

## 郑州市 11 种常绿灌木滞尘与抑菌综合能力评价

贺 丹,王翼飞,汪安印,李朝梅,雷雅凯,李永华,张 曼\*

(河南农业大学 风景园林与艺术学院,河南 郑州 450002)

**摘 要:**为探究郑州市常绿灌木的滞尘与抑菌能力,以 11 种常见常绿灌木为对象,采用 3 级滤膜过滤法测定其对不同粒径颗粒物的单位叶面积滞尘量,采用平板计数法测定抑菌率,并通过主成分分析对滞尘与抑菌进行综合评价。结果表明,八角金盘和夹竹桃对 TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的滞留量最高,金森女贞最低。11 种常绿灌木间抑菌率差异显著( $P<0.05$ ),南天竹和火棘对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌抑制效果最好,对金黄色葡萄球菌抑制效果最好的是南天竹和海桐。根据主成分分析得到综合滞尘抑菌能力最强的是八角金盘和夹竹桃。因此,在今后郑州市以大气污染治理为目标进行园林绿化的过程中,可以优先选择滞尘抑菌效果好的八角金盘等常绿树种。

**关键词:**郑州市;常绿灌木;颗粒物;抑菌能力;综合评价

**中图分类号:**S688

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)05-0266-07

### Comprehensive Evaluation on Dust-Retention and Antimicrobial Capabilities of 11 Evergreen Shrubs in Zhengzhou City

HE Dan, WANG Yi-fei, WANG An-yin, LI Chao-mei, LEI Ya-kai, LI Yong-hua, ZHANG Man\*

(College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** Eleven typical evergreen shrub species occurring in Zhengzhou City were selected to explore the dust retention and anti-microbial capacities. Three-leveled membrane filtration method was used to measure the amounts of the retained dusts with different diameters per unit area. Anti-microbial capability was measured by plate counting method. Principal component analysis was adopted to conduct the evaluation. The highest retaining amounts of TSP, PM<sub>>10</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were found on the leaves of *Fatsia japonica* and *Nerium indicum*, and lowest on the leaves of *Ligustrum japonicum* 'Howardii'. There were significant differences in the antimicrobial rates among the 11 evergreen shrubs species ( $P<0.05$ ). The antimicrobial effects of *Nandina domestica* and *Pyracantha fortuneana* against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were the strongest, while those of *N. domestica* and *Pittosporum tobira* against *B. subtilis* were the strongest. The results of principal component analysis exhibited that *F. japonica* and *N. indicum* had comprehensive dust retaining and antimicrobial capabilities, indicating that *F. japonica* as well as other shrub species with strong dust retaining and antimicrobial capabilities should be preferably considered and selected in urban greening process to control atmospheric pollution in Zhengzhou City.

**Key words:** Zhengzhou City; evergreen shrub; particulate matter; antimicrobial capacity; comprehensive assessment

近年来,随着郑州市的城市化推进,二次气溶胶、颗粒物浓度(质量分数,下同)特别是 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 均  
土壤扬尘、燃煤机动车等污染源导致郑州市的大气颗粒  
超出国际限值,空气污染日趋严重<sup>[1]</sup>。高浓度大气颗粒

收稿日期:2021-08-30 修回日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金(31600579);河南省科技攻关项目(212102110185);河南省青年骨干教师资助项目(2020GGJS049)。

第一作者:贺 丹,博士,副教授。研究方向:风景园林植物应用。E-mail:dandan990111@163.com

\*通信作者:张 曼,硕士,实验师。研究方向:园林植物栽培应用。E-mail:man\_zh\_sally@163.com

颗粒物会对人体健康造成危害,不仅随呼吸作用进入人体,引发呼吸系统、心脑血管系统等疾病,还会显著降低能见度,从而引发雾霾天气<sup>[2-5]</sup>。雾霾天气会导致部分病原菌例如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)等的相对丰度升高,致病力增强<sup>[6]</sup>。因此研究如何降低空气中颗粒物浓度对保护环境、减少疾病传播、维护人类健康具有重要的意义<sup>[7-8]</sup>。

园林植物是城市园林绿化的主体部分,可以阻挡、吸附、滞留、凝结大气颗粒物,借助植物的清除机制,能够有效改善城市大气污染状况<sup>[9-10]</sup>。植物主要通过叶片进行滞尘,其滞尘能力与叶片特征特别是叶表面微形态结构密切相关<sup>[11-13]</sup>。叶片表面微形态结构如绒毛、沟壑、褶皱和蜡质层等会影响叶片滞尘能力<sup>[9,14-15]</sup>。此外,植物叶片自然释放的挥发性物质具有高效的抑菌活性,能抑菌、杀菌和净化空气<sup>[16]</sup>。不同植物所产生的杀菌或抑菌类物质的种类和浓度不同,相同的树种对不同菌种的抑制作用也不同<sup>[17]</sup>。枇杷和南天竹对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌及枯草芽孢杆菌的抑制效率达到 100%<sup>[18]</sup>。香樟、枫香对大肠杆菌,白千层、香樟和蒲桃对金黄色葡萄球菌有较强的抑制作用<sup>[19]</sup>。

