

* 国家自然科学基金委员会资助项目(N_o 216700615, N_o 217000621, N_o 213200664), 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(XN-PA000), 欧盟 J

而叶面光滑的树种滞尘能力弱^[4-5]。植物叶面滞尘能力因植物生活型不同而存在差异。高大乔木主要阻滞、过滤飘尘和降尘,而低矮灌木则主要滞留地面扬尘^[6]。植物叶面滞尘量因植物生长环境不同而存在差异,工业区、交通枢纽区同一树种单位叶面积滞尘量比居民区、清洁区高,说明立地条件影响植物叶面单位叶面积滞尘量^[7]。

植物叶面滞尘是一个动态变化的复杂过程,城市环境中植物叶面的滞尘能力仍存在争议,植物种类、环境因素和降尘性质的影响有待进一步研究。研究城市森林植物叶面的滞尘量和颗粒物粒径分布特征对今后进一步了解城市森林的生态功能和合理布局城市森林具有现实意义。本研究以南京城市森林作为研究对象,分别调查不同功能区城市森林中3种常见绿化树种(法桐(*Platanus orientalis* Linn.)、桂花(*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.)和红叶石楠(*Photinia × Fraseri*))叶面颗粒物的含量及粒径分布,为治理城市空气颗粒物污染和合理布局城市森林提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在研究区域设置6个典型功能区,分别为文教区绿地(CZ)、城市公园绿地(UP)、居住区绿地(RZ)、商业区绿地(BZ)、工业区绿地(IZ)、城市天然林(URF),每个功能区随机选择3个样地,每个样地选择交通主干道、二级道路和绿地中心3个典型位置分别采集法桐、桂花、红叶石楠的叶片,重复3次,共设置162个采样点。于雨后15 d晴朗无风的天气,选择长势一致的植株采集叶片,法桐、桂花、红叶石楠采集高度分别为4~5、1~2、0.3~0.8 m,叶片采集时注意4个方向均匀采集,法桐、桂花、红叶石楠每株分别采集50、300、500片叶片,采集的新鲜叶片装入自封袋,做好记录,带回实验室,储存于4℃冰箱待测。

1.2 样品测定

1.2.1 叶片滞留颗粒物含量测定

每个样品中随机取法桐叶30片、桂花叶50片、石楠叶100片,叶片放入500 mL烧杯中,加去离子水200 mL浸泡2 h后用软毛刷子刷洗干净,并用洗瓶冲洗叶片至干净,所有洗液装入已称量的干燥离心管中,在转速为9 000 r/min下离心45 min后倒掉上清液,用干净滤纸包裹管口放入50℃烘箱烘干至恒量,取出,盖上盖子称量,得到叶片滞留颗粒物

的质量(M, g)。

1.2.2 叶片滞留颗粒物粒径分布测定

称量后的离心管中加入去离子水40 mL,超声振荡30 min,用美国Beckman Coulter公司生产的LS230激光粒度仪进行粒径测定,分别获得粒径 ≤ 2.5 、 $>2.5 \sim 10.0$ 、 $>10.0 \sim 250.0 \mu m$ 的颗粒物(分别简称为 $PM_{\leq 2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 PM_{10-250})的体积分数。

1.2.3 叶面积测定

样品放入扫描仪扫描,再利用WinRHIZO软件分析计算样品平均单叶面积(S, m^2)。

1.2.4 单位面积滞尘量计算

单位面积滞尘量($DR, g/m^2$)按照如下公式计算:

$$DR = M / (N \times S) \quad (1)$$

式中: N 为叶片数。

1.2.5 叶面形态分析

取新鲜的正常叶片,在叶脉两侧的中部将叶片切成边长5 mm的小方块,每种植物叶切2个小方块,并立即用福尔马林/酒精/醋酸(FAA)固定液固定24 h后转入70%(质量分数,下同)乙醇中48 h,之后分别用70%、90%、100%乙醇进行脱水,间隔时间20 min;脱水后置真空干燥器中抽真空干燥后取出,粘台,喷金,在扫描电子显微镜(Quanta 200)下观察。

