

哈尔滨市常见绿化树种叶表面形态与滞尘能力的关系

周蕴薇,田忠平,苏 欣

(东北林业大学 园林学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:以哈尔滨市常见的 25 种绿化树种为对象,通过测定单位叶面积滞尘量和扫描电镜观察、比较不同植物单位叶面积滞尘能力及其与叶表面形态结构的关系。结果表明,乔木中桑、梓单位叶面积滞尘量较大,灌木中金山绣线菊、珍珠绣线菊、榆叶梅、金焰绣线菊、锦带花单位叶面积滞尘量最大。通过扫描电镜观察发现细胞排列不规则形成的脊状或浅波状起伏、小室或沟槽等结构及曲折的细胞轮廓线利于固定颗粒物;较深的纹饰、分布不均匀的蜡质层利于滞留颗粒物;叶表皮毛密度越大,滞尘能力越高。

关键词:哈尔滨;城市绿化树种;叶表面结构;滞尘能力

中图分类号:S718.56 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0287-06

Relationships between Leaf Epidermal Morphology and Dust Capacity of Common Street Trees in Harbin Municipality

ZHOU Yun-wei, TIAN Zhong-ping, SU Xin

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In this study, we selected 25 species of the common street trees in Harbin to determine their dust-retaining capabilities and to observe and compare their leaf surface morphologies by using scanning electron microscopy. The results showed that among the arbors, *Morus alba* and *Catalpa ovata* were found to have higher amounts of dust retained per unit leaf area. For shrubs, they were *Spiraea bunmalba* ‘Goldmound’, *S. thunbergii*, *Amygdalus triloba*, *Spiraea bunmalba* ‘Goldflame’, and *Weigela florida*. We observed that ridgelike or shallow waviness, cellular structure in the small room or grooves and tortuous cell contour that were formed by irregular cell arrangement were in favor of fixing particulate matter. Deeper ornamentation, the uneven distribution of the waxy layer was in favor of retaining particulate matter. The dust retention increased with the increase of the amount of hair.

Key words: Harbin Municipality; urban tree specie; microphological leaf structure; dust retaining capability

受城市化进程的加快和工业快速发展的影响,城市内部颗粒物排放源增多,大气颗粒物目前已成为诸多城市空气的首要污染物^[1]。大气颗粒物粒径大都集中于 10 μm 以下,颗粒物粒径越小,有害物质越多,其中 PM10 是危害人类健康的主要物质^[2,4]。一般叶片滞尘受外界环境因素影响不大,能够阻止颗粒物脱离叶表^[3],绿化植物因其叶片可以通过停着、吸附或黏附 3 种方式截取颗粒物。许多研究表明,植物个体间滞尘能力差异较大,而植物

叶表微形态是造成滞尘差异的重要原因^[5-6],有学者认为叶表多皱、粗糙、绒毛、分泌物等结构特征能够增加叶面粗糙程度和叶表与颗粒物的接触面积从而增强植物的滞尘能力,而叶表光滑无毛的植物滞尘能力较弱^[7-8]。叶表较窄的沟壑、气孔附近容易滞着粒径较小的粉尘颗粒^[10-11]。

目前对植物滞尘与叶表微观结构关系的研究多停留在对叶表形态的描述方面,对表皮微形态进一步分类、量化的比较研究较少,基于此,本研究选择

哈尔滨常见绿化树种为研究对象,测定植物叶片滞留大气颗粒物的能力,利用扫描电镜对植物叶表进行观察,研究叶表微观结构对植物滞尘影响,以便为利用植物减轻城市空气细颗粒物污染提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

哈尔滨市是我国北方老工业基地,重工业比重较大,是典型的高能耗、高污染的工业城市,空气污染具有典型的北方季节变化特征,冬、春季高,夏、秋季低。2012 年哈尔滨市环境质量首要污染物为可吸入颗粒物,年均值为 $0.094\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,虽然与以往浓度相比较有所降低,但仍未达到 2012 年国家修订的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)^[13]。

1.2 供试树种

选取哈尔滨市群力大道两侧绿化带为采样点,距离公路中心 15 m,采样点周边无其他污染源。选择哈尔滨最为常见的 25 种绿化植物,其中落叶乔木 9 种:桑(*Morus alba*)、梓(*Catalpa ovata*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、旱柳(*Salix matsudana*)、斑叶稠李(*Padus maackii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、白杜(*Euonymus maackii*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)、暴马丁香(*Syringa reticulata* var. *amurensis*); 16 种落叶灌木:圆锥绣球(*Hydrangea paniculata*)、锦带花(*Weigela florida*)、红王子锦带花(*W. florida* ‘Red Prince’)、红瑞木(*Cornus alba*)、金焰绣线菊(*Spiraea × bunmalba* ‘Goldflame’)、金山绣线菊(*Spiraea × bunmalba* ‘Goldmound’)、珍珠绣线菊(*S. thunbergii*)、榆叶梅(*Amygdalus triloba*)、茶条枫(*Acer ginnala*)、红丁香(*S. villosa*)、小叶丁香(*S. microphylla*)、天目琼花(*Viburnum opulus*)、东北连翘(*Forsythia mandschurica*)、接骨木(*Sambucus williamsii*)、紫丁香(*S. oblata*)、水蜡(*Ligustrum obtusifolium*)。

