,李树人,阎志平. 城市绿地的滞尘效应及评价方法[J]. 华中农业大学学报,2002,21(6):582-586.
- [25] 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.
- [26] 林舜华,黄银晓,姚依群,等. 以植物土壤元素含量评价天津大气环境质量[J]. 植物学报,1989,31(1):57-65.
- [27] 蒋炳言,方凤满,汪琳琳. 芜湖市区地表灰尘中重金属空间分布特征及来源分析[J]. 安全与环境学报,2010,10(5):107-112.
- [28] Prajapati S K, Tripathi B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(3):865-870.
- [29] 余曼,汪正祥,雷耘,等. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究[J]. 环境工程学报,2009,3(7):1333-1339.
- [30] 王赞红,李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态[J]. 生态环境,2006,15(2):327-330.
- [31] 李少宁,孔令伟,鲁绍伟,等. 北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究[J]. 环境科学,2014,35(5):1891-1900.
- [32] 欧阳勋志,廖为明,刘国华. 城市森林绿地建设的生态学思考[J]. 江西农业大学学报:自然科学版,2002,24(5):72-75.
- [33] 殷云龙,骆永明,张桃林,等. 南京市城乡公路蜀桧叶片中金属元素和氮、硫含量分析[J]. 应用生态学报,2005,16(5):929-932.
- [34] 姜虎生,汤洁,刘丽. 城市公路两侧树叶铅、镉含量的测定[J]. 甘肃科学学报,2008,20(4):48-50.
- [35] 胡星明,王丽平,杨坤,等. 城市道路旁小蜡叶片对重金属的富集特征[J]. 环境化学,2009,28(1):89-93.
- [36] 王崇臣,黄忠臣,王鹏. 北京四环公路两侧植物铅、镉污染现状调查[J]. 环境化学,2009,28(4):604-605.
- [37] 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.
- [38] 张一修,王济,秦樊鑫,等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报,2012,32(1):201-212.
- [39] Hjortenkrans D, Bergback B, Haggerud A. New metal emission patterns in road traffic environments [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 117(1/3):85-98.
- [40] 庄树宏,王克明. 城市大气重金属(Pb、Cd、Cu、Zn)污染及其在植物中的富集[J]. 烟台大学学报,2001,13(1):31-37.
- [41] 马跃良,贾桂梅,王云鹏,等. 广州市区植物叶片重金属元素含量及其大气污染评价[J]. 城市环境与城市生态,2001,14(6):28-30.
- [42] 任乃林,陈炜彬,黄俊生,等. 用植物叶片重金属元素的含量指示大气环境污染的研究[J]. 广东微量元素科学,2004,11(10):41-45.