1.3 数据分析

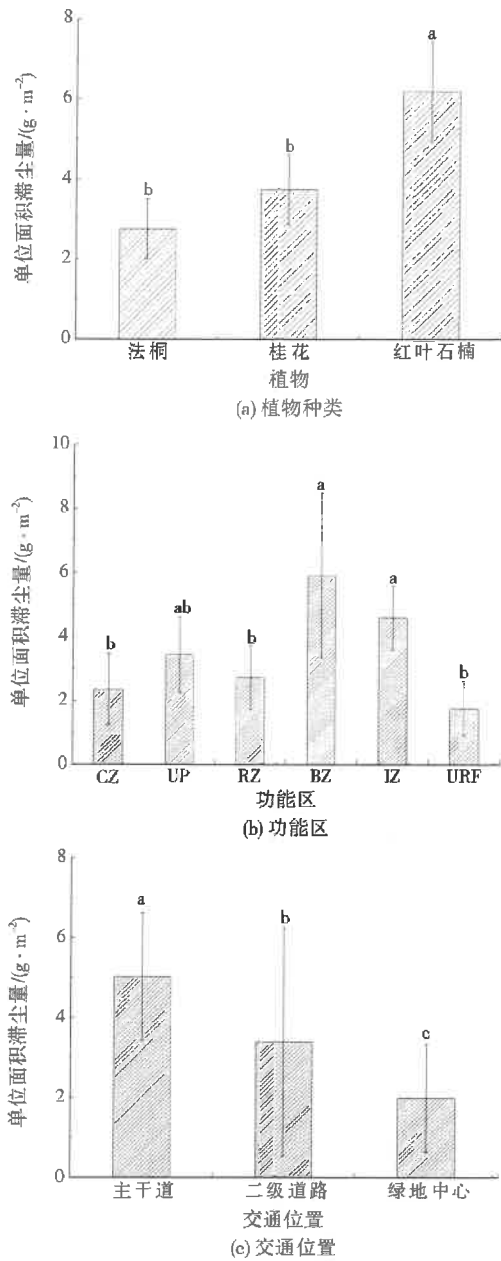
采用Excel 2000、SPSS 23.0和Origin 8.5分析数据和绘图。采用Excel 2000剔除颗粒物指标测定值中的离群值,并进行均值化处理。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同植物种类、位置、功能区之间叶面颗粒物的差异,采用主成分分析法对参试植物叶面的滞尘能力进行综合评价,用相关性分析探讨植物主要形态与植物叶面滞尘能力之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 植物叶面单位面积滞尘量分析

植物种类不同,植物叶面单位面积滞尘量有差异。由图1(a)可见,3种植物叶面单位面积滞尘量大小依次为红叶石楠($(6.189 \pm 1.255) g/m^2$)、桂花($(3.739 \pm 0.877) g/m^2$)、法桐($(2.753 \pm 0.744) g/m^2$),红叶石楠植物叶面单位面积滞尘量最高,分别约为桂花和法桐的1.7、2.2倍。

土地利用方式不同,直接影响空气中颗粒物的浓度,进而导致植物叶面单位面积滞尘量产生差异。由图1(b)可见,5种植物叶面单位面积滞尘量在各



注:不同字母表示在 0.05 水平存在显著差异。图 2 同。

图 1 植物叶面单位面积滞尘量

Fig.1 Dust-retention amount per unit area of plant leaf surface

功能区依次为 BZ (5.917 ± 2.573 g/m²)、IZ (4.591 ± 0.993 g/m²)、UP (3.435 ± 1.186 g/m²)、RZ (2.722 ± 1.011 g/m²)、CZ (2.351 ± 1.129 g/m²)、URF (1.762 ± 0.853 g/m²)。

道路二次扬尘是导致空气颗粒物浓度变化的主要因素之一。由图 1(c)可见,主干道上植物叶面滞尘量最高(5.013 ± 1.594 g/m²),其次是二级道路(3.396 ± 2.850 g/m²),绿地中心叶面滞尘量最小(1.981 ± 1.358 g/m²)。