一般认为降雨量在 15 mm 以上时可以冲刷掉叶片上的降尘^[14-15]。本研究于 2014 年 7 月雨后 7 d 采样。乔木约 3~5 m 高处采样,灌木约 1~2 m 高处采样,每种植物选择 3 株,从植株 4 个方向上下不同部位采集成熟健康叶片,叶片大的植物每株采集 20 片,叶片小的植物每株采集 30 片,将 3 株样品合并获得混合样品。

1.3 样品处理

1.3.1 滞尘量测定方法 采用重量差值法^[7]测定叶片的滞尘量。将采集植物叶片放入超声波清洗器清洗 20 min 后取出,蒸馏水冲洗 3 次,浸洗液用已烘干称重(W_1)的微孔滤膜($\Phi=0.45\text{ }\mu\text{m}$)抽滤,将

过滤后的滤膜于 60℃ 烘箱下烘 24 h 至恒重,冷却至室温,用分析天平(1/10 000)称重(W_2),2 次重量差(W_2-W_1)即为叶片上所附着的降尘颗粒物的质量。

1.3.2 植物叶面积测定 将清洗后的叶片晾干,经 Li-3000A 便携式叶面积仪(美国 LI-COR 公司制造)测量叶片面积 S , $(W_2-W_1)/S$ 即为叶片单位叶面积的滞尘量。

1.3.3 叶表形态结构的扫描电镜观察 参照 D. L. 斯佩克特^[16]等的方法进行扫描电镜制样。从树上采集成熟健康叶片,蒸馏水清洗后在叶脉两侧中部将新鲜叶片切成边长约 5 mm 的方块,立即在 0~4℃ 下用 2.5% 戊二醛溶液固定,抽真空使材料下沉,4℃ 低温固定 24 h 后,用 pH6.8 的磷酸缓冲液冲洗 3 次,分别用浓度为 30%、50%、70%、80%、90% 乙醇逐级脱水,每次 15 min,100% 的乙醇脱水 2 次,每次 10 min,真空干燥,临界点干燥喷金后,用 Hitachi S-3400N 型扫描电子显微镜观察并拍照。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel2003 进行图表制作,应用 SPSS 19.0 对供试植物滞尘能力进行聚类分析、显著性分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植物滞尘能力比较

研究表明(表 1,表 2),供试乔木及供试灌木间的滞尘量差异显著($P<0.05$)。9 种落叶乔木滞尘量最大值是最小值的约 6 倍,其中桑滞尘量最大,为 $0.862\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,其次为梓,暴马丁香、杏、白杜的滞尘量较小,供试乔木中滞尘量最小的白桦滞尘量仅为 $0.135\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。16 种落叶灌木滞尘量最大值是最小值的约 7 倍,其中金山绣线菊滞尘量最大,为 $1.749\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,珍珠绣线菊、榆叶梅、锦带花、金焰绣线菊、小叶丁香、圆锥绣球、茶条枫的滞尘量较大,均在 $0.800\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,红瑞木、东北连翘、红王子锦带、天目琼花、红丁香、接骨木、紫丁香等滞尘量均<灌木平均值,滞尘量最小的为水蜡。

表 1 哈尔滨市常见绿化乔木的滞尘量比较

Table 1 Comparison on the dust-retention capability of major afforested arbors in Harbin			
植物种类	滞尘量 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	植物种类	滞尘量 /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
桑	$0.862\text{ }2\pm0.056\text{ }8\text{ a}$	暴马丁香	$0.374\text{ }2\pm0.018\text{ }1\text{ e}$
梓	$0.747\text{ }4\pm0.009\text{ }8\text{ b}$	杏	$0.299\text{ }8\pm0.015\text{ }3\text{ f}$
斑叶稠李	$0.634\text{ }0\pm0.047\text{ }5\text{ c}$	白杜	$0.244\text{ }7\pm0.011\text{ }2\text{ f}$
水曲柳	$0.562\text{ }9\pm0.034\text{ }9\text{ d}$	白桦	$0.135\text{ }1\pm0.013\text{ }9\text{ g}$
旱柳	$0.510\text{ }9\pm0.044\text{ }4\text{ d}$		

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。表 2 同。

表 2 哈尔滨市常见绿化灌木的滞尘量比较

Table 2 Comparison on the dust-retention capability of major afforested shrubs in Harbin

