

DOI: 10.5846/stxb202102060388

罗建平, 王宁, 宋菲菲, 魏汉博, 原白玉, 唐钰鑫. 大庆市 6 种绿化树种对 SO₂、NO₂ 的消减及滞尘效应. 生态学报, 2023, 43(11): 4561-4569.

Luo J P, Wang N, Song F F, Wei H B, Yuan B Y, Tang Y X. Dust-retention and reduce to SO₂ and NO₂ by 6 landscape trees in Daqing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4561-4569.

大庆市 6 种绿化树种对 SO₂、NO₂ 的消减及滞尘效应

罗建平^{1,2}, 王 宁^{1,2,*}, 宋菲菲¹, 魏汉博¹, 原白玉¹, 唐钰鑫¹

1 黑龙江八一农垦大学农学院, 大庆 163319

2 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 大庆 163319

摘要: 城市森林在吸收、滞留大气污染物, 改善城市生态环境方面具有重要意义。以大庆市 6 种常见绿化树种为研究对象, 采用水洗-滤膜法和熏气试验探究不同树种对总悬浮颗粒物(TSP)、大颗粒物(PM_{>10})、粗颗粒物(PM₃₋₁₀)和细颗粒物(PM₁₋₃)的滞留规律以及对大气中 SO₂、NO₂ 的消减效果。研究结果表明: (1) 不同树种的滞尘能力差异显著 ($P < 0.05$), 对 TSP 的滞留量从大到小依次为: 油松 (3.82 ± 0.40) g/m² > 红瑞木 (1.45 ± 0.12) g/m² > 紫丁香 (1.22 ± 0.17) g/m² > 桤木 (1.21 ± 0.13) g/m² > 大叶杨 (0.93 ± 0.17) g/m² > 旱柳 (0.54 ± 0.14) g/m²; (2) 树种间对不同颗粒物的滞留量具有显著差异 ($P < 0.05$), 供试树种对不同粒径颗粒物滞留的质量占比表现为, PM_{>10} (62.33%—83.68%)、PM₃₋₁₀ (10.82%—21.41%)、PM₁₋₃ (4.05%—18.30%); (3) 红瑞木、紫丁香和桤木的滞尘量与对大气 SO₂、NO₂ 的吸收量具有显著正相关关系; (4) 红瑞木、紫丁香和大叶杨的综合滞尘能力以及大气 NO₂、SO₂ 的消减能力较强。因此, 红瑞木、紫丁香和大叶杨可优先考虑用于城市绿化, 在园林植物的规划中当以乔木类的树种为主, 配以灌木类和草本类植物, 充分利用立体空间, 达到滞尘效应的最大化, 与此同时还应适当引种或培育适于北方生长的常绿树种, 以加强对冬季大气颗粒物的滞留效果。

关键词: 叶面滞尘; 粒径; 二氧化硫; 二氧化氮; 大庆市

Dust-retention and reduce to SO₂ and NO₂ by 6 landscape trees in Daqing

LUO Jianping^{1,2}, WANG Ning^{1,2,*}, SONG Feifei¹, WEI Hanbo¹, YUAN Baiyu¹, TANG Yuxin¹

1 College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2 Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs People's Republic of China, Daqing 163319, China

Abstract: Urban forest has practical significance in absorbing air pollutants and improving urban ecological environment. Taking six common greening tree species in Daqing City as the research object, the retention law of different plants on different particle sizes, including total suspended particulate (TSP), large particles (PM_{>10}), coarse particle (PM₃₋₁₀), fine particulate (PM₁₋₃) and the reduction of SO₂ and NO₂ in the atmosphere were studied by water washing-filtration membrane and artificial simulated fumigation method. The results showed that the significant differences in dust retention capacity among different tree species ($P < 0.05$). (1) The retention of TSP in descending order is *Pinus tabulaeformis* Carr. (3.82 ± 0.40) g/m² > *Swida alba* Opiz. (1.45 ± 0.12) g/m² > *Syringa oblata* Lindl. (1.22 ± 0.17) g/m² > *Acer negundo* Lindl. (1.21 ± 0.13) g/m² > *Populus lasiocarpa* Oliv. (0.93 ± 0.17) g/m² > *Salix matsudana* Koidz. (0.54 ± 0.14) g/m². (2) Different tree species had significant differences in retention of different particles ($P < 0.05$). The mass proportion of particles with different particle sizes retained by the tested tree species was as follows: PM_{>10} (62.33%—83.68%), PM₃₋₁₀ (10.82%—21.41%), PM₁₋₃ (4.05%—18.30%). (3) The dust retention of *Swida alba* Opiz., *Syringa oblata* Lindl. and *Acer negundo*

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202010223017); 黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金项目(XDB2015-02)

收稿日期: 2021-02-06; 网络出版日期: 2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: soilandwater@163.com

Lindl. was positively correlated with the absorbency to SO_2 and NO_2 . (4) The comprehensive dust retention ability and absorbency to SO_2 and NO_2 of *Swida alba* Opiz., *Syringa oblata* Lindl. and *Populus lasiocarpa* Oliv. were stronger. Therefore, *Swida alba* Opiz., *Syringa oblata* Lindl. and *Populus lasiocarpa* Oliv. can be preferred for urban greening. In the planning of landscape plants, the tree species should be given priority to those with shrubs and herbs, and make full use of three-dimensional space to maximize the dust retention effect. At the same time, evergreen tree species suitable for northern growth should also be introduced or cultivated to strengthen the retention effect of atmospheric particles in winter.

