2种常用的植物滞纳能力测定方法对比研究*

张碧媛[1,2] 李智琦[2] 阮 琳[2] 潘勇军[2]
陈国财[2] 代色平[2] 冯娴慧[1,2]
（1. 华南理工大学 建筑学院风景园林系，广东 广州 510640；2. 广州市林业和园林科学研究院 / 广州市景观建筑重点实验室 / 广东广州城市生态系统国家定位观测研究站，广东 广州 510405）

摘要 测量评估植物叶片滞纳颗粒物能力是开展植物减霾净化研究的关键，文章以叶片特征差异较大的10种常见乔木为研究对象，分别采用气溶胶再发生器法和滤膜法进行测定，通过两种方法准确性、耗时成本、操作难度等多方面因素的综合比较选择适合广州植物滞纳大气颗粒物的测定方法。结果表明：（1）定性判断不同植物滞纳颗粒物能力大小时，气溶胶再发生器法的准确性、稳定性优于滤膜法；（2）滤膜法的实验耗时是气溶胶再发生器法的两倍，且操作难度较大，在进行大量采样测定时，宜采用气溶胶再发生器法；（3）采集充分接受粉尘的植物叶片为样本可能有利于提高气溶胶再发生器法的准确性。

关键词 气溶胶再发生器法；滤膜法；单位叶面积滞尘量；方法对比
中图分类号：A718.5 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-2053（2023）01-0112-08

A Comparative Study of Two Commonly Used Methods for Measuring Plant Dust Retention

ZHANG Biyuan[1,2] LI Zhiqi[2] RUAN Lin[2] PAN Yongjun[2]
CHEN Guocai[2] DAI Seping[2] FENG Xianhui[1,2]
（1.The Department of Landscape Architecture, School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture/Guangzhou Municipal Key Laboratory of Landscape Architecture/Guangzhou Urban Ecosystem National Field Station, Guangzhou, Guangdong 510405, China）

Abstract Measuring the ability of plant leaves to trap particulate matter is key to conducting studies on air purification by plants. In this study, 10 common trees with different leaf characteristics were used for the determination of aerosol regenerator method and filter membrane method, and the method was selected by comparing the accuracy, time and cost consumption, operational difficulty and other factors. The results show that the aerosol regenerator method is more accurate and stable than the filter membrane method when qualitatively determining the size of particle holding capacity of different plants; the aerosol regenerator method is more time and labor efficient, and it is advisable to use the aerosol regenerator method when conducting a large number of sampling measurements; collecting plant leaves that fully receive dust as samples may be beneficial to improve the accuracy of the aerosol regenerator method.

Key words aerosol regenerator method；membrane filter method；amount of dust retention per leaf area；method comparison

* **基金项目**：广州市科技计划项目（202206010058）。
第一作者：张碧媛（1997—），女，硕士研究生，研究方向为风景园林植物与应用，E-mail：250202456@qq.com。
通信作者：代色平（1975—），女，教授级高级工程师，主要从事园林植物应用研究，E-mail：383856367@qq.com。
冯娴慧（1977—），女，副教授，主要从事绿地生境机理、园林植物应用、城市微气候等研究，E-mail：xhfeng@scut.edu.cn。

中国城市化的快速发展引发了诸多环境问题，空气污染是公众广泛关注的环境问题之一 [1]。研究表明，粒径在 10 μm 以下的颗粒污染物可随呼吸进入人体，而粒径在 2.5 μm 以下的可侵入肺泡并长期停留，对人体有极大危害 [2]。而国内外大量研究表明，植物具有净化空气颗粒物的作用 [3]。目前以园林植物个体滞尘能力及作用机理的研究居多。总体来看，植物个体的滞尘能力受外因和内因多方面因素的影响。其中外界因素包括车流量，尘源距离等；内在因素包括气孔大小及密度 [4]、叶表面粗糙程度 [5]、叶片分泌物 [6]、叶面积以及叶片倾角等 [7]。

在植物滞尘能力的测定方法上，常用的有滤膜法（MF）[8]、气溶胶再发生器法（AR）[9]、基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法（ultrasonic-EWPA）[10]、质量差法（MS）[11]、电镜扫描法（SEM）[10-11] 以及 i-Tree 模型 [12]、UFORE 模型 [13] 等模型模拟法。