不同植物的滞尘能力差异显著,与落叶乔灌木相比,常绿灌木因株型低矮紧凑,易于附着降尘和地面的扬尘,其滞尘量相对更高<sup>[6,20-21]</sup>。特别是在冬春季节,郑州市多数阔叶树种处于落叶未展的状态,仅有少数常绿(含半常绿)阔叶灌木发挥主要的滞尘效应<sup>[22-24]</sup>。前人研究中,基于相同试验材料和叶面积测定方法的前提下,常用的滞尘能力评估方法有滤膜法、质量差减法、气溶胶再发生器法等;而对抑

菌作用的测定常用方法为平板计数法、室外自然沉降法、滤纸片法等;因野外与自然环境下试验结果的可比性较差,且不同方法得到的树种排序存在重合部分<sup>[17,25]</sup>,本研究选取郑州市文化公园 11 种常绿灌木,采用优化后的 3 级滤膜过滤法测定单位叶面积 TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的滞留量,回避了粒径、质量极其微小的颗粒物不能完全被收集和准确称量的缺点<sup>[26]</sup>;对比几种常用的抑菌研究方法,应用更准确可靠的平板计数法测定 11 种常绿灌木对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌能力,并对其滞尘与抑菌的综合能力进行评价,为郑州市大气污染治理过程中合理选择高效滞尘抑菌的绿化树种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市(34°16′—34°58′N,112°42′—114°14′E)位于河南省中部,典型暖温带大陆性季风气候,四季分明、雨热同期,全年平均气温 16.7℃,年平均降水量 591.48 mm,年平均风速 2.0 m·s<sup>-1</sup>,年平均相对湿度 61.1%。在植物区系划分上属于暖温带落叶阔叶林植被类型,植被资源较丰富<sup>[27-29]</sup>。采样点选择郑州市文化公园,位于中心城区,常绿灌木丰富,植被稳定,能够代表郑州市内主要的植物情况和市内环境状况。

1.2 供试材料

1.2.1 供试植物 选取郑州市文化公园的 11 种常绿灌木作为试验材料,每种植物在文化公园内均有分布,且数量在 10 株以上(表 1)。

表 1 11 种常绿灌木及叶片长宽值(平均值±标准误差)

Table 1 Morphological characteristics of 11 evergreen shrubs (mean±SE)

编号	物种	科属	叶长/m	叶宽/cm
1	八角金盘( <i>Fatsia japonica</i> )	五加科八角金盘属	25.65±2.34	22.16±1.45
2	大叶黄杨( <i>Euonymus japonicus</i> )	卫矛科卫矛属	5.46±0.39	3.57±0.27
3	枸骨( <i>Ilex cornuta</i> )	冬青科冬青属	4.89±0.42	3.20±0.63
4	海桐( <i>Pittosporum tobira</i> )	海桐花科海桐花属	5.39±0.81	2.42±0.21
5	火棘( <i>Pyracantha fortuneana</i> )	蔷薇科火棘属	3.16±0.28	1.46±0.30
6	夹竹桃( <i>Nerium indicum</i> )	夹竹桃科夹竹桃属	12.82±0.52	2.27±0.37
7	金森女贞( <i>Ligustrum japonicu</i> ‘Howardii’)	木犀科女贞属	6.83±0.16	3.36±0.26
8	南天竹( <i>Nandina domestica</i> )	小檗科南天竹属	4.56±0.71	1.85±0.04
9	洒金桃叶珊瑚( <i>Aucuba japonica</i> )	山茱萸科桃叶珊瑚属	14.49±0.95	5.32±0.86
10	珊瑚树( <i>Viburnum odoratissimum</i> )	忍冬科荚蒾属	12.76±0.28	4.57±0.30
11	十大功劳( <i>Mahonia bealei</i> )	小檗科十大功劳属	9.19±2.05	1.45±0.11
12	对照	—	—	—

1.2.2 供试菌种 大肠杆菌(*Escherichia coli*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)均来自河南农业大学风景

园林与艺术学院观赏植物实验室。

1.3 研究方法

1.3.1 叶片滞尘量的测定 于 2020 年 8 月下旬晴

朗的上午采集,每种植物随机选取 3 株以上样树,在每株样树的同一高度、4 个方位(东、南、西、北)随机采取成熟叶片 30~50 片,采集后分成 2 部分放入自封袋,每个树种设置 3 组重复。采用 3 级滤膜过滤法测定并计算各灌木不同粒径颗粒物的滞留量<sup>[12,26]</sup>。使用叶面积仪(CI-203,CID,USA)对清洗后的叶片进行叶面积测定,重复 3 次;单位叶面积滞尘量=叶片颗粒物质量/叶片总面积。