Key Words: dust-retention capacity; particle size; SO_2 ; NO_2 ; Daqing

近年来,随着我国城市化、工业化进程的加快以及汽车保有量的日益增加,空气污染现象日趋严峻,大气污染物浓度过高,已经成为中国城市化发展所面临的重要环境问题之一^[1]。大气污染物主要包括悬浮颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等,其主要来源于汽车尾气、火力发电站和其他工业生产过程。不仅会导致雾霾天气的发生,而且严重危害人体健康,导致患上各种呼吸道疾病、慢性阻塞性疾病的几率增加^[2-3]。城市森林作为城市生态系统的重要组成部分,不仅可以过滤、阻挡和吸附大气中的粉尘、颗粒物,同时对大气中 SO_2 、 NO_2 具有一定的抗性和吸收能力,甚至有些植物可以很好地利用 NO_2 ^[4-5]。研究表明:植物叶片中全硫与全氮含量与大气中 SO_2 和 NO_2 具有很好的相关性,可利用叶片中全硫和全氮的含量来表征植物对大气 SO_2 和 NO_2 吸收能力的大小^[6]。现阶段,国内外学者已经在多地开展相关研究,从不同角度阐述了植物叶片的滞尘效应及其影响因素以及对 SO_2 和 NO_2 气体吸收的生理过程。Baraldi 等^[7] 研究发现,叶片表面具由绒毛、沟槽、突起等粗糙结构滞留颗粒物(PMs)的能力更强。李海梅等^[8] 也表明,叶表面具有绒毛、沟槽、凸起、蜡质层及气孔密度大等结构特征的植物,对颗粒物的滞留能力更强。刘佩琪等^[9] 指出大气中 SO_2 和 NO_2 的浓度变化与植被滞留的颗粒物浓度具有显著的负相关性。圣倩倩^[10] 通过人工模拟熏气试验得出,随着 NO_2 胁迫时间的延长,鹅耳枥的净光合速率与蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度之间的线性关系的显著程度都被削弱。

大庆市是黑龙江省重要的石油化工城市,石油、煤炭等资源消耗较大,大气污染问题突出。目前,有关大庆市绿化树种对大气中 SO_2 、 NO_2 的消减及滞尘效应的研究较少,以及对植物的滞尘量与 SO_2 、 NO_2 的吸收量是否存在相关性还未见报道。因此,本研究以大庆市 6 种常见绿化树种为研究对象,采用水洗-滤膜法和熏气试验,探究不同树种对总悬浮颗粒物(TSP)、大颗粒物($\text{PM}_{>10}$)、粗颗粒物(PM_{3-10})和细颗粒物(PM_{1-3})的滞留规律以及对大气 SO_2 、 NO_2 的消减效果,依据滞尘和消减能力的大小优化城市绿化树种,以期缓解城市大气污染的压力,为城市道路、公园等地绿化树种的选择提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验区设在黑龙江省大庆市黑龙江八一农垦大学校园内。采样点设置在校内不同功能区:清洁区(人工湖旁的假山、居民区公园)和污染区(内环西路、内环北路道路旁),同一功能区内的采样环境(人流量、车流量)相似。试验区内拥有大庆市地区主要的园林绿化植物,具有很好的代表性。

1.2 供试树种选择及样品采集

依据对大庆市常见绿化树种的统计资料和野外调查结果,选择具有代表性的乔木类和灌木类树种进行研究,各树种基本特征见表 1。

一般认为,大于 15 mm 的降雨可以冲掉植物叶片的降尘然后重新滞尘^[11]。因此试验统一选在雨后一周且天气晴朗的时候进行采样,即于 2020 年 9 月 15 日、2020 年 9 月 25 日、2020 年 10 月 2 日进行三次采样。在不同功能区进行定点采样,每种供试树种(成熟林)随机选择 3 棵。乔木类树种采用分层采样法,分别对树种冠层上中下三层及东南西北四个方向进行采样,每次采集 20 片树叶。灌木类树种选择在冠层中间的东南西

北四个方向进行采样,每次采集 20 片树叶。采集的叶片要求完整、健康,成熟。采样过程中应避免手直接与叶片接触,防止叶片上的降尘粘附手上,影响实验结果,将采集的叶片用自封袋装好,写上标签,以待处理。

表 1 供试树种的特征

Table 1 The characteristics of the investigated species

树种 Tree species	科 Family	属 Genus	生长型 Life forms	叶结构特征 Leaf architecture
桤叶槭 <i>Acer negundo</i> Lindl.	槭树科	槭属	乔木	叶革质,奇数羽状复叶,歪卵状披针形,生有短绒毛
旱柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	杨柳科	柳属	乔木	叶革质,叶披针形,无毛有光泽
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	松科	松属	乔木	针叶 2 针一束,粗硬,微具树脂
大叶杨 <i>Populus lasiocarpa</i> Oliv.	杨柳科	杨属	乔木	叶革质,卵形、椭圆形,上表面无毛,下表面疏被柔毛
紫丁香 <i>Syringa oblata</i> Lindl.	木犀科	丁香属	灌木	叶革质,卵圆形至肾形,无毛
红端木 <i>Swida alba</i> Opiz.	山茱萸科	楝木属	灌木	叶纸质,椭圆形,有极少的白色平贴短柔毛

