

江畅,殷杉,陶士康,等.上海典型植物叶表滞尘离子组成及差异分析[J].环境科学与技术,2018,41(4):85-90. Jiang Chang, Yin Shan, Tao Shikang, et al. Ion composition and variance analysis of particulates deposited on plant leaves of typical tree species in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(4): 85-90.

上海典型植物叶表滞尘离子组成及差异分析

江畅^{1,2,3}, 殷杉^{1,2,4*}, 陶士康³, 朱鹏华^{1,2}, 刘春江^{1,2,4}

(1. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 2. 上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240; 3. 上海市环境科学研究院, 上海 200003; 4. 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240)

摘要:城市植被对大气颗粒物的滞纳是削减城市大气污染的重要途径。该研究使用单颗粒飞行时间质谱仪(SPAMS)在2016年7月-2017年4月期间对上海市2个典型污染区(吴泾工业区、松江交通枢纽)的大气颗粒物、自然降尘和4种典型绿化植物(香樟 *Cinnamomum camphora*、二球悬铃木 *Platanus acerifolia*、龙柏 *Sabina chinensis*、水杉 *Metasequoia glyptostroboides*)叶片表面滞尘的离子组成进行了一年四季共39 d的测定,结果表明:(1)上海典型污染区大气颗粒物、自然降尘和典型绿化树种叶片上滞留的颗粒物的主要离子成分依次为CN⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄⁻、Cl⁻等,不同类别的离子占比存在显著差异;(2)4树种均对主要来源于扬尘的Fe⁺有着明显的吸附特征,但香樟与水杉叶片表面滞尘与同期自然降尘中的离子组成较为接近,表明2树种叶表滞尘过程受所在地区大气环境影响较大;而龙柏和悬铃木叶片滞尘的离子组成与同期降尘成分存在明显差异,在滞尘过程中表现出对特定离子的专属吸附特性。最后提出针对不同空气污染区选配更高效滞尘树种的建议,为提高城市植被的生态系统服务功能提供技术支撑。

关键词:大气颗粒物; 离子组成; 绿化树种; 吸附特性; 气溶胶飞行时间质谱(SPAMS)

中图分类号:X513 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.04.015 **文章编号:**1003-6504(2018)04-0085-06

Ion Composition and Variance Analysis of Particulates Deposited on Plant Leaves of Typical Tree Species in Shanghai

JIANG Chang^{1,2,3}, YIN Shan^{1,2,4*}, TAO Shikang³, ZHU Penghua^{1,2}, LIU Chunjiang^{1,2,4}

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Urban Forest Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200003, China; 4. Key Laboratory for Urban Agriculture(South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China)

Abstract: Urban vegetation plays an important role in air pollution reduction. In this study, the single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) was applied to the measurement of ion composition of atmospheric particulates, natural dust-fall and ion composition of the particulates retained on plant leaves of such tree species as *Cinnamomum camphora*, *Platanus acerifolia*, *Sabina chinensis*, *Metasequoia glyptostroboides* in two typical polluted regions (Wujing Industrial Region and the Songjiang Traffic Hub) in Shanghai during the period from July 2016 to April 2017. The findings of the study suggested that main ionic components of the atmospheric particulates, dust-fall and particulates retained on plant leaves were CN⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄⁻, Cl⁻ etc, and the proportion varied with ion types. A notable characteristics of iron adsorption were found in four tree species, which mainly came from dust, and the ion composition of particulates on *Cinnamomum camphora* and *Metasequoia glyptostroboides* leaves was relatively close to that of dust-fall within the same period, which indicated the influences of the local ambient air; on the other hand, there were significant discrepancy of the ion proportion between dust-fall and the particulates on *Sabina chinensis* and *Platanus acerifolia* and leaves, implying that these two tree species had an exclusive character of adsorption to some specific chemical compositions. Finally, proposals were put forward regarding the selection of proper tree species in the specific polluted areas for better dust-retention so that the ecosystem services of urban vegetations could be upgraded.