1.3.2 叶片挥发物抑菌能力测定 将采集带回的叶片去柄,用无菌水充分冲洗后,放在灭菌 30 min 后的超净工作台上。按照常规法制备好牛肉膏蛋白胨细菌培养基和 LB 液体培养基,活化 3 种供试菌种。将 3 种细菌悬液分别接种在牛肉膏蛋白胨琼脂培养基上,在皿盖中加入供试叶片 1 g,每组重复 3 次。在 37℃ 生化培养箱里培养 12 h 后,观察平板培养基上微生物生长情况及菌落的大小,计算菌落个数,以不放叶片的培养基做对照,从而得出抑菌率,抑菌率(%)=(对照组平均菌落数-处理组平均菌落数)/对照组平均菌落数×100。

#### 1.4 数据处理

利用 SPSS 26.0(IBM, USA)软件进行数据处理,用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行差异分析,用 LSD 法(least-significant difference)

表 2 11 种常绿灌木的 TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 单位叶面积滞留量(平均值±标准误差)

Table 2 The retained amounts of TSP, PM<sub>>10</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> per unit leaf area of 11 evergreen shrubs (mean±SE) (g·m<sup>-2</sup>)

物种	TSP	PM <sub>&gt;10</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
八角金盘	(2.24±0.18)a	(1.44±0.20)a	(0.79±0.04)ab	(0.70±0.09)ab
大叶黄杨	(0.66±0.18)def	(0.43±0.16)c	(0.23±0.05)def	(0.18±0.03)def
枸骨	(1.07±0.18)bc	(0.51±0.07)bc	(0.56±0.15)bc	(0.50±0.15)bc
海桐	(0.99±0.06)bcd	(0.83±0.05)b	(0.16±0.01)ef	(0.08±0.02)ef
火棘	(1.28±0.12)b	(0.84±0.11)b	(0.44±0.01)cd	(0.32±0.01)cde
夹竹桃	(1.89±0.05)a	(0.86±0.09)b	(1.03±0.14)a	(0.92±0.11)a
金森女贞	(0.43±0.05)f	(0.33±0.05)c	(0.10±0.08)f	(0.05±0.00)f
南天竹	(0.94±0.09)bcd	(0.68±0.05)bc	(0.26±0.08)def	(0.22±0.08)def
洒金桃叶珊瑚	(0.84±0.10)cde	(0.53±0.08)bc	(0.31±0.03)cdef	(0.29±0.03)cdef
珊瑚树	(1.04±0.04)bcd	(0.63±0.03)bc	(0.41±0.06)cde	(0.37±0.06)cd
十大功劳	(0.50±0.09)ef	(0.34±0.07)c	(0.16±0.03)ef	(0.10±0.02)ef

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

#### 2.3 植物滞尘、抑菌能力与形态性状的相关性及主成分分析

通过对 11 种常绿灌木滞尘、抑菌和叶长宽等 9 个指标之间的相关性分析得出,各指标的相关系数达到显著水平的有 22 个,包含极显著水平 15 个(图 3)。其中,PM<sub>10</sub> 滞留量与 PM<sub>2.5</sub> 滞留量的相关系数最大,TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 滞留量与叶长、叶宽均为显著正相关;TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 滞留量与枯草芽孢杆菌抑菌率和金黄色葡萄球菌抑菌率均呈负相关;PM<sub>2.5</sub> 滞留量与大肠杆菌呈正相关。

进行多重比较。采用主成分分析法(principle component analysis)分析指标的相关性,并计算综合得分。采用 Origin 2019(origin lab, USA)和 Photo-shop 2020(adobe systems, USA)软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物单位叶面积滞尘量比较

11 种常绿灌木单位叶面积 TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的滞留量变化范围分别是 0.43~2.24, 0.33~1.44, 0.10~1.03 g·m<sup>-2</sup> 和 0.05~0.92 g·m<sup>-2</sup>,不同灌木之间滞尘量差异显著( $P<0.05$ ) (表 2)。单位叶面积 TSP 和 PM<sub>>10</sub> 滞留量最大的是八角金盘,最小的是金森女贞,2 种滞尘量前者是后者的 5.2 倍和 4.4 倍。单位叶面积 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 滞留能力最强的是夹竹桃,最弱的是金森女贞,分别是其 10.3 倍和 18.4 倍。