统计近 10 a 内 273 篇滞尘测定方法的研究文献表明（图 1），使用最为广泛的植物滞尘测定方法为质量差法，共 139 篇占比 51%；其次是气溶胶再发生器法占比 18%；滤膜法占比 16%。但质量差法只能测得植物叶片滞尘总量，无法得出不同粒径所占比例。气溶胶再发生器法、滤膜法、洗脱称量粒度分析法、电镜扫描法均能对植物叶片滞纳的不同径级颗粒物含量进行测定，其中最常用的两种方法分别为气溶胶再发生器法以及滤膜法。但受研究对象、采样环境、实验操作等多种因素的影响，许多研究结果不具有可比性，不同方法间的差异对比研究较少。

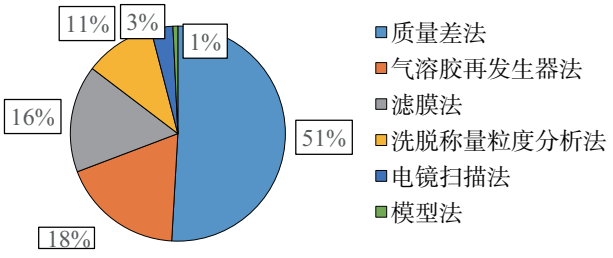

图 1 植物滞尘能力文献统计

Fig.1 Statistical chart of the literature review of plant dust retention

针对上述问题，本研究在相同条件下选取叶片特征差异较大的 10 种常见乔木为研究对象，首先采用气溶胶再发生器法（AR，后面简称气溶胶法）和滤膜法（MF）分别测定植物叶片对不同粒径颗粒物的滞纳量，再依据现有相关研究结果，从 10 种植物单位叶面积滞纳 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PM_1 情况的准确性、两种方法的耗时成本、操作难度等方面进行对比分析，以确定两种方法中更加准确稳定、省时省力的实验方法，并探究减小该方法误差，提高其准确性的策略，以期为今后园林植物滞尘测定方法的选择提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

采样地点位于广州市林业和园林科学研究院东北门前的广园中路路段（113°28′53.99″E,23°16′58.43″N~113°29′02.41″E,23°16′27.15″N），该路段为双向 10 车道，车流量大，工作日单向车流量可达 7 万车次 /d。道路绿化以行道树为主，主要植物有高山榕 *Ficus altissima*、尖叶杜英 *Elaeocarpus apiculatus*、秋枫 *Bischofia javanica*、腊肠树 *Cassia fistula* 等。采样区域为路旁行道树带，粉尘主要来源为区域大气污染传输以及道路车辆、行人活动所造成的扬尘。

1.2 实验材料

选择叶片结构存在明显差异的 10 种乔木为研究对象（表 1），其中构树 *Broussonetia papyrifera* 与对叶榕 *Ficus hispida* 为华南地区强滞尘能力树种 [14-15]，作为比较其他树种滞尘能力的对照。

1.3 两种测定方法对比试验

1.3.1 采样及处理 2021 年 10 月 28 日，连续 5 d 为晴朗天气后采集所需样品叶片。每个树种均选择长势良好、健康无病害的 3 个植株作为样树。用高枝剪从每株样树的东南西北方向及上中下部位随机采集小枝，再从各小枝上小心剪取生长良好、大小一致的叶片，大叶 80 枚、小叶 200 枚左右，连同叶柄小心放入密封袋中，做好标记备用，剪取过程中尽量不要抖动。

1.3.2 测定方法 （1）滤膜法：滤膜法基于质量差法，洗脱液分别通过孔径为 10 μm、2.5 μm、1 μm 和 0.25 μm 的微孔滤膜，最终得到 $PM_{>10}$、$PM_{2.5\text{-}10}$、$PM_{1\text{-}2.5}$ 以及 $PM_{0.25\text{-}1}$ 的质量。本研究中总悬浮颗粒物（TSP）质量为四者之和，PM_{10} 的质量为 $PM_{2.5\text{-}10}$、$PM_{1\text{-}2.5}$ 以及 $PM_{0.25\text{-}1}$ 之和，$PM_{2.5}$ 质量为 $PM_{1\text{-}2.5}$ 与 $PM_{0.25\text{-}1}$ 之和 [14]。（2）气溶胶法：将叶片样品放入气溶胶再发生器的料盒中，通过

持续的风力将颗粒物从叶片表面吹起并混合均匀，形成颗粒物气溶胶，利用粉尘检测仪（分辨率 0.001 mg · m^{-3}; 取样时间 360 s）测定气溶胶中 PM_1、$PM_{2.5}$、PM_{10} 和 TSP 的浓度，根据料盒的体积换算得到上述类型颗粒物质量。