2.2 植物叶面滞留颗粒物粒径分析

由图 2(a)可见,3 种植物均以 PM₁₀₋₂₅₀ 为主,其次是 PM_{2.5-10},PM_{≤2.5} 最少,但不同植物对各粒径颗粒物的滞留不同,法桐叶面颗粒物中 PM₁₀₋₂₅₀ 显著高于桂花和红叶石楠,红叶石楠叶面颗粒物中 PM_{2.5-10} 显著高于桂花和法桐,桂花和红叶石楠叶面颗粒物中 PM_{≤2.5} 显著高于法桐。

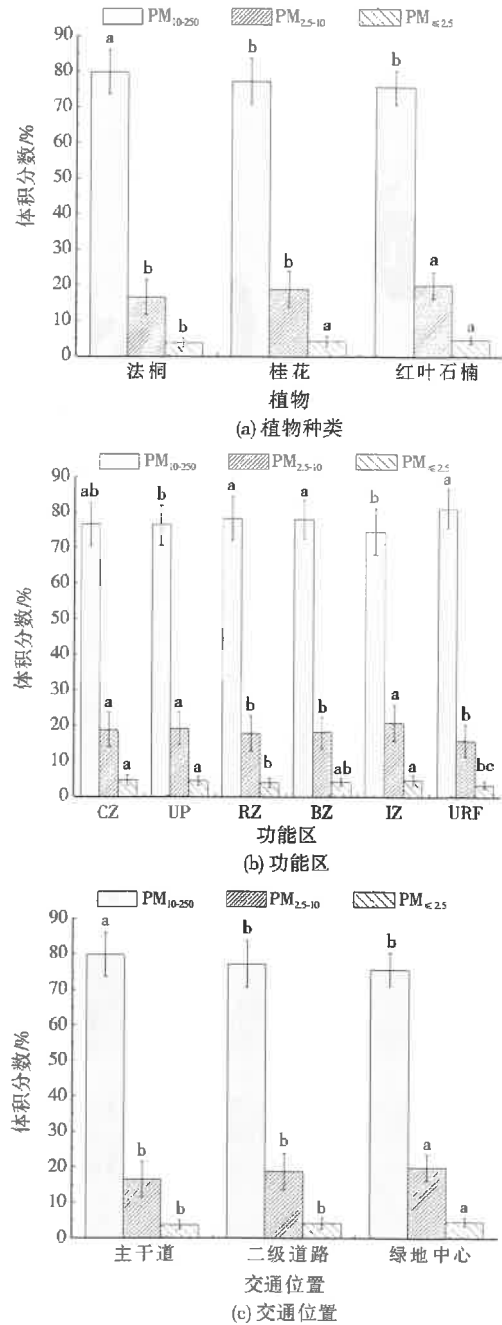


图 2 植物叶面颗粒物粒径分布

Fig.2 Size distribution of particulate matter on plant leaf surface

由图 2(b)可见,6 个功能区均以 PM₁₀₋₂₅₀ 为主。

URF、RZ、BZ 植物叶面颗粒中 PM_{10-250} 显著高于 UP 和 IZ; IZ、UP、CZ 植物叶面颗粒物 $PM_{2.5-10}$ 显著高于 RZ、BZ 和 URF; IZ、CZ、UP 植物叶面颗粒物中 $PM_{\leq 2.5}$ 显著高于 RZ 及 URF。

距离密集交通的远近不同,植物叶面颗粒物中各粒径分布存在差异。由图 2(c)可见, PM_{10-250} 随远离交通中心而减少,而 $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{\leq 2.5}$ 则随远离交通中心而增加。

2.3 植物形态描述

植物种类不同,其单位面积滞尘量存在差异。将 3 种植物叶片表面形态用乔灌类型、常绿/落叶及叶片质地等 8 个植物形态因子进行描述,结果见表 1。

从图 3 可看出,法桐叶上表面有密集的脊状突起,突起之间形成沟槽,可深藏许多小颗粒物;桂花叶上表面有较宽的凹槽,凹槽内部仍是密集的脊状突起;红叶石楠叶上表面有平行排列的棱。法桐叶下表面气孔周围有凹槽,适于滞留较大颗粒物;桂花叶下表面气孔周围分布有一些浅浅的凹槽,可滞留小颗粒物;红叶石楠叶下表面气孔周围分布着数量较多的较宽凹槽,可滞留大量颗粒物。