### 2.2 不同植物抑菌能力比较

11 种常绿灌木叶片对同种菌种的抑菌率差异显著( $P<0.05$ ),同一树种对不同菌种的抑菌率差异也是显著的( $P<0.05$ ) (图 1、图 2)。对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌抑菌率最高的分别是南天竹和洒金桃叶珊瑚、火棘、海桐和南天竹;抑菌率最低的分别是海桐、大叶黄杨、珊瑚树。

由此可见,各指标均具有一定的相关性,所含信息交叉重复,所以可以对所有指标进行主成分分析。

将滞尘、抑菌与叶长宽指标转化为 9 个主成分进行分析(表 3)。TSP、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、叶长及叶宽在第 1 主成分上具有较高载荷,说明第 1 主成分主要反映了植物滞尘能力和叶长宽指标。枯草芽孢杆菌抑菌率、金黄色葡萄球菌抑菌率和大肠杆菌抑菌率在第 2、3 主成分具有最高载荷,说明第 2、3 主成分主要反映了抑菌能力。前 3 个主成分的累积方差贡献率为 81.23%,反映出 11 种常绿灌木滞



尘、抑菌能力和叶长宽指标 80.00% 以上的信息;因此,可以提取前 3 个主成分作为植物滞尘抑菌能力评价的综合指标。

2.4 园林植物滞尘与抑菌能力综合评价

根据前 3 个主成分得分(Y1、Y2、Y3)以及其贡献率权重,得到植物的综合评价公式: $Y=0.50 Y1+0.18 Y2+0.13 Y3$ ,滞尘与抑菌综合能力最强的是八角金盘和夹竹桃(表 4)。

3 结论与讨论

不同树种对不同粒径的颗粒物滞留量差异显著,本研究中八角金盘单位叶面积滞留 TSP、PM<sub>>10</sub> 的能力最强,夹竹桃滞留 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的能力最强。八角金盘具有宽大开展的叶型及起伏不平的辐射状叶脉,夹竹桃叶表面密布褶皱,叶脉横向突起明显,因而滞尘能力强于其他植物<sup>[24,27]</sup>。滞留 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 较强的树种为火棘、枸骨、珊瑚树和洒金桃叶珊瑚,其中洒金桃叶珊瑚滞留 TSP 和 PM<sub>>10</sub> 的能力较弱,可能是因为洒金桃叶珊瑚叶表面较其他

3 种灌木更为平滑<sup>[21,27]</sup>。大叶黄杨滞留 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的能力强于滞留 TSP 和 PM<sub>>10</sub> 的能力,可能是其叶片蜡质含量对粒径在 2.5~10 μm 的颗粒物滞留量更强,其蜡质结构的疏水性使叶表面与颗粒

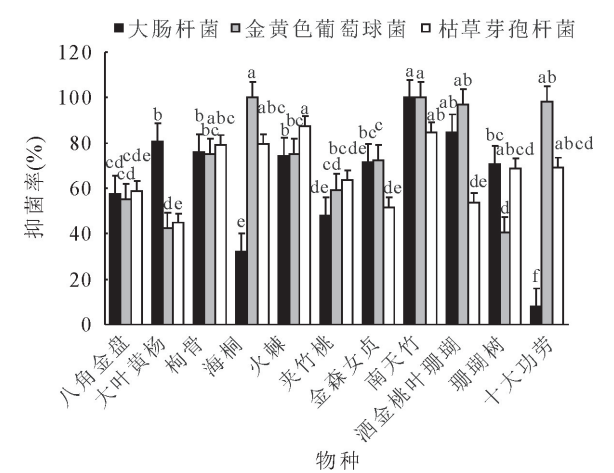
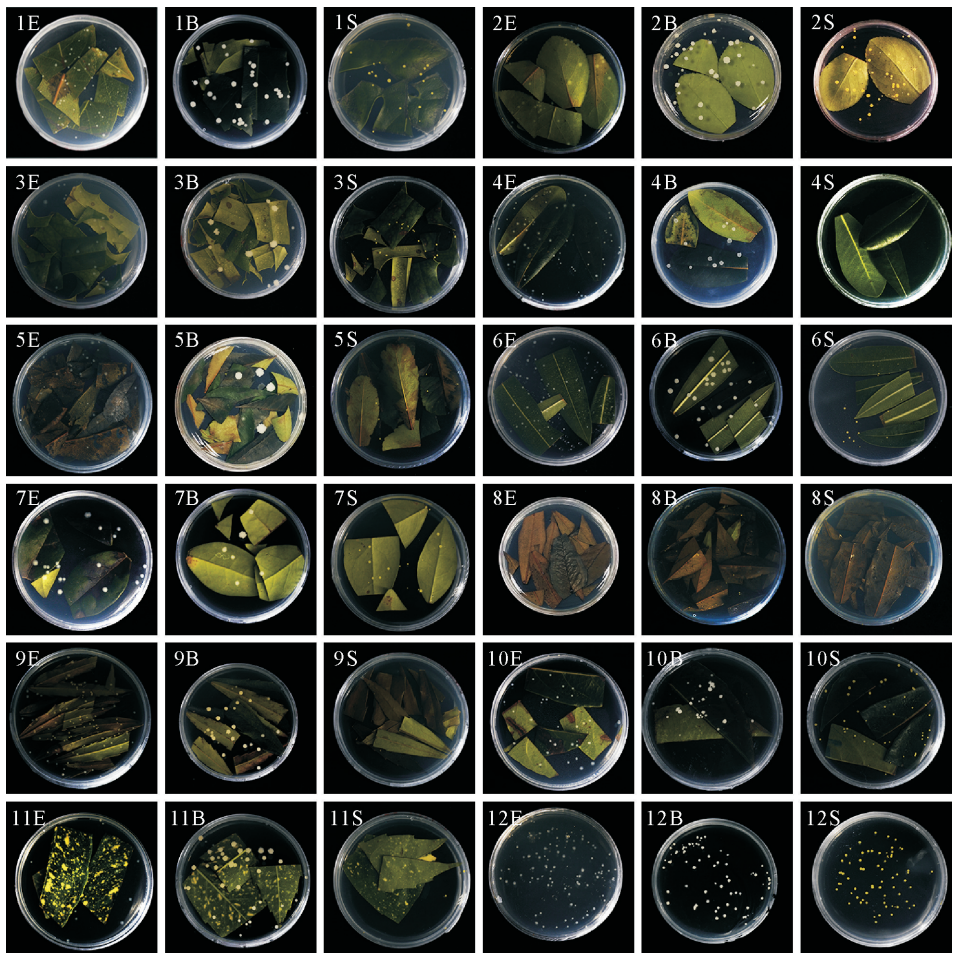