1.3.3 测定指标 （1）叶面积及单位叶面积滞尘量：叶面积测量采用方格网法。根据如下公式计算各植物 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 与 PM_1 单位叶面积滞尘量。

$$M_{leaf}=M_1/S_{leaf}$$

式中，M_{leaf} 为单位叶面积滞尘量（μg · cm^{-2}）；M_1 为叶片滞纳颗粒物含量（μg）；S_{leaf} 为样品叶片总面积（cm^2）。

（2）耗时及成本：用手表计时，计算 2 种测定方法的耗时量。除实验室现有仪器设备外，购买耗材所花费的资金总和，计算其成本。

1.4 气溶胶法准确性验证

气溶胶法准确性验证实验于 2021 年 11 月 13 日采样，首先选取 3 棵长势良好的行道树高山榕，分别在其垂直于道路方向以及面向行人方向随机采集适量叶片，用于测定同种植物不同位置叶片的滞尘量差异，继而采集适量充分接触粉尘垂直于道路一侧秋枫、高山榕以及尖叶杜英的叶片来比较 3 种植物的滞尘能力。

1.5 叶片特征对比研究

采用文献法研究叶片的宏观和微观结构。目前华南地区已有细叶榕 *Ficus microcarpa*、高山榕、尖叶杜英、大花紫薇 *Lagerstroemia speciosa*、红花羊蹄甲 *Bauhinia blakeana* 等植物滞尘能力与叶片表面微观结构的关系，将现有研究成果，作为衡量两种方法准确性的依据之一。

2 结果与分析

2.1 不同方法测定结果比较分析

2.1.1 气溶胶法滞尘能力分析 如表 2 所示，利用气溶胶法所得出的 10 种植物对不同粒径颗粒物的滞纳能力存在显著差异（P<0.05）。

从单位叶面积 TSP 滞留量来看，构树最强，其次是对叶榕与尖叶杜英，两者能力相当，均大于 10.0 μg · cm^{-2}；再次为美丽异木棉、秋枫、澳洲鸭脚木等，均大于 3.5 μg · cm^{-2}；滞纳量最低的两种植物分别为腊肠树和高山榕。各树种叶片滞纳 PM_{10} 的能力排序与 TSP 基本一致，但滞纳量均低于 TSP。

各供试树种在 $PM_{2.5}$ 以及 PM_1 的滞纳能力排序上与 TSP 以及 PM_{10} 有所不同，单位叶面积滞留 $PM_{2.5}$ 能力由强到弱依次为构树 > 对叶榕 > 尖叶杜英 > 秋枫 > 美丽异木棉 > 高山榕 > 腊肠树 > 菩提榕 > 澳洲鸭脚木 > 阴香，单位叶面积滞纳 PM_1 能力的排序为构树 > 对叶榕 > 高山榕 > 秋枫 > 尖叶杜英 > 美丽异木棉 > 腊肠树 > 菩提榕 > 澳洲鸭脚木 > 阴香。

2.1.2 滤膜法滞尘能力分析 如表 3 所示，滤膜法所得出的 10 种植物单位叶面积 TSP、$PM_{2.5}$ 滞纳能力差异显著（P<0.05），但单位叶面积 PM_{10}、PM_1 滞纳能力差异不显著。

表 1 供试植物基本信息

Table 1 Basic information of the test plants

植物种类 Specie	学名 Botanical name	科 Family	属 Genus
尖叶杜英	*Elaeocarpus apiculatus*	杜英科 Elaeocarpaceae	杜英属
澳洲鸭脚木	*Schefflera macrostachya*	五加科 Araliaceae	鹅掌柴属
菩提榕	*Ficus religiosa*	桑科 Moraceae	榕属
阴香	*Cinnamomum burmannii*	樟科 Lauraceae	樟属
美丽异木棉	*Ceiba speciosa*	木棉科 Bombacaceae	吉贝属
高山榕	*Ficus altissima*	桑科 Moraceae	榕属
腊肠树	*Cassia fistula*	苏木科 Caesalpiniaceae	决明属
秋枫	*Bischofia javanic*a	大戟科 Euphorbiaceae	秋枫属
构树	*Broussonetia papyrifera*	桑科 Moraceae	构属
对叶榕	*Ficus hispida*	桑科 Moraceae	榕属

表 2 气溶胶法 10 种植物单位叶面积 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PM_1 滞纳量（平均值 ± 标准误差） μg·cm^{-2}

Table 2 TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1 hysteresis per unit leaf area of 10 plant species by aerosol method (mean ± standard error)