Key words: atmospheric particulate matter; chemical composition; greening tree species; adsorption characteristics; single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS)

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://jks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2017-10-30;修回2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31400605, 71333010)

作者简介:江畅(1993-),男,硕士研究生,主要从事城市森林生态研究(电子信箱)c.john@situ.edu.cn;*通讯作者,(电子信箱)yinshan@situ.edu.cn。

大气颗粒物对城市环境和人体健康皆有重要影响,是城市雾霾形成、大气能见度下降的重要诱因之一,主要来自于火山灰、植物的花粉、汽车尾气、道路扬尘、煤炭燃烧、工业废气、建筑粉尘等各类污染源^[1]。上海是位于我国长江三角洲地区的特大型城市 and 全国经济最为发达的地区,除了高密度的人口外,还密集分布着交通路网和各类工业基地,复杂的污染来源使得大气颗粒物污染问题尤为突出。不同的城市功能区由于在自然环境、产业结构等方面存在差异,使得大气颗粒物的成分构成也不尽相同,不仅包括 SO_4^- 、 NO_3^- 等无机盐类,还包含多环芳烃等化合物、重金属元素以及含碳组分等多种成分^[2]。城市的森林植被可以降低局部风速增加湿度,且叶片具备一定的生理结构,可以有效沉滞大气中悬浮的颗粒物,改善空气质量,已被证明是应对城市空气污染问题的有效途径^[3,4]。如何能够更为高效地利用植被解决日益严重的城市大气污染,已经成为当前极具现实意义的问题。

近年来国内外学者对大气颗粒物的化学组成以及植物的滞尘功能等方面都进行了探索,如Poppek等发现不同树种对大气颗粒物的吸附能力可差异10~20倍^[5],柴一新等证明植物叶片表面湿润性、表面自由

能、粗糙度等性质与植物对大气颗粒物的捕捉效率密切相关^[6],王赞红等发现植物滞尘能力的种间差异显著^[7],Yang等利用飞行时间质谱仪(ATOFMS)研究了夏季草酸颗粒物的混合状态与形成机制^[8],牟莹莹等利用气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)研究了上海秋季颗粒物在污染过程中的老化与衰减状态等^[9]。但目前关于植物滞尘效应的相关研究大多集中于植物自身特性与滞尘的速率的关系,对植物滞尘化学组成的研究还尚显薄弱。因此,本文利用SPAMS设备,对上海典型污染区大气、自然降尘和植物叶片上滞纳的单颗粒气溶胶的质谱特征与离子组成进行观测,分析了不同植物之间、植物—降尘之间滞纳颗粒物离子组成的差异,从而有助于针对不同的颗粒物成分构建更高效的城市森林防控体系,为提高城市森林的生态系统服务提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 采样树种、地点与时间

本研究选取了4种近10年生上海常见园林绿化树种作为研究对象(表1),分别代表常绿阔叶、落叶阔叶、常绿针叶、落叶针叶树种等树种类型。

采样地点分别位于上海闵行区的吴泾工业区

表1 所选树种特征
Table 1 Characteristics of the selected tree species

树种	科	叶形	叶序	叶质	平均株高/m
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科	椭圆形	互生	近革质	4.5
龙柏 <i>Sabina chinensis</i>	柏科	针形	轮生	鳞叶质	3.0
二球悬铃木 <i>Platanus acerifolia</i>	悬铃木科	三角形	互生	纸质	6.0
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	杉科	针形	羽状	鳞叶质	8.0

(31°02'N, 121°28'E)的吴泾公园内,和上海松江区的松江交通枢纽(31°02'N, 121°13'E)绿化带内。吴泾工业区以氯碱厂、水泥厂等制造工业、化学工业和燃煤电厂为主要污染源;松江交通枢纽以道路扬尘和汽车尾气为主要污染源,且附近5 km内无工业排放源,周边车辆以小轿车为主,二者可以良好表征上海典型的大气污染区状况。

本研究在2016年7-8月期间对两区域进行了连续12 d的集中观测,并在2016年10月25日-11月2日,2017年1月6-14日,2017年4月15-23日分季度再次进行3次连续采样观测,分别代表夏、秋、冬和春季,测定时长共计39 d。采样期间各采样地点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与同期上海市平均大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度无显著差异,具有较好的代表性。