1.3 测定方法

1.3.1 叶片滞尘量测定

采用水洗-滤膜法测量叶片滞留的颗粒物质量^[12]。

(1)把从外业采集来的植物叶片样品,用蒸馏水浸泡 2 h 后,用软毛刷将叶片上下表面的颗粒物洗入玻璃器皿中,用玻璃棒搅拌使之形成悬浊液。将悬浊液依次通过已烘干称重(m_1)的不同孔径的滤膜(10 μm 、3 μm 、1 μm),用 SHZ-III D 型循环水式真空泵进行抽滤,然后将滤膜置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱,烘干至恒重(m_2),称重均采用精度为 0.0001 的电子分析天平(单位:g)。

(2)同时,将悬浊液等体积替换成蒸馏水,按上述步骤进行 3 组空白实验,计算因抽滤导致的滤膜质量变化。

$$\Delta m = m_{ck_2} - m_{ck_1} \quad (1)$$

式中, ck_2 表示通过蒸馏水抽滤后烘干滤膜的质量; ck_1 表示未抽滤前烘干滤膜的质量。

(3)抽滤前后滤膜质量之差减去滤纸变化量的均值 $\overline{\Delta m}$,即为滤膜上附着的颗粒物质量 M 。

$$M = m_2 - m_1 - \overline{\Delta m} \quad (2)$$

(4)叶片表面总悬浮颗粒物质量 M_{TSP} 表示为:

$$M_{\text{TSP}} = M_{PM_{>10}} + M_{PM_{3-10}} + M_{PM_{1-3}} \quad (3)$$

1.3.2 叶面积的测定

采用辅助数码相机拍照法^[13],测定叶片表面积。将上述滞尘量测定完毕的叶片擦干水份,利用数码相机对待测叶片和一元硬币进行拍照获取图像,在 Photoshop 6.0 软件中打开,获取待测叶片和一元硬币的像数,由于一元硬币的面积已知($S_1 = 4.906 \text{ cm}^2$)则可通过硬币像素 A_1 (单位:DPI)和待测叶片像素数 A_2 ,求得待测叶片总面积 S_2 ,3 次重复。

$$S_2 = \frac{S_1 A_2}{A_1} \quad (4)$$

针叶类树种的叶片测定:将针叶类树种的叶片置于 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,并用所得烘干质量乘以系数 6.38 cm^2/g ,得到针叶的叶面积^[14],单位为 cm^2 ,3 次重复。

$$\text{树种单位叶面积滞尘量表示为(单位:g/m}^2\text{): } W = \frac{M \times 10^4}{S} \quad (5)$$

式中, M 为叶片表面不同粒径颗粒物质量(单位:g), S 为叶表面积(单位/ cm^2)

1.3.3 人工熏气试验

为消除野外土壤不均质带来的试验误差,采用人工熏气法测定植物叶片对大气 SO₂、NO₂ 的吸收量。供试

树种选择成熟的容器苗(保证与外业供试树种的龄组一致),栽培基质为 3:1 的园土和草炭土。每种植物选取 3 盆作为 1 个平行,每盆重复测定 3 次,人工气候室平均温度为 25 ℃,平均相对湿度为 60%,SO₂质量分数设置为 2.0 mg/kg,NO₂质量分数设置为 8.0 mg/kg,3 d 后对树种进行采样,采样方式与外业采样一致。

1.3.4 植物叶片全氮、全硫的测定

将采集的叶片样品放入烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒重,然后用粉碎机粉碎,过 1 mm 筛。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-半微量滴定法测定植物叶片中全氮的含量;采用 HNO₃-HClO₄ 消煮-硫酸钡比浊法测定植物样品中全硫的含量。利用叶片中全硫和全氮的含量来表征植物对大气 SO₂ 和 NO₂ 吸收能力的大小,详见参考文献[6]。

$$\text{吸收能力 (mg/kg)} = \text{熏气后氮/硫的质量分数} - \text{熏气前氮/硫质量分数} \quad (6)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2016(USA) 进行数据处理;SPSS 21.0 进行方差分析显著性差异(水平设定为 $\alpha = 0.05$);Origin 2018 制图。

2 结果与分析

2.1 植物单位叶面积滞尘量及粒径分布

由图 1 可知,不同树种对不同颗粒物的滞留量具有显著差异($P < 0.05$)。对于总悬浮颗粒物(TSP)的滞留量从大到小依次为:油松(3.82 ± 0.40) g/m² > 红瑞木(1.45 ± 0.12) g/m² > 紫丁香(1.22 ± 0.17) g/m² > 桤叶槭(1.21 ± 0.13) g/m² > 大叶杨(0.93 ± 0.17) g/m² > 旱柳(0.54 ± 0.14) g/m², 平均滞尘量为 1.53 g/m²。其中油松对 TSP 的滞留能力最强,滞尘效果最显著,是其他树种的 2.53—7.07 倍,红瑞木、紫丁香、桤叶槭的滞留能力处在平均水平,旱柳的滞留能力最弱。供试树种对大颗粒物的滞留量为 2.59—0.42 g/m², 平均滞留量 0.95 g/m², 占总滞尘量的 62.33%—83.68%, 其中油松对大颗粒物滞留能力最强,紫丁香、红瑞木次之,旱柳最弱,但大叶杨、旱柳叶片表面大颗粒物所占比重较大;油松、红瑞木、紫丁香对粗颗粒物的滞留能力较强,大叶杨和旱柳的滞留能力较弱,整体平均滞留量 0.36 g/m², 占总滞尘量的 19.37%—21.47%;油松、红瑞木对细颗粒物的滞留能力较强,但油松叶片表面细颗粒物所占比重较小,旱柳、紫丁香和大叶杨的滞留能力较弱,整体平均滞留量