图 1 11 种常绿灌木对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌率

Fig.1 Antimicrobial rates of 11 evergreen shrubs against *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* and *Staphylococcus aureus*

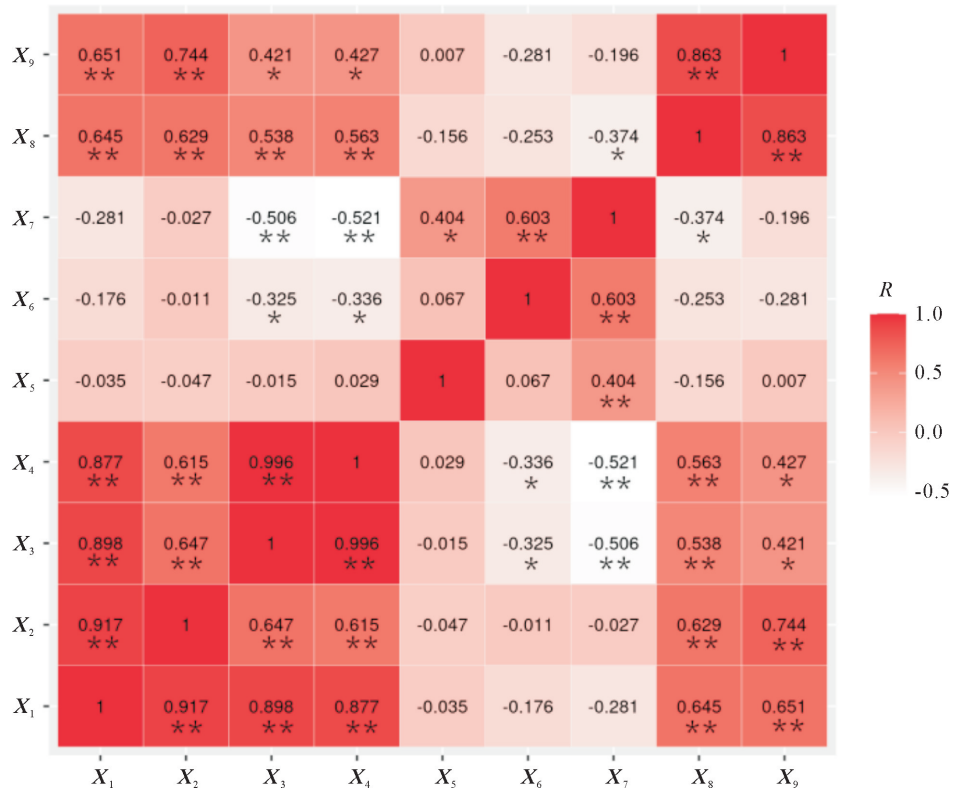


注: E. 大肠杆菌; B. 枯草芽孢杆菌; S. 金黄色葡萄球菌。1~12 参见表 1。

Note: E. *Escherichia coli*; B. *B. subtilis*; S. *Staphylococcus aureus*

图 2 11 种常绿灌木的抑菌效果

Fig.2 Antimicrobial effects of the 11 evergreen shrubs



注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关;  $X_1$ : TSP;  $X_2$ :  $PM_{10}$ ;  $X_3$ :  $PM_{10}$ ;  $X_4$ :  $PM_{2.5}$ ;  $X_5$ : 大肠杆菌抑菌率;  $X_6$ : 金黄色葡萄球菌抑菌率;  $X_7$ : 枯草芽孢杆菌抑菌率;  $X_8$ : 叶长;  $X_9$ : 叶宽。