1.2 样品的采集方法

1.2.1 叶片样品的采集

选择在采样前7 d内没有降水,且风速均 $<5 \text{ m/s}$

的稳定天气状况下进行叶片采样。在各样地内,按空间分布均匀选择5棵树龄处于5~10年,且生长发育状况良好的植株作为采样植物,叶片采集于样本植株的东、南、西、北4个方向,高度处于所采集树高约2/3处,根据叶片形态大小使用枝剪在各株植物上采集约20~100片不等的叶片,保证所采集样本的叶面积处于同一数量级,并在取样后立即密封于纸质密封袋中,保持储物袋干燥并密闭。

1.2.2 大气样品的采集

大气采样的容器为15 L玻璃抽滤瓶,抽滤瓶顶部用橡皮塞密封,外表面用锡纸进行遮光保护,并整体放入遮光纸箱中,仅留胶皮管作通气用。采样前容器用纯净氮气清洗3次,并抽成负压。带至采样地点的开阔处,将抽滤瓶进出气口的阀门打开并连接抽气泵,将大气样品从抽滤瓶顶部采集至瓶中,采样时间为5 min,抽气泵的抽气量 $>60 \text{ L}$,最终保证抽滤瓶中的气体完全与该采样点大气一致。每个点采集3瓶共

45 L 气体样品,采样结束后迅速关闭阀门,并带回实验室立刻进行测试。在采样期间,每日早晚各采集一次(9:00 和 16:00),以逐日累积的分析结果作为该季节大气颗粒物的测试值。

1.2.3 降尘样品的采集

在采集植物叶片样品的同一时间段,将陶瓷质降尘采集器(直径 40 cm)放置在采样点周围约 2 m 的离地高度上,每个地点放置 3 套采集器,在非降雨的自然条件下采集大气中自由沉降的颗粒物,放置时间为 7 d(168 h),之后将采集到的降尘样品密封并带回实验室。

1.3 颗粒物成分解析方法

本研究采用自主研发的烟雾箱结合单颗粒飞行时间质谱仪(SPAMS, Single Particle Aerosol Mass Spectrometer, 型号 SPAMS0515, 广州禾信分析仪器有限公司生产)共同对颗粒物正负离子组成进行测定。研究所用烟雾箱容积为 338 L,内部保持 20 °C 恒温并固定相对湿度为 20%,在测试前通过自动清洗装置使用纯净氮气冲洗烟雾箱内腔,使腔体内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度均达到 2 μg/m³ 以下,以排除内腔原有空气杂质干扰。在测试过程中,烟雾箱保持密封,箱内使用强风吹蚀样品,使其在自然条件下吸附的颗粒物从表面脱落并重新释放到空气中,在吹蚀的同时使用软毛刷擦拭样品表面,以弥补强风可能无法全部吹脱颗粒物的缺陷,使样品表面滞留的颗粒物完全释放于烟雾箱内部并再悬浮形成气溶胶。测定大气中颗粒物成分则直接将采有大气样品的抽滤瓶与 SPAMS 设备连接进行测试。

待烟雾箱内部形成稳定气溶胶后,将连接 SPAMS 的阀门打开,烟雾箱内气体以 0.75 L/s 的流速被吸入 SPAMS。SPAMS 的原理是使颗粒物颗粒在空气动力学透镜作用下聚焦成粒子束,随后逐一通过测径区,由两束 532 nm 测径激光器组成的测径系统测定空气动力学直径,随后颗粒物粒子进入电离区,

由 266 nm Nd-YAG 紫外脉冲激光电离产生正负离子,然后离子被双极型飞行时间质量分析器检测,得到颗粒物的正负离子信息^[10]。研究使用的 SPAMS 设备测径范围为 200 nm~20 μm,分辨率为 500,质谱测定的质荷比范围为±250,测试期间主要参数均符合该设备正常分析要求。

1.4 数据处理方法

SPAMS 设备采集数据的软件为基于 MATLAB 平台的 YAADA 软件(Version 2.1),软件运行 3 个主要参数为警戒因子 0.75,学习因子 0.05,迭代次数 20。观测期间共采集测径颗粒物个数 1 172 920 个,其中经电离测定的正负离子信息的颗粒物共 90 630 个。

首先基于电离的颗粒物信息,使用 MATLAB 平台获取颗粒物的质荷比、质谱图等信息,结合相对峰面积等判定其离子成分^[11]。最后使用 Excel 和 SPSS 等软件进行数据分析,使用 Origin 绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 上海典型污染区大气、降尘及叶表颗粒物的离子组成