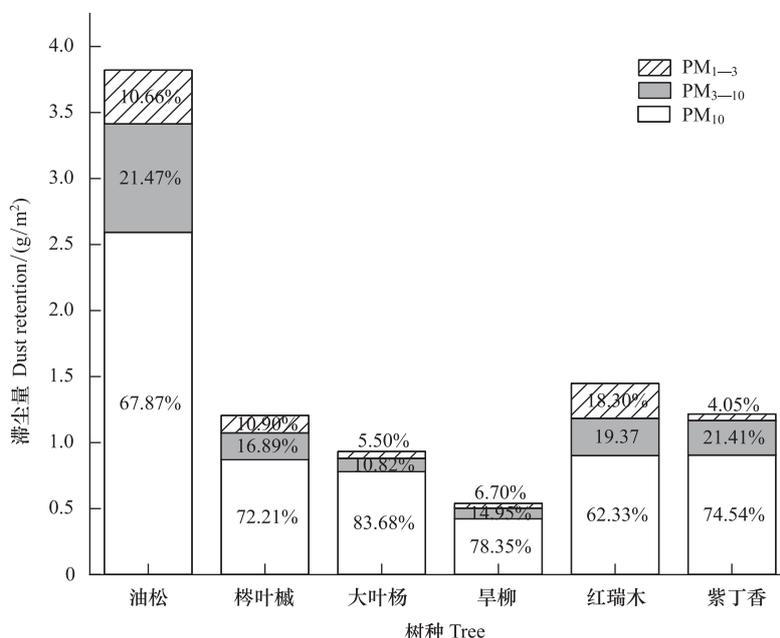


图 1 植物叶片滞尘量及粒径分布

Fig.1 Dust-retention and particle size distribution of plant leaves

0.21 g/m², 占总滞尘量的 10.90%—18.30%。整体而言, 供试树种对 TSP 的滞留量为 1.53 g/m², 其中 PM_{>10} 的滞留量为 1.08 g/m², 占比 62.33%—83.68%; 对 PM₃₋₁₀ 的滞留量为 0.29 g/m², 占比 10.82%—21.47%; 对 PM₁₋₃ 的滞留量为 0.16 g/m², 占比 4.05%—18.30%。

2.2 植物叶片对大气 SO₂ 和 NO₂ 的消减

由图 2 可知, 不同树种对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收能力具有显著差异 ($P < 0.05$)。供试树种对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收能力分别为 0.93—7.83 g/kg、5.21—31.73 g/kg。对于大气 SO₂ 的消减能力依次为: 大叶杨 (7.83 ± 0.35) g/kg > 红瑞木 (6.71 ± 0.43) g/kg > 紫丁香 (3.56 ± 0.22) g/kg > 桤叶槭 (1.90 ± 0.17) g/kg > 油松 (1.34 ± 0.07) g/kg > 旱柳 (0.93 ± 0.02) g/kg; 对于大气 NO₂ 的消减能力依次为: 红瑞木 (31.73 ± 3.52) g/kg > 紫丁香 (24.61 ± 2.26) g/kg > 大叶杨 (13.43 ± 1.56) g/kg > 桤叶槭 (8.82 ± 1.32) g/kg > 旱柳 (6.41 ± 0.61) g/kg > 油松 (5.21 ± 0.31) g/kg。其中红瑞木对 NO₂ 的吸收能力最强, 紫丁香次之, 油松的吸收能力最弱, 红瑞木对大气 NO₂ 的吸收能力是油松的 6.09 倍; 大叶杨对大气 SO₂ 的吸收能力最强, 红瑞木次之, 旱柳最弱, 大叶杨对 SO₂ 的吸收能力是旱柳的 8.42 倍。同一树种对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收差异显著 ($P < 0.05$), 表现为同一树种对 NO₂ 的吸收能力强于 SO₂。其中紫丁香和红瑞木对大气 SO₂、NO₂ 的吸收差异较大, 紫丁香对大气 NO₂ 的消减能力是 SO₂ 的 6.91 倍, 红瑞木对大气 NO₂ 的消减能力是 SO₂ 的 4.73 倍, 大叶杨对两者的吸收差异最小。

2.3 植物叶片对 SO₂、NO₂ 的吸收量与其滞尘量的相关性分析

对不同树种的滞尘量与其 NO₂、SO₂ 的吸收量进行 Pearson 相关分析, 由表 2 可知: 红瑞木、紫丁香和桤叶槭的滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 的吸收量具有显著正相关, 即这三个树种的滞尘能力以及大气 NO₂、SO₂ 的吸收能力均较强。其中, 红瑞木的滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 的吸收量具有极显著正相关; 紫丁香的滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 的吸收量具有显著正相关; 桤叶槭的滞尘量与大气 NO₂ 的吸收量具有显著正相关, 但与大气 SO₂ 的吸收量不具有显著相关性。而油松、大叶杨和旱柳的滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 的吸收量不具有相关性, 其中油松、旱柳的相关性较差。表现为油松的滞尘能力较强, 但对大气 NO₂、SO₂ 的吸收能力较差; 旱柳的滞尘能力较差, 对大气 NO₂、SO₂ 的吸收能力也较差。