表 1 植物叶片表面形态描述¹⁾
Table 1 Description of plant leaf surface morphology

植物种类	乔灌类型	常绿/落叶	叶片质地	油腺	叶片绒毛	叶面平整度	叶脉	气孔数 (个·cm ⁻²)
法桐	1(乔木)	1(落叶)	1(纸质)	1(无)	2(有)	2(叶面稍皱)	3(叶脉凹陷)	30 712.55
桂花	2(小乔木)	2(常绿)	3(革质)	2(有)	1(无)	1(叶面褶皱)	2(叶脉隆起)	51 410.14
红叶石楠	3(灌木)	2(常绿)	2(半革质)	2(有)	1(无)	3(叶面平整)	1(叶脉不明显)	54 080.80

注: ¹⁾ 分别用数字 1、2、3 对 3 种植物前 7 类植物形态因子进行量化,旨在对 7 类独立的植物表面形态因子变量转化为变量的线性组合,实现降维,进行主成分分析。

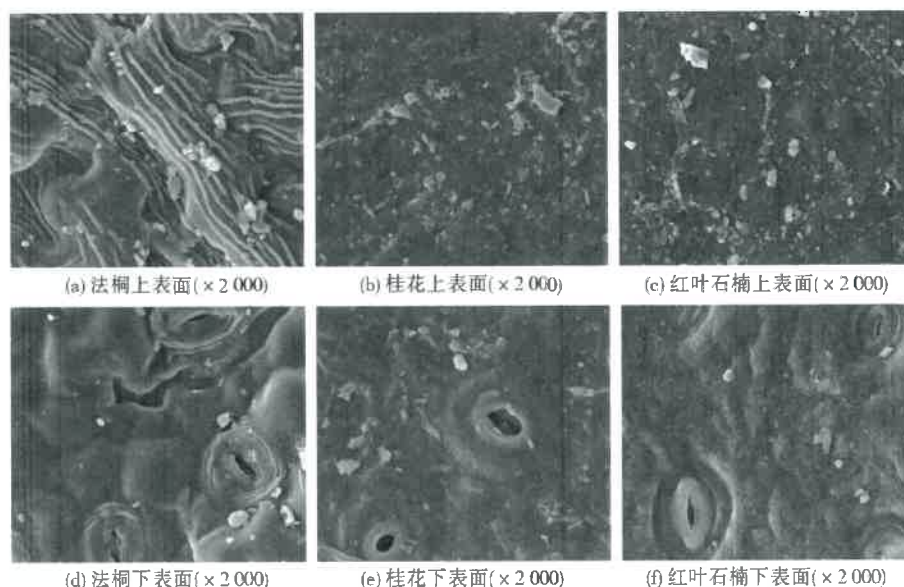


图 3 植物叶表面微观形态
Fig.3 Surface micromorphology of plant leaf

2.4 植物叶面单位面积滞尘量综合评价

由表 2 可见,植物叶面单位面积滞尘量与乔灌类型、常绿/落叶、叶片质地、叶片绒毛及气孔数呈显著正相关($P \leq 0.01$),而与叶面平整度呈显著负相关($P \leq 0.05$)。叶面颗粒物中 $PM_{\leq 2.5}$ 含量则与植物种类、 $PM_{2.5-10}$ 含量、乔灌类型、常绿/落叶、叶片质地、叶片绒毛及气孔数呈显著正相关($P \leq 0.01$),而与功能区、 PM_{10-250} 含量及叶脉呈显著负相关($P \leq 0.01$)。