通过 MATLAB 分析得到了研究期间各类样品中含有特定离子成分的颗粒物信息,并筛选得出了数量靠前的 16 种离子成分的颗粒物成分相对占比情况,如图 1 所示。由于单颗尘埃中含有多种离子成分,因此该比例为含特定离子成分颗粒物的相对占比情况。颗粒物电离后的不同离子的电荷数各有差异,图中各离子带的“+、-”符号仅代表含有该元素(或物质)离子的正负价态,不代表所带电荷情况,下同。

由图 1 可知,其中占比最高的成分为 PO₃⁻、Cl⁻ 等水溶性无机盐离子和 CN⁻(碳氮负离子,非氰根离子),其中 CN⁻ 主要由空气中 N₂ 电离后与有机物的碳原子或颗粒物中的元素碳结合形成的,属于大气中二次形成的离子。其次为 SO₄⁻、NO₃⁻ 等酸性二次离子,最后则是 Cr⁺、Pb⁺、Cu⁺ 等重金属离子,该类别也是对

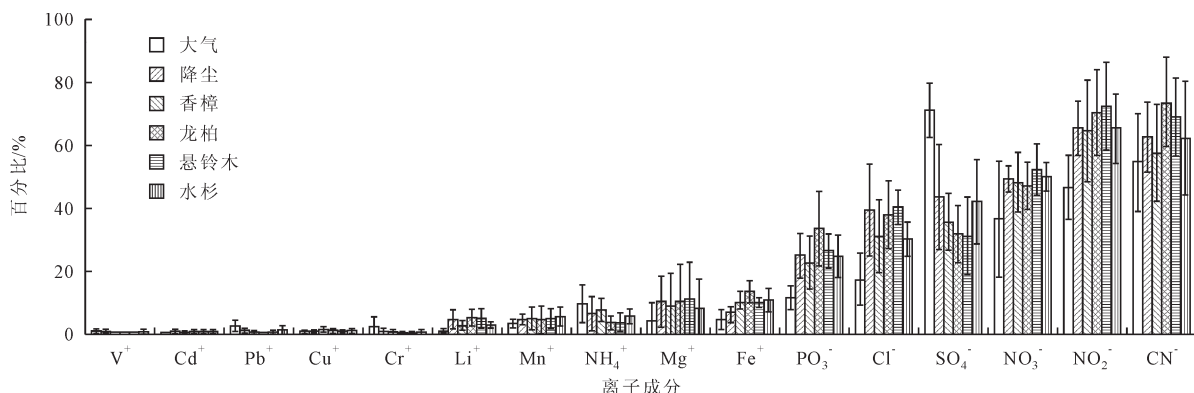


图1 全年尺度各类别样本离子占比情况

体危害最大的颗粒物成分之一^[12-15]。在数量关系上,不同离子类别间差异较大,相对占比的最大差值可达150倍以上;但同类离子在不同介质上的分布占比则较为接近,差异多在3倍以内,说明在同一区域内,大气、自然降尘和植物叶片滞尘中的颗粒物的化学组成具有一定的稳定性。由于 SO_4^- 、 NO_3^- 等一般被认为来自于含碳燃料高温燃烧过程或机动车尾气排放中的二次转化过程,而 PO_3^- 、 Cl^- 等水溶性无机盐则可能来自于地壳表层元素或化工生产中的原料排放, Cr^+ 、 Pb^+ 、 Cu^+ 则主要来自于汽车尾气、水泥工业等^[16-19],说明本研究所测定样本的大气颗粒物成分结构来源较为复杂。

2.2 典型树种叶片滞尘与自然降尘中离子组成的差异

表2列出了两地一年内4树种叶表滞尘与自然降尘中的离子成分组成。为探索植物叶片滞尘与自然降尘成分的差异,本研究对4种树种叶片滞尘与自然降尘的离子成分分别做了配对样本 t 检验:若检验结果显示某植物叶表滞尘离子成分与自然降尘间无显著性差异,则表明该植物对大气颗粒物的滞留主要是受外部环境的影响,其过程近似于自然降尘的形成;若植物叶表滞尘中多种离子成分与自然降尘有显著差异,则表明该植物叶片受叶面结构、叶表分泌物等生理学因素的影响,对不同成分的大气颗粒物滞纳过程存在一定的筛选机制,并可根据树种叶表吸附离子成分占比情况推断出该树种对特定成分颗粒物的吸附特征。