植物种类 Specie	单位叶面积滞纳量 Retention per unit leaf area			
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
构树	26.365 ± 0.996	6.447 ± 0.709	1.461 ± 0.039	0.364 ± 0.005
对叶榕	11.494 ± 1.213	3.782 ± 0.481	0.753 ± 0.110	0.223 ± 0.037
尖叶杜英	10.467 ± 0.661	3.250 ± 0.101	0.640 ± 0.027	0.163 ± 0.006
美丽异木棉	5.501 ± 0.034	1.309 ± 0.156	0.333 ± 0.025	0.160 ± 0.031
秋枫	4.856 ± 0.759	1.355 ± 0.089	0.369 ± 0.029	0.181 ± 0.031
澳洲鸭脚木	4.546 ± 0.066	1.043 ± 0.054	0.187 ± 0.021	0.064 ± 0.005
阴香	4.522 ± 0.362	1.002 ± 0.184	0.155 ± 0.008	0.035 ± 0.012
菩提榕	3.541 ± 0.434	1.001 ± 0.156	0.238 ± 0.047	0.108 ± 0.024
腊肠树	2.109 ± 0.495	0.731 ± 0.057	0.238 ± 0.031	0.127 ± 0.026
高山榕	1.066 ± 0.342	0.497 ± 0.140	0.323 ± 0.096	0.206 ± 0.056

表 3 滤膜法 10 种植物单位叶面积 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 PM_1 滞纳量（平均值 ± 标准误差） μg·cm^{-2}

Table 3 TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$ and PM_1 hysteresis per unit leaf area of 10 plant species by the filter membrane method (mean ± standard error)

植物种类 Specie	单位叶面积滞纳量 Retention per unit leaf area			
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
高山榕	89.454 ± 3.339	9.352 ± 1.104	4.548 ± 0.577	1.914 ± 0.574
对叶榕	74.530 ± 4.722	5.415 ± 0.549	3.139 ± 0.164	1.316 ± 0.069
尖叶杜英	50.028 ± 5.507	6.521 ± 0.150	3.519 ± 0.074	1.477 ± 0.074
构树	48.951 ± 7.470	7.091 ± 1.094	3.318 ± 0.838	1.361 ± 0.366
阴香	44.257 ± 6.646	5.955 ± 0.435	2.560 ± 0.400	1.050 ± 0.170
菩提榕	42.743 ± 5.386	8.769 ± 0.331	5.160 ± 0.687	2.173 ± 0.292
秋枫	40.895 ± 2.412	9.501 ± 0.795	5.412 ± 0.523	2.265 ± 0.502
腊肠树	32.549 ± 2.528	9.091 ± 1.561	6.232 ± 1.168	2.614 ± 0.498
澳洲鸭脚木	26.677 ± 3.889	7.313 ± 1.702	4.107 ± 1.488	1.722 ± 0.636
美丽异木棉	22.126 ± 2.773	7.996 ± 1.296	2.795 ± 0.389	1.145 ± 0.167

从单位叶面积 TSP 滞留量来看，高山榕最大，其次分别为对叶榕、尖叶杜英、构树和阴香等，均大于 40.0 μg · cm^{-2}；滞纳量最低的 3 种植物分别为腊肠树、澳洲鸭脚木和美丽异木棉。

各树种单位叶面积滞纳 PM_{10} 能力的情况与 TSP 相比有较大变化。其中滞纳 PM_{10} 能力最强 3 种植物分别为秋枫、高山榕与腊肠树，数值均在 9.0 μg · cm^{-2} 以上；其次为菩提榕、美丽异木棉、澳洲鸭脚木、构树和尖叶杜英，最弱的两种植物为阴香和对叶榕。

但各供试树种在 $PM_{2.5}$ 以及 PM_1 的滞纳能力排序上基本一致，单位叶面积滞留 $PM_{2.5}$ 能力由强到弱依次为腊肠树 > 秋枫 > 菩提榕 > 高山榕 > 澳洲鸭脚木 > 尖叶杜英 > 构树 > 对叶榕 > 美丽异木棉 > 阴香。

2.2 两种测定方法结果差异分析

两种方法对比来看，滤膜法所得到的单位叶面积 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 PM_1 滞纳量均高于气溶胶法。对于单位叶面积滞纳 TSP 这一指标，气溶胶法的测定结果与滤膜法相比有很大差异，两者