进一步进行主成分分析,结果见表 3。主成分 1、2、3 解释的方差分别占总方差的 45.846%、18.458%、16.066%,累计贡献率达到 80.370%,可解释原始 14 个变量的 80.370%。主成分 1 与植物种类、乔灌类型、常绿/落叶、叶片质地、叶片绒毛及气孔数有强烈的正相关,与叶面平整度及叶脉有极强的负相关关系;主成分 2 与 PM_{10-250} 含量呈较强的负相关关系,而与 $PM_{2.5-10}$ 和 $PM_{\leq 2.5}$ 含量呈较强的正相关关系;主成分 3 与常绿/落叶、油腺、叶片绒毛、叶面平整度和叶脉是否隆起呈较强的正相关关系,与植物种类、乔灌类型及叶片质地有一定负相关关系。

表2 各因子的相关性分析¹⁾
Table 2 The correlation coefficient of the factors

因子	植物种类	交通位置	功能区	滞尘量	PM ₁₀₋₂₅₀	PM _{2.5-10}	PM _{≤2.5}	乔灌类型
植物种类	1.000	0	-0.042	0.339	-0.289 **	0.295 **	0.250 **	1.000 **
交通位置		1.000	-0.042	0.094	0.089	-0.085	-0.100	0
功能区			1.000	-0.052	0.169 *	-0.147	-0.237 **	-0.042
滞尘量				1.000	-0.006	0.003	0.017	0.339 **
PM ₁₀₋₂₅₀					1.000	-0.996 **	-0.952 **	-0.289 **
PM _{2.5-10}						1.000	0.922 **	0.295 **
PM _{≤2.5}							1.000	0.250 **
乔灌类型								1.000
常绿/落叶								
叶片质地								
油腺								
叶片绒毛								
叶面平整度								
叶脉								
气孔数								
因子	常绿/落叶	叶片质地	油腺	叶片绒毛	叶面平整度	叶脉	气孔数	
植物种类	0.866 **	1.000 **	0	0.866 **	-0.500 **	-0.462 **	0.914 **	
交通位置	0	0	0	0	0	0	0	
功能区	-0.049	-0.042	-0.024	-0.049	0	0.114	-0.049	
滞尘量	0.292 **	0.339 **	-0.004	0.292 **	-0.173 *	-0.138	0.307 **	
PM ₁₀₋₂₅₀	-0.270 **	-0.289 **	-0.039	-0.270 **	0.111	0.252 **	-0.280 **	
PM _{2.5-10}	0.279 **	0.295 **	0.047	0.279 **	-0.107	-0.255 **	0.289 **	
PM _{≤2.5}	0.220 **	0.250 **	0.007	0.220 **	-0.119	-0.222 **	0.232 **	
乔灌类型	0.866 **	1.000 **	0	0.866 **	-0.500 **	-0.462 **	0.914 **	
常绿/落叶	1.000	0.866 **	0.500 **	1.000 **	0	-0.351 **	0.994 **	
叶片质地		1.000	0	0.866 **	-0.500 **	-0.462 **	0.914 **	
油腺			1.000	0.500 **	0.866 **	0.099	0.406 **	
叶片绒毛				1.000	0	-0.351 **	0.994 **	
叶面平整度					1.000	0.317 **	-0.105	
叶脉						1.000	-0.382 **	
气孔数							1.000	

注: ¹⁾ **、* 分别表示在 0.01、0.05 水平(双侧)显著相关。

表3 植物叶面单位面积滞尘量影响因子主成分分析的得分系数矩阵

Table 3 The component score coefficient matrix of the principal components analysis of dust-retention amount of plant leaf surface

因子	主成分		
	1	2	3
植物种类	0.164	-0.044	-0.094
交通位置	0.013	-0.058	-0.006
功能区	0.020	-0.091	0
PM ₁₀₋₂₅₀	0.022	-0.344	-0.010
PM _{2.5-10}	-0.020	0.338	0.012
PM _{≤2.5}	-0.030	0.343	0
乔灌类型	0.164	-0.044	-0.094
常绿/落叶	0.166	-0.034	0.132
叶片质地	0.164	-0.044	-0.094
油腺	0.048	0.008	0.426
叶片绒毛	0.166	-0.034	0.132
叶面平整度	-0.040	0.029	0.416
叶脉	-0.068	-0.032	0.123
气孔数	0.170	-0.036	0.087