大叶杨的滞尘能力中等, 对大气 NO₂、SO₂ 的吸收能力较差。由此可知, 滞尘能力强的树种其对大气 NO₂、SO₂ 的吸收能力不一定就高。

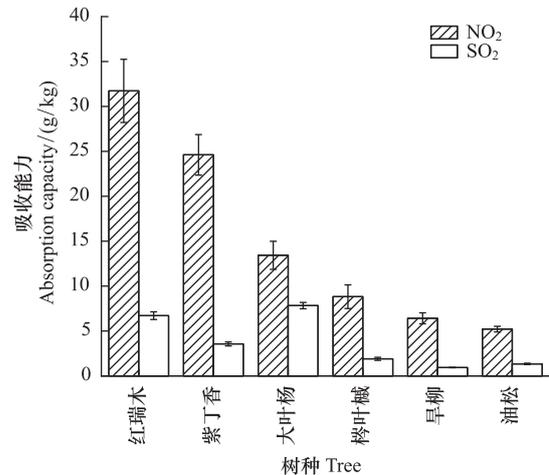


图 2 植物叶片对 SO₂、NO₂ 的吸收差异

Fig.2 Absorption difference of SO₂ and NO₂ in plant leaves

表 2 植物叶片滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 消减的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between dust retention of plant leaves and reduce to gaseous SO₂ and NO₂

污染物吸收量 Absorption of pollutants	滞尘量 Amount of dust retention					
	油松	红瑞木	紫丁香	桤叶槭	大叶杨	旱柳
NO ₂ 吸收量 Absorption of NO ₂	0.108	0.819 **	0.767 *	0.683 *	0.449	0.272
SO ₂ 吸收量 Absorption of SO ₂	0.273	0.791 **	0.775 *	0.411	0.387	0.134

** 表示 $P < 0.01$ 显著性水平; * 表示 $P < 0.05$ 显著性水平

2.4 植物滞尘能力的系统聚类分析

为了客观评价大庆市 6 种常见绿化树种的滞尘能力, 对不同粒径颗粒物的滞尘量进行等级划分, 基于聚

类分析法利用 SPSS 21.0 统计软件对其进行分类,其中距离区间选择“欧式距离”。

由图 3 可知,可将植物叶片的滞尘能力划分为 4 个等级,滞留 TSP 能力最强的树种是油松,滞尘能力较强的是红瑞木、紫丁香和桤叶槭,滞尘能力中等的是大叶杨,滞尘能力最弱的是旱柳;滞留 $PM_{>10}$ 能力最强的是油松,滞尘能力较强的是红瑞木、紫丁香和桤叶槭,滞尘能力中等的是大叶杨,滞尘能力最弱的是旱柳,与 TSP 滞留量的聚类分类一致;滞留 PM_{3-10} 能力最强的是油松,滞尘能力较强的是红瑞木和紫丁香,滞尘能力中等的是桤叶槭,滞尘能力最弱的是大叶杨和旱柳;滞留 PM_{1-3} 能力最强的是油松,滞尘能力较强的是红瑞木,滞尘能力中等的是紫丁香、大叶杨和旱柳,滞尘能力最弱的是桤叶槭。整体而言,红瑞木和紫丁香对不同粒径颗粒物都具有较好的滞留效果。

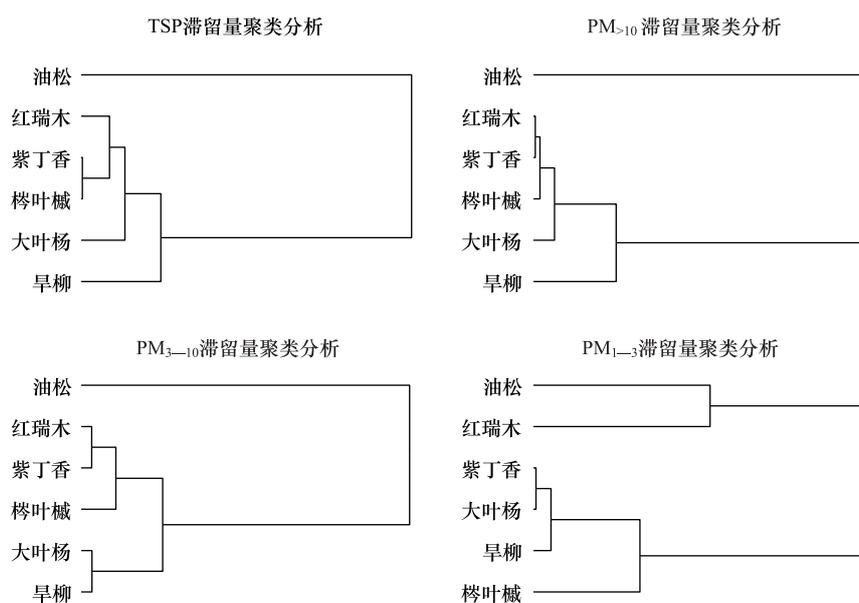


图 3 不同粒径颗粒物滞留的聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of particle retention with different particle size