差异范围在16.625~88.388 μg · cm^{-2}之间，差异最大的植物为高山榕和对叶榕，差异较小的为美丽异木棉、构树、澳洲鸭脚木等。从10种植物单位叶面积TSP滞纳量排序来看，气溶胶法与滤膜法排序差异较大的植物为高山榕和美丽异木棉，其中美丽异木棉在气溶胶法中位列第4，高山榕最低，而在滤膜法中高山榕单位叶面积TSP滞纳量最高，美丽异木棉最低。

与单位叶面积TSP滞纳量相比，单位叶面积PM_{10}滞纳量两种方法差异较小，差异范围为0.644~8.855 μg · cm^{-2}，差异最大的植物为高山榕和秋枫，差异最小的植物为构树和对叶榕，但在10种植物单位叶面积PM_{10}滞纳量排序中，两种方法差异较大，排序几乎无相似之处。

对于单位叶面积$PM_{2.5}$和PM_1滞纳量两个指标，两种方法的差异值范围分别为1.857~5.994 μg · cm^{-2}、0.985~2.487 μg · cm^{-2}。两个指标下，差异值最大的植物为腊肠树，差异值最小的为构树，且除阴香外其余9种植物排序同样差异较大。

2.3 气溶胶法准确性验证实验结果分析

受气溶胶再发生器料盒容量限制，每次实验放入料盒内的叶片面积应在300~400 cm^2。因此大叶片放入料盒内的数量较少且具有随机性，可能造成实验结果误差。采集充分接受粉尘的叶片为实验样本，理论上会缩小叶片样本之间的滞尘量差距，进而提高实验结果的准确性。气溶胶法准确性验证实验即为进一步减小气溶胶法误差而开展的研究。

从对行道树高山榕垂直道路一侧以及面向人行道一侧叶片滞尘的测定结果来看，由于广园中路车流量大，靠近道路一侧的扬尘多于面向人行道一侧，因此高山榕靠近道路一侧的TSP、PM_{10}滞纳量明显高于靠近人行道一侧，但$PM_{2.5}$和PM_1滞纳量无明显差异，总体来看垂直于道路一侧的叶片更能充分接受粉尘（表4）。

如表5所示，叶片采集时间同样为连续5 d晴朗天气，充分接触粉尘的尖叶杜英、秋枫和高山榕单位叶面积滞尘量差异显著（P<0.05），3种植

表4 高山榕不同方向叶片单位叶面积滞尘量 μg · cm^{-2}

Table 4 Dust retention per unit leaf area of *F. altissima* leaves in different directions

叶片位置 Leaf position	单位叶面积滞纳量 Retention per unit leaf area			
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
A01	4.498	1.382	0.244	0.079
A02	6.280	1.322	0.310	0.177
A03	8.453	1.328	0.261	0.128
平均值	6.410	1.344	0.272	0.128
B01	0.628	0.266	0.1940	0.106
B02	1.820	0.857	0.372	0.224
B03	0.986	0.439	0.170	0.120
平均值	1.145	0.521	0.245	0.150

注：A为靠近道路一侧，B为面向人行道一侧；01，02，03分别为3株高山榕编号。

Note: A is near the road side, B is facing the sidewalk side; 01, 02, 03 are the numbers of three *F. altissima* plants respectively.

表5 3种植物充分接受粉尘单位叶面积滞尘量（平均值 ± 标准误差） μg · cm^{-2}

Table 5 Dust retention per unit leaf area for three plants fully receiving dust (mean ± standard error)

植物种类 Specie	单位叶面积滞纳量 Retention per unit leaf area			
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1
尖叶杜英	26.031 ± 1.883	5.008 ± 0.693	0.644 ± 0.080	0.233 ± 0.018
秋枫	6.447 ± 0.416	1.421 ± 0.068	0.330 ± 0.020	0.087 ± 0.001
高山榕	8.045 ± 0.964	1.749 ± 0.323	0.353 ± 0.107	0.132 ± 0.048

物单位叶面积 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 滞纳量均比方法对比实验结果高，滞尘能力排序由尖叶杜英 > 秋枫 > 高山榕变为尖叶杜英 > 高山榕 > 秋枫，与郑素兰 [16]、薛文川 [17] 等的结论一致，因此采集充分接受粉尘的叶片可能有利于提高气溶胶法的准确性。