图 3 滞尘、抑菌与叶长宽指标的相关系数矩阵热图

Fig. 3 Heat map of correlation coefficient matrix of dust-retention, antimicrobial capability and morphological indexes

表 3 滞尘、抑菌与叶长宽指标的前 3 个主成分分析贡献率和因子载荷矩阵

Table 3 Contribution rate and factor load matrix of the first three principal component analysis of dust retention, antimicrobial and leaf length and width index

主成分	成分矩阵									特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$			
1	0.92	0.77	0.87	0.86	-0.14	-0.39	-0.51	0.78	0.74	4.54	50.45	50.45
2	0.20	0.42	-0.11	-0.11	0.47	0.63	0.79	0.18	0.33	1.62	17.95	68.41
3	0.12	-0.17	0.42	0.44	0.65	0.02	0.03	-0.40	-0.40	1.15	12.82	81.23

表 4 11 种常绿灌木滞尘、抑菌能力的综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of dust retention and antimicrobial abilities of 11 evergreen shrubs

物种	Y	排名	物种	Y	排名
八角金盘	2.567 9	1	南天竹	-0.342 3	7
夹竹桃	1.440 4	2	海桐	-0.671 6	8
珊瑚树	0.090 9	3	大叶黄杨	-0.703 1	9
枸骨	0.049 2	4	金森女贞	-1.099 1	10
火棘	-0.003 8	5	十大功劳	-1.234 9	11
洒金桃叶珊瑚	-0.093 7	6			

物的接触角变小而导致<sup>[27,30-31]</sup>。金森女贞滞留所有粒径的颗粒物的能力最弱,主要是因为其叶表面无毛,较为光滑平整<sup>[27]</sup>。由此可知,叶片微形态结构对所有粒径颗粒物的滞留能力均有影响,叶型宽大、叶表面粗糙、叶脉凹凸不平的灌木更容易滞留颗粒

物<sup>[24,27,30]</sup>。此外,八角金盘、夹竹桃、洒金桃叶珊瑚位于背阴处,光照微弱,局部气候与其他常绿灌木有所不同,大气温度降低,空气相对湿度提高,环境中大气颗粒物浓度受到气候因素影响而提高,因此八角金盘、夹竹桃、洒金桃叶珊瑚的滞尘能力较强<sup>[32]</sup>。

不同树种间抑菌率差异显著,植物主要通过叶片释放挥发物来抑菌、杀菌。本研究中南天竹、火棘和枸骨对3种菌类有明显的抑制作用,抑菌率均达70%以上。这可能是由于所释放的物质中类黄酮、生物碱、柠檬烯等含量较多,这些化学成分能够影响细菌的细胞膜形成,破坏其对宿主配体的黏附作用;或通过抑制酶活性来扰乱细菌的生长繁殖,从而达到一定的抑菌效果<sup>[19,34-35]</sup>。同一树种对不同菌种的抑制率差异显著,十大功劳和海桐对大肠杆菌的抑菌作用最弱,但对另外2种菌种的抑制作用较强,可能是由于阔叶植物所释放的抑菌物质成分比较复杂,这与郑素兰等<sup>[35]</sup>的研究结论相同。

园林植物的滞尘和抑菌功能密切相关,二者相辅相成,是改善空气质量的重要保障。但是园林植物在自然环境中的滞尘和抑菌作用,影响因素十分庞杂,除植物自身因素外,还受到气候因素、环境状况的影响<sup>[15,25]</sup>。因此,单一的量化或简单的加和会受到人为主观的影响,综合客观地考虑园林植物的多方面功能,才能有效评估园林植物的应用价值<sup>[36]</sup>。本研究采用主成分分析方法,通过数据降维将滞尘、抑菌等一系列具有相关性的指标重新组合成相互独立的综合指标,根据3个最重要的主成分及其权重得到综合评价的计算公式<sup>[19]</sup>。得出综合滞尘抑菌能力较强的植物为八角金盘、夹竹桃、珊瑚树、枸骨。今后郑州市景观规划设计中,在观赏特性的前提下可以优先考虑八角金盘、夹竹桃、珊瑚树等植物进行景观的营造。