2.5 植物对 SO_2 、 NO_2 消减的系统聚类分析

为了客观评价供试树种对大气 SO_2 、 NO_2 的吸收能力,对其吸收能力进行等级划分,基于聚类分析法利用 SPSS 21.0 统计软件对其进行分类,其中距离区间选择“欧式距离”。由图 4 可知,可将植物叶片对大气 SO_2 、 NO_2 的消减能力划分为 4 个等级,红瑞木对 NO_2 的消减能力最强,紫丁香对 NO_2 的消减能力较强,大叶杨对 NO_2 的消减能力中等,桤叶槭、旱柳和油松对 NO_2 的消减能力最弱;大叶杨对 SO_2 的消减能力最强,红瑞木对 SO_2 的消减能力较强,紫丁香对 SO_2 的消减能力中等,桤叶槭、油松和旱柳对 SO_2 的消减能力最弱。整体而言,红瑞木、紫丁香和大叶杨对大气 SO_2 和 NO_2 的消减均具有较好的效果,而油松和旱柳大气 SO_2 和 NO_2 的消减效果不佳。

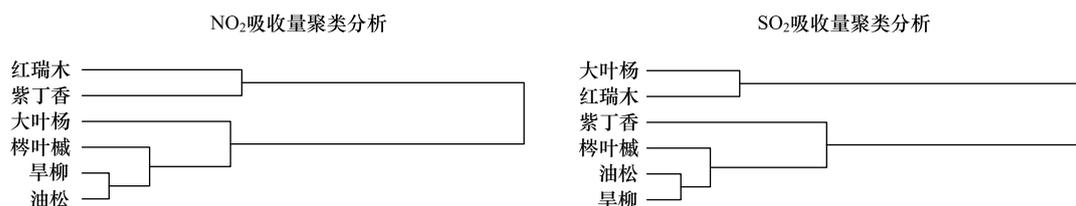


图 4 植物对 SO_2 、 NO_2 的吸收的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of absorption to SO_2 and NO_2

3 讨论

植物通过叶片能有效滞留和吸收空气中悬浮的各种颗粒物和 NO₂、SO₂ 气体, NOWAK 等^[15]对美国多个地区城市森林滞尘能力的研究发现, 每年有 4.7—64.5 t 的悬浮颗粒物被树木滞留。我国学者对上海市公园区颗粒物浓度的研究发现, 靠近林地附近的大气中悬浮颗粒物浓度比空旷区低 9.1%^[16]。

贾明云等^[17]对南京市 5 种园林植物的大气综合净化能力进行探究得出, 广玉兰和雪松对大气 SO₂、NO_x 和细颗粒物(PM_{2.5})的综合去除能力较强。本文研究得出, 供试树种总滞尘量为 0.54—3.82 g/m², 其中红瑞木、紫丁香等的滞尘量为 1.45 g/m²、1.22 g/m²与唐明^[18]的研究结果相近, 对大气 SO₂、NO₂ 的吸收量为 0.93—7.83 g/kg、5.21—31.73 g/kg。油松叶面积指数大, 增加了与大气颗粒物的接触面积, 并且油松会在其针叶表面分泌较多的油脂及一些粘附性的脂类物质, 使得悬浮颗粒物能更有效的吸附在叶片表面^[19], 因为总滞尘量的基数大, 所以油松对其他粒径颗粒物的滞留能力都具有优势。研究表明, 叶表面较粗糙、具有大量的沟槽和突起结构的植物滞尘能力较大, 而叶表面光滑或具有平滑片状组织的植物滞尘能力较差^[20—22]。进一步研究显示, 叶片微结构滞留大气颗粒物的能力依次是沟槽>叶脉+小室>小室>条状凸起^[23—24]。红瑞木等树种叶表面粗糙、生有短柔毛、凹槽较深、气孔密度大, 所以滞尘能力较强^[25], 而旱柳叶表面光滑、具有少量开口小的气孔, 附着部分线状突起, 因此滞尘能力较差^[26]。不同树种对不同粒径颗粒物的滞留能力存在明显差异, 表现出选择性。查燕等^[27]对南京市 4 种植物对不同粒径颗粒物的滞留规律的研究发现, 大颗粒物平均占比 67.54%, 粗颗粒物平均占比 21.62%, 细颗粒物平均占比 10.84%。刘延惠等^[28]表明, 各树种叶面吸滞的颗粒物均以较大颗粒为主, 占总量的 49.76%—60.03%, 粗颗粒占比 38.05%—47.52%, 细颗粒和超细颗粒占比较低。本研究发现, 供试树种滞留 PM_{>10}、PM₃₋₁₀、PM₁₋₃ 的质量分别占总滞尘量(TSP)的 62.33%—83.68%、10.82%—21.41%、4.05%—18.30%, 与上述的研究结果类似。而柳冬香^[29]研究发现细颗粒物和超细颗粒物的质量占比较高, 均超过 50%, 最高可达到 89.15%, 可能原因是不同研究区域大气中悬浮颗粒物的粒径组成以及植物叶表面结构的不同。进一步研究表明, 植物叶表面披有绒毛, 具有沟槽结构更有利于细微颗粒物的滞留^[30—31]。