2.4 叶片特征比较分析

10 种植物中，菩提榕、澳洲鸭脚木、阴香、腊肠树叶片均革质光滑。构树叶片上表面粗糙，密被锥形毛，周围形成密集条纹突起，沟槽间距小，下表面密被气孔和白色棉毛 [14]。对叶榕上表面覆盖密集绒毛，褶皱紧密，下表面气孔分布紧密，有纤毛以及蜂窝状凹坑组织，同样可附着大量颗粒物 [15]。高山榕气孔密度和开口较大，在一定程度上更容易阻滞各种粒径的颗粒物，具有相对较高的滞尘能力 [18]。美丽异木棉上表面结构与榕树相似，但下表面具有许多深且复杂的褶皱形成网状结构，有利于大颗粒物附着 [19]。

从 10 种植物叶片特征来看，叶片粗糙的构树、对叶榕等植物滞尘能力较强，叶片光滑的阴香、菩提榕等植物滞尘能力较弱。叶片特征是影响植物滞尘能力的重要因素，但植物叶片滞尘能力还与其树冠大小、枝条以及叶片着生方式等其他因素相关，因此植物滞尘能力应综合多方面因素共同考量。

3 结论与讨论

3.1 本研究通过气溶胶法和滤膜法，进行了 10 种植物单位叶面积 TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$、PM_1 滞纳量的测定，从实验结果准确性、耗时成本、操作难度等方面开展对比分析，并验证了气溶胶法减小误差提高准确性的策略。结果表明：（1）滤膜法和气溶胶法测得的单位叶面积滞尘量数值可能都不准确，但在定性比较不同植物滞尘能力大小时，气溶胶法更加准确和稳定；（2）气溶胶法对比滤膜法省时省力，当样品量较大时，选择气溶胶法可以大大缩短检测时间，降低实验成本；（3）利用气溶胶法进行测定时，采集充分接触粉尘的叶片作为实验样本在一定程度上可能会减小气溶胶法的误差。

3.2 植被通过滞留、附着和粘附 [20]3 种方式发挥其显著的滞尘效益。2015—2017 年重庆市阔叶混交林的年平均滞尘量约为 40 kg/hm^2[21]；2013 年石家庄市园林绿地吸附 PM_{10} 的总量为 13 813.4 $t \cdot a^{-1}$，吸附 $PM_{2.5}$ 的总量为 6974.6 $t \cdot a^{-1}$[22]，然而不同植物种类滞尘能力具有明显差异。

相同环境条件下，植物滞尘能力与其树冠结构、枝叶密度、叶片特征等密切相关。供试植物中，构树叶片具有多种有利于粉尘附着的结构特征，胡羡聪等 [23] 在珠三角地区测得构树具有极强的滞尘能力，单株滞尘量最大。陈雪华 [15] 对海口 5 种榕树滞尘能力比较发现对叶榕滞尘能力最强，单位叶面积滞尘量为 1.692 5 g/m^2。刘璐等 [18] 在广州市 18 种绿化树种中测得高山榕单位叶面积滞尘量为 1.707 g/m^2，排序第 3。王燕 [24] 研究发现，广东省美丽异木棉的叶片滞尘能力较强，这与其叶片的复杂褶皱有关。尖叶杜英由于枝条硬度大、枝条及叶片均向上生长，叶片与水平面夹角多为正值，因此单位叶面积滞尘量较大 [25]。秋枫属于高大乔木，冠大荫浓，枝繁叶茂，由于单位叶面积滞尘量与树冠大小成正相关关系 [26]，因此其单位叶面积滞尘量可能相对较高。薛文川 [17] 同样通过实验测得广州 11 种乔木植物中，尖叶杜英大径级颗粒物滞纳量最高，而秋枫各径级颗粒物滞纳能力处于中等水平。叶面积是影响粉尘吸附量的因素之一，单叶面积较大的树种其单位叶面积滞尘量可能较大，但由于其他因素影响，两者不存在正相关关系。澳洲鸭脚木在本研究 10 种植物中单叶面积最大，叶片光滑，其单位叶面积滞尘量与其他叶片光滑植物相比可能较大 [26]。菩提榕、阴香、腊肠树叶片革质光滑，且无其他明显有利于滞尘的因素，滞尘能力相对较小 [27-28]。

通过 10 种植物树冠、叶片特征等多种因素的比较可以看出，不同植物滞尘能力差异显著。初步推断构树、对叶榕为强滞尘植物；尖叶杜英、高山榕、美丽异木棉属于滞尘能力较好的植物；秋枫、澳洲鸭脚木为单位叶面积滞尘量可能较大的植物；菩提榕、阴香以及腊肠树属滞尘能力较弱的植物。