## 参考文献:

- [1] 张瑛,杨婧,陈晓倩,等.我国空气质量较差的10个城市2005—2017年大气颗粒物水平、影响因素及化学组分[J].环境与职业医学,2019,36(10):970-977.  
ZHANG Y, YANG J, CHEN X Q, *et al.* Levels, influencing factors, and chemical constituents of atmospheric particulates in 10 cities with poor air quality in China in 2005—2017[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2019, 36(10):970-977. (in Chinese)
- [2] 刘新蕾,欧阳婉约,张彤.大气颗粒物重金属组分的化学形态及健康效应[J].环境化学,2021,40(4):1-16.  
LIU X L, OUYANG W Y, ZHANG T. Chemical speciation and health effect of heavy metals in atmospheric particulate matter[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4):1-16. (in Chinese)
- [3] 贾云,陈春静,王恒学,等.南京市大气PM<sub>10</sub>短期暴露对心血管疾病死亡的影响[J].环境与职业医学,2020,37(8):753-758.  
JIA Y, CHEN C J, WANG H X, *et al.* Effect of short-term exposure to PM<sub>10</sub> on mortality of cardiovascular diseases in Nanjing[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(8):753-758. (in Chinese)
- [4] 樊晓燕,高景峰.空气微生物群落样品采集、解析方法及研究进展[J].安全与环境学报,2018,18(1):357-362.
- [5] SAMEK L, STEGOWSKI Z, STYSZKO K, *et al.* Seasonal contribution of assessed sources to submicron and fine particulate matter in a central European urban area[J]. Environment Pollution, 2018, 241, 406-411.
- [6] 甄泉,方治国,王雅晴,等.雾霾空气中细菌特征及对健康的潜在影响[J].生态学报,2019,39(6):2244-2254.  
ZHEN Q, FANG Z G, WANG Y Q, *et al.* Bacterial characteristics in atmospheric haze and potential impacts on human health[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):2244-2254. (in Chinese)
- [7] 钱亚利,王森,丁柳屹,等.大气颗粒物中微生物分析方法及分布特征的研究进展[J].生态毒理学报,2019,14(2):53-62.  
QIAN Y L, WANG S, DING L Y, *et al.* Advances in analytical methods and distribution characteristics of microorganisms in particulate matter[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2):53-62. (in Chinese)
- [8] 储燕萍,赵望,刘思秀.上海市某行政区空气中细菌总数分布与常见致病菌检测[J].复旦学报:自然科学版,2020,59(2):240-243.  
CHU Y P, ZHAO W, LIU S X. Distribution of the total bacterial count and detection of common pathogenic bacteria in ambient air of administrative region of Shanghai[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2020, 59(2):240-243. (in Chinese)
- [9] XU X D, XIA J J, GAO Y, *et al.* Additional focus on particulate matter wash-off events from leaves is required: a review of studies of urban plants used to reduce airborne particulate matter pollution[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 48, 1-9.
- [10] 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].生态学报,2016,35(2):524-533.  
LÜ L Y, LI H Y, YANG J N. 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. (in Chinese)
- [11] HE C, QIU K Y, POTT R. Reduction of urban traffic-related particulate matter—leaf trait matters[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(6):5825-5844.
- [12] 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.  
WANG Q, FENG J H, HUANG Y, *et al.* Dust-retention capability and leaf surface micromorphology of 15 broad-leaved tree species in Wuhan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1):213-222. (in Chinese)
- [13] ZHANG X Y, YN J Y, HAN Y J, *et al.* Effects of the leaf functional traits of coniferous and broadleaved trees in subtropical monsoon regions on PM<sub>2.5</sub> dry deposition velocities[J]. Environmental Pollution, 2020, 265:1-10.
- [14] ABHIJITH K V, KUMAR P, GALAGHER J, *et al.* Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—a review[J]. Atmospheric Environment, 2017, 162, 71-86.
- [15] 段嵩岚,闫淑君,田高飞,等.福州市19种灌木滞留颗粒物效应与叶片性状研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):230-238.