由表2可知,外部环境对本次测定的4类植物叶

表2 树种叶片滞尘与自然降尘中离子成分差异性
Table 2 Difference between dust on leaves and natural dust of ion composition

离子成分	降尘	香樟	龙柏	二球悬铃木	水杉
Mg^+	10.38 ± 8.09	9.11 ± 10.17	10.41 ± 11.81	11.16 ± 11.74	8.20 ± 9.36
NH_4^+	6.70 ± 5.52	7.69 ± 3.57	3.87 ± 1.88	3.83 ± 3.00	5.84 ± 2.33
Fe^+	7.02 ± 1.88	10.13 ± 3.50*	13.54 ± 3.44*	10.17 ± 1.33*	10.82 ± 3.69*
Pb^+	1.18 ± 0.64	0.74 ± 0.42	0.49 ± 0.29*	0.70 ± 0.59	1.50 ± 1.32
Cd^+	0.80 ± 0.80	0.52 ± 0.59	0.72 ± 0.61	0.92 ± 0.47	0.85 ± 0.61
V^+	0.91 ± 0.62	0.50 ± 0.29	0.39 ± 0.29*	0.39 ± 0.29*	0.85 ± 0.76
Mn^+	4.77 ± 1.60	5.05 ± 3.59	4.88 ± 4.11	5.03 ± 3.03	5.63 ± 2.91
Li^+	4.87 ± 3.09	2.90 ± 1.45	5.22 ± 2.88	5.00 ± 3.04	3.06 ± 0.95
Cu^+	0.87 ± 0.50	1.44 ± 0.91	1.19 ± 0.38*	1.09 ± 0.41	1.20 ± 0.54
Cr^+	0.95 ± 1.04	0.77 ± 0.62	0.39 ± 0.48	0.39 ± 0.42	0.75 ± 0.77
CN^-	62.42 ± 11.08	57.29 ± 15.70	73.38 ± 14.60*	68.92 ± 12.49*	62.08 ± 18.21
PO_3^-	25.07 ± 7.07	22.77 ± 8.45	33.48 ± 11.83	26.46 ± 5.50	24.71 ± 6.86
NO_2^-	65.31 ± 8.63	64.43 ± 16.13	70.14 ± 13.64	72.11 ± 13.86*	65.32 ± 10.86
NO_3^-	49.16 ± 4.18	48.19 ± 9.44	46.99 ± 7.58	52.21 ± 8.24	50.00 ± 4.47
Cl^-	39.37 ± 14.52	31.12 ± 11.79	37.85 ± 10.91	40.49 ± 5.17	30.10 ± 5.63
SO_4^-	43.63 ± 16.58	35.62 ± 9.18	31.78 ± 9.20*	31.05 ± 12.42	41.97 ± 13.34

注:*该成分与同期自然降尘存在显著差异。

片滞尘过程有较大影响。本研究测定的各树种中,龙柏与悬铃木叶片在吸滞大气颗粒物时对颗粒物特定离子成分表现出一定的筛选机制,其中龙柏的叶片滞尘中有6种离子成分与同期自然降尘中的该成分有显著性差异($P < 0.05$),悬铃木叶片滞尘中有4种离子成分有此差异($P < 0.05$);而香樟与水杉2树种叶片滞尘则各仅有1种离子成分与自然降尘存在此类差异($P < 0.05$),说明香樟与水杉叶片的滞尘过程较易受到所在地区外部大气环境的影响。参考各植物的叶片特征(表1)可知,香樟与水杉2树种由于叶表呈革质,表面较为光滑平整,因此其叶表的滞尘过程可能主要基于大气颗粒物的自然沉降,植物本身的生理特性影响并不显著;龙柏叶表则有较为明显的油脂性分泌物,该物质在吸滞大气颗粒物的过程中可能更易溶解特定成分的元素;而悬铃木的叶片表面则呈纸质且着生有