植物对大气 SO₂ 和 NO_x 的消减一方面通过叶片表面的气孔直接进入植物组织, 另一方面 SO₂、NO_x 等气体可以被吸附在大气颗粒物上, 通过植物叶片的滞尘作用, 进一步被吸收^[32]。本研究得出不同树种对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收能力具有显著差异($P < 0.05$), 红瑞木和紫丁香对大气 NO₂ 的吸收能力较强, 大叶杨和红瑞木对大气 NO₂ 的吸收能力较强, 并且同一树种对 NO₂ 的吸收能力要强于 SO₂。植物对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收净化能力与其抗性和叶片表面结构存在一定的关系。旱柳较为敏感, 对大气污染物的抗性差, 所以其对 SO₂、NO₂ 的吸收效果较差; 而油松的吸收效果差主要是由于油松的叶片呈革质, 质地坚硬, SO₂ 和 NO₂ 气体不能畅通进入叶片内部, 对污染气体的吸收效果产生较大影响^[33—34]。即植物的抗性越强, 其对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收能力不一定越强, 与缪宇明等^[35]的研究结果类似, 可能是植物自身抗性机制差异造成的。本文研究结果表明, 同一树种对 NO₂ 的吸收量要高于 SO₂, 原因是植物对氮素、硫素的转化效率不同, 有研究发现, 有些植物可以很好的利用 NO₂ 气体, 利用体内的专性酶使之参与细胞代谢, 并以有机物的形式将氮素储存在氨基酸和蛋白质中, 因此对 NO₂ 的吸收利用效率更高^[36]。并且, 红瑞木、紫丁香和桉叶桉树种的滞尘量与大气 NO₂、SO₂ 的吸收量具有显著正相关关系, 贾明云^[17], 宋彬等^[37]学者研究发现, 植物对大气 SO₂ 和颗粒物的去除主要依赖叶表面的吸附过程, 叶片表面具有沟状组织、叶面密被绒毛更有利于植物吸附 SO₂ 和 PM_{2.5}, 而 NO_x 的吸收和转化主要依赖于气孔大小和密度。从而证明叶表面的微观结构对大气 SO₂ 和 NO₂ 的吸收转化同样具有积极作用。

4 结论

本文采用水洗-滤膜法和熏气试验探究不同植物对总悬浮颗粒物(TSP)、大颗粒物(PM_{>10})、粗颗粒物

(PM_{3-10})和细颗粒物($PM_{>1-3}$)的滞留规律以及对大气中 SO_2 、 NO_2 的消减,主要研究结果如下:

(1) 不同树种对不同颗粒物的滞留量具有显著差异($P<0.05$)。对于总悬浮颗粒物(TSP)的滞留量从大到小依次为:油松(3.82 ± 0.40) g/m^2 >红瑞木(1.45 ± 0.12) g/m^2 >紫丁香(1.22 ± 0.17) g/m^2 >椴叶槭(1.21 ± 0.13) g/m^2 >大叶杨(0.93 ± 0.17) g/m^2 >旱柳(0.54 ± 0.14) g/m^2 。

(2) 树种间对不同颗粒物的滞留量具有显著差异($P<0.05$)。供试树种对不同粒径颗粒物滞留的质量占比表现为, $PM_{>10}$ (62.33%—83.68%)、 PM_{3-10} (10.82%—21.41%)、 PM_{1-3} (4.05%—18.30%)。

(3) 不同树种对大气 SO_2 和 NO_2 的吸收能力具有显著差异($P<0.05$)。供试树种对大气 NO_2 的消减能力依次为:红瑞木(31.73 ± 3.52) g/kg >紫丁香(24.61 ± 2.26) g/kg >大叶杨(13.43 ± 1.56) g/kg >椴叶槭(8.82 ± 1.32) g/kg >旱柳(6.41 ± 0.61) g/kg >油松(5.21 ± 0.31) g/kg ;对大气 SO_2 的消减能力依次为:大叶杨(7.83 ± 0.35) g/kg >红瑞木(6.71 ± 0.43) g/kg >紫丁香(3.56 ± 0.22) g/kg >椴叶槭(1.90 ± 0.17) g/kg >油松(1.34 ± 0.07) g/kg >旱柳(0.93 ± 0.02) g/kg 。

(4) 红瑞木、紫丁香和椴叶槭的滞尘量与大气 NO_2 、 SO_2 的吸收量具有显著正相关关系。

(5) 红瑞木、紫丁香和大叶杨的综合滞尘能力以及大气 NO_2 、 SO_2 的消减能力较强,可作为优先考虑的城市道路绿化树种。

植物叶片滞尘效应是一个综合作用的结果,是一个动态变化量,受植物本身的生理结构、外界环境、群落组成等的影响,研究成果也表现出较强的地域局限性。本文研究只针对几种乔灌木类树种的滞尘能力进行初步探究,而对于草本类和攀援类植物的滞尘效应如何、植物叶表面微结构与滞尘量的大小之间的关系如何、以及植物对大气 SO_2 、 NO_2 的吸收净化机制等并没有做深入探讨,这也是今后需要继续研究的方向。

参考文献(References):