综合分析,主成分1可归纳为植物因子,具体体现为灌木、常绿植物、革质叶片、叶表面有绒毛、叶脉显著、叶面气孔数多、叶面有皱褶的植物叶面单位面积滞尘量高于乔木、落叶植物、纸质叶片、没有绒毛、叶脉不显著、叶面气孔数少、叶面平整的植物;主成分2可归纳为尘因子,叶面颗粒物中 PM₁₀₋₂₅₀ 含量越高,单位面积植物叶面滞尘量越低;主成分3中各因子的得分系数相差不大,可归纳为包括环境、交通等因素的综合因子。

3 讨论

3.1 植物因子对植物叶面单位面积滞尘量的影响

植物叶面阻滞大气颗粒物的过程是动态的,大气颗粒物不断被植物叶片阻滞附着,同时风吹振动返回大气,雨水淋洗重归大地,形成一个输入与输出不断循环的动态过程^[8],但每次的风吹振动和雨水

淋洗总是致使植物叶面滞留颗粒物总量与组成具有动态累积性^[9]。不同树种叶片阻滞颗粒物的能力存在明显差异,主要受叶面结构特征参数影响^[10]。颗粒物被植物叶面捕捉是植物叶片表面与颗粒物相互作用的结果^[11]。叶片是植物吸附、阻滞大气颗粒物的主要载体,植物叶片的结构特征如具有沟状、密集脊状突起、密集沟状组织,是叶片吸附颗粒物的基础^[12]。由于叶片表面粗糙度不均一,导致边界厚度不同,进而影响污染物扩散到植物叶表面的速率^[13]。植物个体滞留大气颗粒物的方式通常有 3 种:停留、附着和粘附。植物滞尘主要通过停留实现,但这种滞尘方式极易受到风吹影响而再次进入大气悬浮;附着主要由叶片的性能决定的,其滞尘效果稳定;粘附则主要靠植物表面分泌的特殊液体粘滞颗粒物,滞尘效果最稳定^[14]。植物叶表的密致绒毛、深沟壑、网状脉和高密度的气孔结构及叶片的一些卷曲、皱缩形态均有利于颗粒物的滞留^[15]。红叶石楠叶面单位面积滞尘量最高,与其丰富的网状脉及高密度的气孔结构密切相关;桂花的叶面单位面积滞尘量次之,桂花叶表面伴随着卷曲、皱缩及深沟壑,法桐叶片相对平整,但叶表面有柔毛,这些特征均利于叶片滞尘。但植物形态的差异会导致其滞尘量的不同,本研究中灌木红叶石楠的滞尘量是乔木法桐的滞尘量的 2.2 倍。有研究也表明,灌木树种的滞尘能力总体远高于乔木树种,约为乔木树种的 3.1 倍^[16]。本研究中 3 种植物的叶表形态各有特色,法桐叶上表面的绒毛及高高隆起的主脉都有利于其滞留空气中的颗粒物,桂花叶表面的皱褶及丰富的网状脉便于其阻滞空气中的颗粒物,红叶石楠叶面光滑,但叶脉丰富,且叶片的下表皮中油腺点明显,其分泌物有利于叶片粘滞空气中的颗粒物^[17]。扫描电子显微镜的结果也显示,法桐叶片的单位面积上气孔数多、气孔大,这些特征均有利于颗粒物停滞在叶面上^[18]。

3.2 综合因子对植物叶面单位面积滞尘量的影响

土地利用方式直接影响空气中颗粒物的浓度及组成,并在植物叶面单位面积滞尘量上得以体现。有研究表明,灰尘量大的发电厂的法桐叶面单位面积滞尘量高达 1.81 g/m^2 ,而相对清洁的钢铁厂则为 1.52 g/m^2 ^[19],其他研究也表明,相同植物在不同功能区的滞尘量存在显著差异^[20]。本实验中 3 种植物单位面积滞尘量在商业区和工业区最多,而城市天然林最少,反映了不同功能区的空气中颗粒物浓度本身的差异,即商业区和工业区空气中颗粒物本身