细小绒毛,在吸附降尘过程中该绒毛状结构会产生一定影响,且绒毛自身也会成为尘埃的一部分,因此2树种叶表颗粒物表现出与降尘成分的差异性^[20]。

2.3 不同树种之间滞尘成分的异同

综合全年尺度下各类别离子成分占比均值情况(表2),可知各树种在滞尘过程中倾向吸附的颗粒物离子成分类别。其中香樟与水杉对含 Fe^+ 的颗粒物,龙柏对于含 Fe^+ 、 Cu^+ 、 CN^- 等成分的颗粒物,悬铃木对含 Fe^+ 、 CN^- 、 NO_2^- 等成分的颗粒物有着高于同期降尘颗粒物占比情况的吸附比例,并与同期自然降尘中同类成分占比存在着显著差异($P < 0.05$)。由此可见,在滞尘过程中,4种植物种均对 Fe^+ 有着高于同期自然降尘的吸附比例,表现出高度的选择性,其中龙柏对 Fe^+ 的富集效果最强。由于 Fe^+ 是重要的地壳元素,主要来源于岩石和矿物的风化,在土壤中含量较高,因

此大气颗粒物中的 Fe^+ 主要来源于地面扬尘。因此可知,植物叶片对大气颗粒物中的扬尘普遍具有较好地滞纳作用,这可能与扬尘颗粒的粒径较大、产生源较为低矮有关^[21]。

各树种叶片所偏好吸附的元素成分也存在着差异:龙柏与悬铃木偏好沉降的颗粒物离子成分种类较香樟与水杉丰富,这些离子在龙柏与悬铃木叶片上的积累占比也高于香樟与水杉,说明龙柏与悬铃木更适合作为在特定成分颗粒物来源地的绿化树种。其中龙柏对金属离子的吸附特征表现更为明显,悬铃木则更倾向吸附含无机盐离子的颗粒物。各树种均对 Fe^+ 有着显著的吸附过程且叶片滞纳量高于大气同期,鉴于 Fe^+ 与扬尘的密切关系,表明在建筑施工等粉尘来源地,4类树种均可作为良好的滞尘植物使用。据此可建议在金属冶炼工业密集分布区可多种植龙柏作为滞尘植物,在化工业聚集区种植悬铃木作滞尘植物,在建筑工地等扬尘产生源则可将各树种组合种植以形成丰富的绿植空间,净化大气颗粒物。由此可利用树种本身的滞尘特性更有针对性的净化污染源周边大气颗粒物污染,创造宜居城市空间。

3 结论

(1)根据SPAMS电离得到的质谱特征,在上海典型污染区大气、自然降尘和植物叶片等样本中滞留颗粒物的主要离子组分为 CN^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^- 、 Cl^- 等,不同离子组分间的占比情况差异较大,但同一区域内大气、降尘和植物叶片滞尘中的颗粒物的化学组成具有一定的稳定性。

(2)所测定的4类绿化树种(香樟、龙柏、悬铃木、水杉)均对 Fe^+ 有着高于同期降尘的吸附比例,并表现出显著的吸附偏好,鉴于 Fe^+ 主要来自于地壳元素的风化分解,多存在于地表土壤中,表明以上树种由于叶面结构等生理学特性,在滞尘过程中对地表扬尘等大粒径颗粒物有着更好的滞纳作用。

(3)香樟与水杉2树种叶片表面滞尘与自然降尘中的化学组成较为接近,表明在2类树种叶片的滞尘过程受所在地区外部大气环境影响较大;而龙柏、悬铃木2树种叶片表面滞尘各有6种和4种离子与同期该离子在自然降尘中的占比存在显著差异,表明2类树种在滞尘过程中对特定离子成分存在着专属的吸附特性。

(4)根据上述结果可为上海市大气污染源周边绿化植物配置提供以下参考:龙柏和悬铃木可分别用于金属冶炼工业和化工业聚集区种植,在建筑工地等扬尘产生源则可将各树种组合种植以形成丰富而密闭