3.3 从所有指标测定数值结果来看，滤膜法均高于气溶胶法，这与大多数采用这 2 种方法的研究结果一致 [29]。主要原因有：滤膜法中使用的滤膜可能含有杂质 [30]；滤膜极易堵塞，堵塞后少部分滤液可能未经过滤从滤膜边缘渗入烧杯中，“少量多次”的过滤方法可缓解滤膜堵塞状况，但会大量增加称重次数，加重误差；气溶胶法测量过程中受叶

片表面结构影响，叶片上的颗粒物可能无法全部被强风吹落形成气溶胶，导致测量数值偏低[31]。

从滞尘排序结果来看，气溶胶法中TSP与PM_{10}滞纳能力排序几乎相同，排序结果基本符合由植物树冠及叶片特征出发得出的初步推断，也同样基本符合其他学者对华南地区同种植物的测定排序。例如，陈雪华[15]测得对叶榕滞尘能力大于高山榕；李寒娥等[28]研究发现尖叶杜英滞尘能力大于阴香；胡羡聪等[23]发现构树滞尘量大于高山榕等，只高山榕滞尘能力低于秋枫这一结果与郑素兰[16]、刘璐等[18]明显不同。

而滤膜法所得到的排序结果为高山榕单位叶面积TSP滞纳量最大，秋枫、高山榕单位叶面积滞纳PM_{10}最大，构树与尖叶杜英却处于滞纳PM_{10}能力的中下等水平，美丽异木棉为滞尘能力最弱的植物。这与其他学者的研究结果不符[15,23,24]，且叶片表面气孔大小和密度不是影响滞尘能力的决定性因素，表面绒毛、沟槽等其他结构的影响更大[19]。由此可以看出，滤膜法得到的植物滞尘能力排序并不准确。此外，滤膜法得出的10种植物单位叶面积TSP与PM_{10}滞纳量排序截然不同，这与吴翠蓉等[32]得出的各树种叶片滞纳PM_{10}的能力排序应与TSP基本一致不符，可能是由于实验复杂繁琐的操作所导致的误差。

3.4 气溶胶法完成一种植物的滞尘测定需1.5 h，滤膜法则需3 h，耗时是气溶胶法的2倍。气溶胶法所需实验器材较为简单，相比之下，滤膜法需蒸发皿、烧杯、尼龙刷、不同孔径的滤膜、过滤器、注射器、天平以及烘箱等。此次实验除实验平台现有设备及器材外，气溶胶法无额外支出，滤膜法共花费161元。岳晨等[29]的研究也表明在滤膜法、基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法、电镜扫描法、质量差法以及气溶胶法中，滤膜法是所有方法中耗时最长的测定方法，而气溶胶法则是耗时最短的方法。

从实验操作难度来看，气溶胶法只要求实验者熟练掌握仪器的操作；而滤膜法由于滤膜孔隙较小容易堵塞，导致过滤过程十分缓慢，滤液常从过滤器中渗出，操作难度较大，对实验要求较高。

3.5 气溶胶再发生器料盒容量有限，当叶片较大时，放入料盒内的叶片数量较少。若按传统方式在树冠四周均匀采样，即使3次重复，可能也无法涵盖树冠周围所有方向的叶片，且叶片样品抽取具有随机性，植物不同位置叶片的滞尘量又有较大不同[33]，可能对实验结果造成影响。若采集充分接受粉尘的叶片为实验样本，可以缩短样本与样本之间的滞尘量差距，有利于减小气溶胶法的实验误差。本研究中，两种测定方法对比试验结束后，分析发现气溶胶法中高山榕的实验结果与现有结论不符，可能是由于上述原因造成的误差，因此开展了气溶胶法准确性验证实验。

通过气溶胶法准确性验证实验，发现不同位置的植物叶片颗粒物滞纳量不同，相同植物处于车流量大扬尘多位置的叶片滞尘量明显大于其他位置，这与王远森[34]等人的研究结果相同。再重新采集充分接触粉尘的尖叶杜英、高山榕与秋枫叶片样本进行检测后，发现滞尘排序由尖叶杜英>秋枫>高山榕，变为尖叶杜英>高山榕>秋枫，后者与郑素兰[16]等、薛文川[17]的研究结论一致。

参考文献

[1] 邵帅, 李欣, 曹建华.中国的城市化推进与雾霾治理[J].经济研究, 2019, 54(2): 148-165.

[2] 张桐, 洪秀玲, 孙立炜, 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.

[3] 包红光, 王成, 杜万光.城市林木滞尘效应研究进展[J].生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1514-1523.

[4] 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.