含量较高,通过对叶面滞留颗粒物的粒径分析,进一步表明对人体危害较大的 $\text{PM}_{\leq 2.5}$ 的颗粒在文教区、城市公园、商业区、工业区绿地植物叶面颗粒物中占比最高,而在城市天然林中占比最低。城市林地通过粘附、附着、停留等方式将空气中有害的颗粒物滞留下来,保证了空气的清洁,“城市绿肺”的功效得以体现^[21]。

交通是影响大气质量的主要因素之一,其污染集中在城市区域,与人口活动强度及密度呈正相关,受影响人群密度高;而且,机动车尾气排放位置低,集中分布在人的呼吸带内,暴露水平与人口成正比,对公众健康影响的实际效果要比同类型排放强度的面源及高架工业点源污染高数十倍^[22]。机动车尾气污染物中毒性物质较多,一些毒性成分半衰期长,如四环芳烃达到半年以上^[23];并能发生二次反应形成二次污染,又可通过长距离扩散,形成大范围长时间覆盖全球的地表污染层。

3.3 尘因子对植物叶面单位面积滞尘量的影响

粉尘来源为自然源或人工源,城市人工源粉尘常具有粘附性,更容易滞留在叶面上,同时研究表明,滞尘能力较强的植物倾向于滞留较粗的颗粒,而滞尘能力较弱的植物则更倾向于滞留较细的颗粒^[24],其原因可能是大颗粒物易沉降和叶片结构的影响^[25]。本研究中主干道中植物叶面单位滞尘量显著高于二级道路和绿地中心,但 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 $\text{PM}_{\leq 2.5}$ 含量随着远离交通而有所增加,大粒径颗粒物附着在植物叶面,孔隙不断缩小,导致小粒径颗粒物的附着性变差,依然保留在大气中。

4 结 论

(1) 不同植物叶面单位面积滞尘量存在明显差异,其中法桐叶面单位面积滞尘量相对较小,而桂花和红叶石楠叶面单位面积滞尘量相对较大;植物叶片的各种生理特征如叶片质地、叶面平整度、绒毛特征、油腺分布及气孔数共同影响了叶面单位面积滞尘量。

(2) 土地利用方式影响植物叶面颗粒物的总量和粒径分布,工业区、商业区因污染源集中,植物叶面单位面积滞尘量较多,颗粒物中 $\text{PM}_{\leq 2.5}$ 的粒径分布也相对较高。不同交通位置植物叶面单位面积滞尘量和粒径也存在差异,具体表现为交通主干道的植物叶面单位面积滞尘量最大,而绿地中心最小,其粒径分布上则表现为 $\text{PM}_{\leq 2.5}$ 随着远离交通中心而增加

(3) 植物叶面单位面积滞尘量受到植物生理特征、环境因素及尘源特征的共同影响。

参考文献:

- [1] 王成,蔡春菊,陶康华.城市森林的概念、范围及其研究[J].世界林业研究,2004,17(2):23-27.
- [2] 王晓磊,王成.城市森林调控空气颗粒物的功能研究进展[J].生态学报,2014,34(8):1910-1921.
- [3] LIU J, CAO Z, ZOU S, et al. An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 417-426.
- [4] SONG Y, MAHER B A, LI F, et al. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: source identification and size distribution[J]. Atmospheric Environment, 2015, 105(1): 53-60.
- [5] CHEN X, ZHOU Z, TENG M, et al. Accumulation of three different sizes of particulate matter on plant leaf surfaces: effect on leaf traits[J]. Archives of Biological Sciences, 2015, 67(4): 1257-1267.
- [6] SABA A, POPEK R, NAWROT B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. Science of the Total Environment, 2012, 427/428: 347-354.
- [7] DZIERZANOWSKI K, POPEK R, GAWRONSKA H, et al. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species[J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [8] 乔冠皓,陈警伟,刘肖瑜,等.两种常见绿化树种对大气颗粒物的滞留与再悬浮[J].应用生态学报,2017,28(1):266-272.
- [9] 赵松婷,李新宇,李延明.园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J].生态环境学报,2014,23(2):271-276.
- [10] 张维康,王兵,牛香.不同树种叶片微观结构对其滞尘空气颗粒物功能的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2507-2513.
- [11] 张桐,洪秀玲,孙立伟,等.6种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系[J].北京林业大学学报,2017,39(6):70-77.
- [12] 张鹏涛,朱明洪,刘艳菊,等.北京路边9种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究[J].生态环境学报,2017,26(2):2126-2133.
- [13] 刘强,陈荣,邓瑜衡.植物去除空气污染物的机理研究进展[J].安全与环境工程,2007,14(1):24-27.
- [14] 刘同彦,纪媛,蒋春晓,等.基于洗脱称量粒度分析的北京常见树种树叶滞尘大气颗粒物特性[J].林业科学,2016,52(12):74-83.
- [15] 段嵩岚,闫淑君,吴艳芳,等.福州市11种绿化灌木春季滞尘颗粒物效应研究[J].西南林业大学学报,2017,37(4):47-53.
- [16] 胡雪,乔保军,侯巍,等.通州区东郊森林公园不同树种叶片滞尘能力探究[J].中国水土保持,2017(7):59-62.
- [17] 张维康,王兵,牛香.北京不同污染地区园林植物叶片空气颗粒物滞留能力[J].环境科学,2015,36(7):2381-2388.
- [18] 石婕,刘庆倩,安海龙,等.不同污染程度下毛白杨叶表面PM_{2.5}颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究[J].生态学报,2015,35(22):7522-7530.
- [19] 唐明.唐山市工矿区主要园林植物滞尘能力的初步研究[J].湖北农业科学,2017,56(19):3664-3668.
- [20] 王建辉,刘奕清,邹敏.永川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.
- [21] 齐飞艳,朱彦峰,赵勇,等.郑州市园林植物滞留大气颗粒物能力的研究[J].河南农业大学学报,2009,43(3):256-259.
- [22] 杜让,傅立新,朱汉昌,等.武汉市道路边环境机动车尾气污染的暴露评价[J].环境与健康杂志,2010,27(3):241-243.
- [23] 陶志华,谢松青,何微娜,等.台州市大气PM_{2.5}中PAHs的污染特征与毒性评价[J].环境工程,2017,35(7):152-156.
- [24] 林永崇,穆桂金,徐立帅,等.策勒绿洲天然环境中几种乔木叶面滞尘特性[J].水土保持学报,2015,29(6):241-245.
- [25] 彭丹,陈进生,任引.厦门市行道树芒果和高山榕叶面尘理化特性研究[J].福建林业科技,2011,38(2):62-67,80.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2018-11-14)

(上接第836页)

- [24] ZHANG X, XU B, GUNTHER F, et al. Hydrogen isotope ratios of terrestrial leaf wax n-alkanes from the Tibetan Plateau: controls on apparent enrichment factors, effect of vapor sources and implication for altimetry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 211: 10-27.
- [25] MAKOU M, EGLINTON T, MCINTYRE C, et al. Plant wax n-alkane and n-alkanoic acid signatures overprinted by microbial contributions and old carbon in meromictic lake sediments[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(2): 1049-1057.
- [26] 葛蔚,程琪琪,柴超,等.山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J].环境科学,2017,38(4):1587-1596.
- [27] 刘希雯.武汉北湖地区土壤中多环芳烃和正构烷烃分布规律研究[D].武汉:武汉工程大学,2011.
- [28] CHENG L L, LI X R, XU X J, et al. Pollution characteristics and source analysis of n-alkanes in atmospheric aerosol of Tangshan[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(9): 1808-1814.
- [29] 卜庆伟,张枝焕,王亮,等.天津地区典型土壤剖面饱和烃分布特征及环境意义[J].地理科学进展,2007,26(6):21-32.
- [30] 张枝焕,卢丹,彭旭阳,等.北京地区表层土中饱和烃组成特征及成因分析[J].生态环境学报,2010,19(10):2398-2407.
- [31] ADEDOSU T A, ADEDOSU H O, SOJINU O S, et al. N-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) profile of soil from some polluted sites in Niger Delta, Nigeria[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(8): 2139-2144.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2019-02-01)