- [1] Zhou S J, Cong L, Liu Y, Xie L M, Zhao S Q, Zhang Z M. Rainfall intensity plays an important role in the removal of PM from the leaf surfaces. *Ecological Indicators*, 2021, 128: 107778.
- [2] Santovito A, Gendusa C, Cervella P, Traversi D. In vitro genomic damage induced by urban fine particulate matter on human lymphocytes. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 8853.
- [3] Qin Y, Zhang H, Liu Q Y, Jiang B, Chen J J, Zhang T. Sulforaphane attenuates oxidative stress and inflammation induced by fine particulate matter in human bronchial epithelial cells. *Journal of Functional Foods*, 2021, 81: 104460.
- [4] 赵云阁, 鲁笑颖, 鲁绍伟, 谷建才, 陈波, 李少宁. 北京市常见绿化树种叶片秋季滞纳不同粒径颗粒物能力. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 35-42.
- [5] 刘凤芹, 刘斌, 鲁绍伟, 李少宁, 杨超. 北京 7 种经济林吸滞 $PM_{2.5}$ 特征及其价值评估. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 124-129.
- [6] 殷云龙, 骆永明, 张桃林, 贺剑锋, 徐建华. 南京市城乡公路蜀桧叶片中金属元素和氮、硫含量分析. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 929-932.
- [7] Baraldi R, Neri L, Costa F, Facini O, Rapparini F, Carriero G. Ecophysiological and micromorphological characterization of green roof vegetation for urban mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 37: 24-32.
- [8] 李海梅, 党宁, 禹靓倩, 张涵丹, 陈光才. 5 个园林树种滞尘能力与叶表形态及颗粒物粒径的关系. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 84-94.
- [9] 刘佩琪, 邓志华, 陈奇伯. 城市园林对大气颗粒物的消减与大气中二氧化硫和氮氧化物的浓度变化. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 13-18.
- [10] 圣倩倩. 园林植物对大气 NO_2 消减能力的实践评价与耐受机理试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [11] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶片滞尘动态变化. *生态学报*, 2015, 35(6): 1696-1705.
- [12] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, Viana M M, Alarcón M, Mantilla E, Ruiz C R. Comparative PM_{10} - $PM_{2.5}$ source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 2004, 328(1/3): 95-113.
- [13] 张艳梅, 伍岗, 何青元, 来兴正, 孙成冕, 浦绍柳. 利用数码相机测定茶叶面积的新方法. *安徽农业科学*, 2011, 39(30): 18987-18988.
- [14] 李辰. 社区散生林木叶片滞留大气颗粒物能力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [15] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395-402.
- [16] Yin S, Shen Z M, Zhou P S, Zou X D, Che S Q, Wang W H. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach

- in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2155-2163.
- [17] 贾明云, 李密密, 周冬琴, 蒋道道, 于金平. 南京 5 种园林植物对大气污染物的综合净化能力. *江苏农业科学*, 2019, 47(23): 158-163.
- [18] 唐明. 工矿区主要园林植物滞尘效应研究——以唐钢文化广场绿地为例. *安徽农业科学*, 2018, 46(10): 78-81.
- [19] 史军娜, 张罡, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 夏新莉. 北京市 16 种树木吸附大气颗粒物的差异及颗粒物研究. *北京林业大学学报*, 2016, 38(12): 84-91.
- [20] 李少宁, 鲁绍伟, 刘斌, 鲁笑颖, 陈军丽, 李辉. 北京主要绿化树种叶表面微形态与 PM_{2.5} 吸滞能力. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(8): 98-107.
- [21] 陈小平. 武汉城市干道绿化隔离带消减颗粒物效应及优化建议[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [22] Shao F, Wang L H, Sun F B, Li G, Yu L, Wang Y J, Zeng X R, Yan H, Dong L, Bao Z Y. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939-951.
- [23] 张桐, 洪秀玲, 孙立炜, 刘玉军. 6 种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系. *北京林业大学学报*, 2017, 39(6): 70-77.
- [24] 张鹏骞, 朱明溟, 刘艳菊, 杨峥. 北京路边 9 种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2126-2133.
- [25] 李耀华, 玉米提·哈力克, 木尼拉·阿不都木太力甫, 陈晖, 阿丽亚·拜都热拉. 城市园林树木叶面微结构特征对大气颗粒物滞留能力的影响. *生态学报*, 2022, 42(6): 2228-2236.
- [26] 刘鹏. 青岛常见园林树种叶表面结构观察[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2016.
- [27] 查燕, 马华升, 俞祥群, 张银龙. 城市绿化植物对不同粒径大气颗粒物的吸附特征研究. *环境污染与防治*, 2020, 42(7): 807-811, 819-819.
- [28] 刘延惠, 侯贻菊, 舒德远, 杨冰, 崔迎春, 丁访军. 贵阳市主要绿化树种叶面吸滞颗粒物特征及其时空变化. *林业科学*, 2020, 56(6): 12-25.
- [29] 柳冬香. 福州市普通公路主要绿化树种叶片显微结构与滞尘能力. *江西农业大学学报*, 2021, 43(4): 853-865.
- [30] 闫倩, 徐立帅, 段永红, 潘李超, 刘立文, 杨玉莹. 20 种常用绿化树种叶面滞尘能力及滞尘粒度特征. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3259-3267.
- [31] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征. *生态学报*, 2020, 40(1): 213-222.
- [32] 谢长坤, 郭健康, 梁安泽, 汪静, 姜睿原, 车生泉. 园林植物表面对大气颗粒物削减过程研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(5): 38-43.
- [33] 潘文, 张卫强, 张方秋, 刘吉平, 段金平, 陈洁. 广州市园林绿化植物苗木对二氧化硫和二氧化氮吸收能力分析. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 606-612.
- [34] 王韬远, 朱志国. 大气污染对城市典型植物叶片生理特性的影响. *北方园艺*, 2018, (10): 127-135.
- [35] 缪宇明, 陈卓梅, 陈亚飞, 杜国坚. 浙江省 38 种园林绿化植物苗木对二氧化氮气体的抗性及其吸收能力. *浙江林学院学报*, 2008, 25(6): 765-771.
- [36] 吴耀兴, 康文星, 郭清和, 王卫文. 广州市城市森林对大气污染物吸收净化的功能价值. *林业科学*, 2009, 45(5): 42-48.
- [37] 宋彬, 王得祥, 张义, 刘红茹. 13 种园林树种叶片解剖结构与其二氧化硫吸收能力的关系. *西北植物学报*, 2015, 35(6): 1206-1214.