的绿植空间,起到削减大气颗粒物的功能。

【参考文献】

- [1] Liu Zechang, Cheng Huijuan, Ge Xuan, et al. Pollution characteristics and spatio-temporal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate matter in Jinan, China[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 2457 (742): 317-322.
- [2] 刘炎坤.上海市大气沉降物及 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征及溯源研究[D].上海:华东师范大学,2016.
Liu Yankun. Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition and $\text{PM}_{2.5}$ of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University,2016.
- [3] 吕铃钥,李洪远,杨佳楠.植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展[J].*生态学杂志*, 2016, 35 (2): 524-533.
Lyu Lingyue, Li Hongyuan, Yang Jianan. The temporal-spatial variation characteristics and influencing factors of absorbing air particulate matters by plants: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(2): 524-533.
- [4] 王兵,张维康,牛香,等.北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J].*环境科学*, 2015, 36(2): 408-414.
Wang Bing, Zhang Weikang, Niu Xiang, et al. Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2): 408-414.
- [5] Popek R, Gawronska H, Wrochna M, et al. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes a 3-year study[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, 15(3): 245-256.
- [6] 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(9):1121-1126.
Chai Yixin, Zhu Ning, Han Huanjin. Dust removal effect of urban tree species in Harbin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [7] 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.
- [8] Yang Fang, Chen Hong, Wang Xinning, et al. Single particle mass spectrometry of oxalic acid in ambient aerosols in Shanghai: mixing state and formation mechanism[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(25): 3876-3882.
- [9] 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,等.利用SPAMS研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J].*环境科学*, 2013, 34(6): 2071-2080.
Mou Yingying, Lou Shengrong, Chen Changhong, et al. Aging and mixing state of particulate matter during aerosol pollution episode in autumn Shanghai using a single particle aerosol mass spectrometer(SPAMS)[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2071-2080.

- [10] Healy R M, O'Connor I P, Hellebust S, et al. Characterisation of single particles from in-port ship emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(40): 6408-6414.
- [11] 刘慧琳,宋红军,陈志明,等. 利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 434-442.
Liu Huilin, Song Hongjun, Chen Zhiming, et al. Chemical composition of the single particle aerosol in winter in Nanning using SPAMS[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 434-442.
- [12] Wei Xin, Gao Bo, Wang Peng, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 112(5): 186-192.
- [13] 许明君,王月华,汤莉莉,等. 南京城区与郊区秋季大气 PM₁₀ 中水溶性离子的特征研究[J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 108-113.
Xu Mingjun, Wang Yuehua, Tang Lili, et al. Study on characteristics of water-soluble ions in PM₁₀ in autumn in Nanjing[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(5): 108-113.
- [14] 李彩霞,李彩亭,曾光明,等. 长沙市夏季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(5): 599-603.
Li Caixia, Li Caiting, Zeng Guangming, et al. Pollution characteristics of water-soluble ions in atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} in Changsha City in summer[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(5): 599-603.
- [15] 彭超,翟崇治,王欢博,等. 万州城区夏季、冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1638-1644.
Peng Chao, Zhai Chongzhi, Wang Huanbo, et al. Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in the urban Wanzhou area in summer and winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6): 1638-1644.
- [16] 邵莉,肖化云. 公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J]. *环境化学*, 2012, 31(3): 315-323.
Shao Li, Xiao Huayun. Pollution characterization and controlling factors of heavy metals in airborne particulate matter near expressway[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(3): 315-323.
- [17] Spencer MT, Holecek JC, Corrigan E, et al. Size-resolved chemical composition of aerosol particles during a monsoonal transition period over the Indian Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D16): 280-288.
- [18] Ergenekon P, Ulutas K. Heavy metal content of total suspended air particles in the heavily industrialized town of Gebze, Turkey[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 92(1): 90-95.
- [19] Jiménez AS, Heal MR, Beverland IJ. Correlations of particle number concentrations and metals with nitrogen oxides and other traffic-related air pollutants in Glasgow and London [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 54(4): 667-678.
- [20] 王全喜,张小平. 植物学[M]. 北京:科学出版社, 2012: 86-95.
Wang Quanxi, Zhang Xiaoping. Botany[M]. Beijing: Science Press, 2012: 86-95.
- [21] 余南娇,黄渤,李梅,等. 大气细颗粒物扬尘源单颗粒质谱特征[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1262-1268.
Yu Nanjiao, Huang Bo, Li Mei, et al. Single particle characteristics of fine particulate matter in dust[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1262-1268.

(上接第 65 页)

- [56] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, et al. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, 26(12): 1-9.
- [57] Gigault J, Pedrono B, Maxit B, et al. Marine plastic litter: the unanalyzed nano-fraction[J]. *Environmental Science-Nano*, 2016, 3(2): 346-350.