- DUAN S L, YAN S J, TIAN G F, *et al.* Effects of the particles retained by 19 widely used shrubs on road sides and their relationships with leaf trait in Fuzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 230-238. (in Chinese)
- [16] 赵亚红, 徐翠霞, 马玲, 等. 3 种常绿树挥发物成分对空气负离子及微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 654-663.
- ZHAO Y H, XU C X, MA L, *et al.* Effects of volatile components of three evergreen plants on air anion and microorganism[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(4): 654-663. (in Chinese)
- [17] 张国帅. 五种常绿园林树种抑菌能力研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [18] 李睿, 谢久凤, 聂林杰, 等. 郑州市 38 种常用园林植物的抑菌作用比较[J]. 河南科技, 2018, 36(12): 1947-1951.
- [19] 沈鑫, 柳新红, 蒋冬月, 等. 枫香等 22 种常见园林植物滞尘与抑菌能力评价[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 65-70.
- SHEN X, LIU X H, JIANG D Y, *et al.* Evaluation of dust retention and antimicrobial effect of 22 common landscape plants including *Liquidambar formosana* [J]. Journal of northeast forestry university, 2019, 47(1): 65-70. (in Chinese)
- [20] 王丽君. 唐山市主要园林植物滞尘能力研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 135-138.
- WANG L J. Dust absorption capacities of main garden plant species in Tangshan City[J]. Anhui Agric. Sci., 2020, 48(2): 135-138. (in Chinese)
- [21] 孙晓丹, 李海梅, 郭霄, 等. 10 种灌木滞留大气颗粒物的能力[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 1047-1054.
- [22] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2016 年冬季京津冀豫大气污染时空分布及影响因子研究[J]. 气象, 2019, 45(5): 695-704.
- [23] 王维思, 王楠, 高玉娟, 等. 2019 年郑州冬、春季重污染期间 PM<sub>2.5</sub> 污染特征分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1594-1603.
- WANG W S, WANG N, GAO Y J, *et al.* Analysis of PM<sub>2.5</sub> heavy pollution characteristics in spring and fall for 2019 in Zhengzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1594-1603. (in Chinese)
- [24] 范舒欣, 蔡好, 董丽. 北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 408-414.
- FAN S X, CAI Y, DONG L. Dust absorption capacities of eight evergreen broad-leaved plants in Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 408-414. (in Chinese)
- [25] 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.
- YUE C, LI G D, XI B Y, *et al.* Quantitative comparison of methods to assess the airborne particulate matter retention capacity of leaves[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 114-126. (in Chinese)
- [26] 洪秀玲, 杨雪媛, 杨梦尧, 等. 测定植物叶片滞留 PM<sub>2.5</sub> 等大气颗粒物质量的方法[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 147-154.
- HONG X L, YANG X Y, YANG M Y, *et al.* A method of quantifying the retention of PM<sub>2.5</sub> and other atmospheric particulates by plant leaves[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(5): 147-154. (in Chinese)
- [27] 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.
- LI C M, WANG J M, WANG T F, *et al.* Dust-retention capability and leaf traits of common park greening plant species[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 123-129. (in Chinese)
- [28] 王祖星, 靳焕, 张京生, 等. 基于公共健康视角的城市公园颗粒物时空分布及影响因素研究[J]. 中国园林, 2021, 37(5): 1-6.
- WANG Z X, JIN H, ZHANG J S, *et al.* Spatiotemporal distribution of atmospheric particles and influencing factors in urban park based on the view of public health[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(5): 1-6. (in Chinese)
- [29] 张琳, 孟亚南, 王佩佩, 等. 郑州城市园林植物群落物种多样性研究[J]. 林业资源管理, 2017(6): 72-76.
- ZHANG L, MENG Y N, WANG P P, *et al.* Study on species diversity of garden plant community in Zhengzhou[J]. Forest Resources Management, 2017(6): 72-76. (in Chinese)
- [30] POPEKR, 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.
- [31] 孙晓丹, 李海梅, 孙丽, 等. 8 种灌木滞尘能力及叶表面结构研究[J]. 环境化学, 2016, 35(9): 1815-1822.
- [32] 易心钰, 彭映赫, 廖菊阳, 等. 森林植被与大气颗粒物的关系[J]. 植物科学学报, 2017, 35(5): 790-796.
- YI X Y, PENG Y H, LIAO J Y, *et al.* A review of the relationship between forest vegetation and atmospheric particulate matter[J]. Plant Science Journal, 2017, 35(5): 790-796. (in Chinese)
- [33] 薛梦莹, 李璐, 张华峰, 等. 3 种小檗科植物类黄酮、生物碱含量与抑菌活性的季节变化规律[J]. 草业科学, 2018, 35(11): 2614-2621.
- XUE M Y, LI L, ZHANG H F, *et al.* Seasonal variations in contents and antibacterial activities of flavonoids and alkaloids in three Berberidaceae species[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(11): 2614-2621. (in Chinese)
- [34] 马楠. 16 种常用园林植物 VOCs 成分研究及 AHP 评价[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [35] 郑素兰, 王兵丽. 9 种常见灌木滞尘和抑菌的初步研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 186-189.
- ZHENG S L, WANG B L. A primary study on dust retention and bacteriostasis effect of nine common shrubs[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 186-189. (in Chinese)
- [36] 马克明, 殷哲, 张育新. 绿地滞尘效应和机理评估进展[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4482-4491.
- MA K M, YIN Z, ZHANG Y X. Advancement in the method and mechanism of the green space dust retention effect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4482-4491. (in Chinese)