[5] 胡舒, 肖昕, 贾含帅, 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.

[6] 江胜利, 金荷仙, 魏彩霞, 等.杭州常见道路绿化灌木秋季滞尘能力研究[J].江西农业学报, 2012, 24(4): 51-54.

[7] 陈芳, 周志翔, 郭尔祥, 等.城市工业区园林绿地滞尘效应的研究: 以武汉钢铁公司厂区绿地为例[J].生态学杂志, 2006(1): 34-38.

[8] 李朝梅, 王军梦, 王腾飞, 等.郑州市常见公园绿化植物的滞尘能力及叶片性状分析[J].西北林学院学报, 2021, 36(2): 123-129.

[9] 张维康, 王兵, 牛香.北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力[J].环境科学, 2015, 36(7): 2381-2388.

[10] 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纳大气颗粒物特性[J].林业科学, 2016, 52(12): 74-83.

[11] 王松, 康红梅, 王晋, 等.山西太原常绿植物滞尘能力差异性及叶面微结构[J].北方园艺, 2021(14): 80-86.
[12] PACE R, GUIDOLOTTI G, BALDACCHINI C, et al. Comparing i-Tree eco estimates of particulate matter deposition with leaf and canopy measurements in an urban mediterranean holm oak forest[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(10): 6613-6622.
[13] GUIDOLOTTI G, SALVIATO M, CALFAPIETRA C. Comparing estimates of EMEP MSC-W and UFORE Models in air pollutant reduction by urban trees[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(19): 19541-19550.
[14] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 等.武汉市15种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征[J].生态学报, 2020, 40(1): 213-222.
[15] 陈雪华.5个榕树品种叶表面微形态结构与滞尘能力比较[J].南方农业学报, 2011, 42(10): 1245-1247.
[16] 郑素兰, 王兵丽, 陈凡, 等.10种园林植物的抑菌作用和滞尘能力研究[J].闽南师范大学学报(自然科学版) , 2015, 28(4): 77-81.
[17] 薛文川.广州市主要绿地类型植物配置对空气颗粒物消减功能研究[D].广州: 华南农业大学, 2019.
[18] 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.
[19] 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[J].江西农业大学学报, 2021, 43(4): 853-865.
[20] 谢丽宏, 黄芳芳, 甘先华, 等.城市森林净化大气颗粒物污染作用研究进展[J].林业与环境科学, 2017, 33(3): 96-103.
[21] 唐茜.重庆市森林的滞尘效应及净化大气功能[J].水土保持通报, 2019, 39(5): 301-307.
[22] 徐振华, 党磊, 任启文, 等.石家庄市园林绿地滞尘效益评估[J].中国农学通报, 2015, 31(36): 184-187.
[23] 胡羡聪, 殷爱华, 吴小英, 等.珠三角地区城市园林绿化滞尘树种选择[J].广东园林, 2007(3): 44-46.
[24] 王燕. 广东省生态景观林带生态效益和景观评价[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
[25] 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(6): 2455-2462.
[26] 唐敏忠, 汉瑞英, 陈健.植物叶片吸附大气颗粒物的研究综述[J].北方园艺, 2015(11): 187-192.
[27] 王亚军, 郁珊珊.厦门市常见园林树种滞尘效应及生态特性研究[J].西南农业学报, 2016, 29(8): 1987-1992.
[28] 李寒娥, 王志云, 谭家得, 等.佛山市主要城市园林植物滞尘效益分析[J].生态科学, 2006(5): 395-399.
[29] 岳晨, 李广德, 席本野, 等.叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比[J].环境科学, 2021, 42(1): 114-126.
[30] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 等. 植物叶面滞留颗粒物的数量和质量特征及方法比较[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3): 440-444.
[31] 牛香, 薛恩东, 王兵, 等. 森林治污减霾功能研究: 以北京市和陕西关中地区为例[M].北京: 科学出版社, 2017.
[32] 吴翠蓉, 江波, 张露, 等.杭州8种绿化树种滞纳TSP和PM_1、$PM_{2.5}$、PM_{10}的效应研究[J].浙江林业科技, 2020, 40(5): 13-20.
[33] 凯丽比努尔·努尔麦麦提, 玉米提·哈力克, 娜斯曼·那斯尔丁, 等.乌鲁木齐市公园常见乔木对空气颗粒物的滞纳量[J].生态学杂志, 2022, 41(3): 528-535.
[34] 王远森, 曲益涛, 张玉阳, 等.金叶女贞滞尘效应研究[J].北方园艺, 2013(15): 72-75.