植物种类	滞尘量 /(g·m ⁻²)	植物种类	滞尘量 /(g·m ⁻²)
金山绣线菊	1.749 0±0.050 1a	红端木	0.589 9±0.023 7cde
珍珠绣线菊	1.173 5±0.093 2b	东北连翘	0.537 6±0.040 7cde
榆叶梅	1.147 7±0.893 3b	红王子锦带	0.530 0±0.025 7cde
锦带花	1.034 9±0.077 2b	天目琼花	0.456 2±0.024 7cde
金焰绣线菊	1.032 7±0.026 5b	红丁香	0.440 7±0.030 5de
小叶丁香	0.936 3±0.114 7bc	接骨木	0.385 5±0.016 7e
圆锥绣球	0.860 5±0.042 1bcd	紫丁香	0.366 6±0.029 6e
茶条枫	0.838 3±0.106 2bcd	水蜡	0.263 2±0.024 2e

2.2 不同植物叶表细胞特征及排列方式电镜观察

由图 1 及表 3 可知,所测植物细胞形状分为不规则形、卵圆形、多边形,多数种类细胞排列紧密。通过扫描电镜对叶表细胞形态的观察可见,红端木(图 1-D)、梓(图 1-E)、桑(图 1-F)等由于角质层增厚、蜡质层等因素导致细胞轮廓线不清晰,不能直接观察到表皮细胞形态。锦带花与其他植物相比细胞轮廓线较宽、较深而曲折,细胞轮廓线间聚集了较多

表 3 25 种植物叶表皮细胞形态

Table 3 Characteristics of leaf cell in the 25 urban greenery plants

植物种类	细胞形状		植物种类	细胞形状	
	上表皮	下表皮		上表皮	下表皮
金山绣线菊	不规则形	卵圆形	接骨木	—	不规则形
珍珠绣线菊	不规则形	不规则形	紫丁香	多边形	不规则形
榆叶梅	不规则形	不规则形	水蜡	多边形	不规则形
锦带花	不规则形	不规则形	桑	不规则形	不规则形
金焰绣线菊	不规则形	卵圆形	梓	—	—
小叶丁香	多边形	多边形	斑叶稠李	多边形	不规则形
圆锥绣球	多边形	多边形	水曲柳	卵圆形	不规则形
茶条枫	多边形	多边形	旱柳	不规则形	卵圆形
红端木	不规则形	不规则形	暴马丁香	—	—
东北连翘	卵圆形	卵圆形	杏	卵圆形	不规则形
红王子锦带	不规则形	不规则形	白杜	多边形	不规则形
天目琼花	多边形	不规则形	白桦	多边形	不规则形
红丁香	卵圆形	卵圆形			

注:— 表示无法观察到叶表细胞形状。

2.4 不同植物叶表气孔特征电镜观察

气孔形状可分为圆形,长圆形,卵圆形。圆锥绣球(图 1-C)下表皮气孔密度明显>上表皮,气孔开口较大,其余树种仅下表皮有气孔器分布。由表 4 可知,供试植物气孔密度在 72~1 720 个·mm⁻²范围内,其中白桦的气孔器最密集(1 720 个·mm⁻²);红端木、水曲柳、金山绣线菊次之,梓的气孔器被叶表覆盖的角质层覆盖,仅为 72 个·mm⁻²。金山绣线菊(图 1-A)和金焰绣线菊(图 1-B)气孔开口大,保卫细胞凸出于表皮之上,较细颗

颗粒物。金山绣线菊(图 1-A)和金焰绣线菊(图 1-B)细胞壁均未明显增厚,下表皮细胞排列不规则、垂周壁凸起形成小室或沟槽,颗粒物被深藏在大小形状不一的小室内,而凸起的细胞表面固定颗粒物较少。圆锥绣球(图 1-C)、红端木叶表细胞排列形成的带状或波状起伏、细小叶脉处常聚集颗粒物。

2.3 不同植物叶表角质层纹饰特征电镜观察

植物叶表皮纹饰可分为:条纹状纹饰、脊状纹饰、皱褶增厚和较平滑的角质膜。小叶丁香(图 1-G)、水曲柳、东北连翘上表皮角质层呈深浅不一的褶皱状雕饰,下表皮气孔周围形成辐射形条纹状纹饰;茶条枫(图 1-H)、红王子锦带、榆叶梅上表皮也有类似较浅的褶皱状雕饰及条纹状纹饰,下表皮气孔周围有较浅条纹状纹饰或脊状纹饰;梓树(图 1-E)的上、下表皮均有较厚的角质层,下表皮细密的条纹状纹饰纵横交错,利于较小颗粒物的滞留;桑(图 1-F)叶表上表皮腺毛间细胞排列形成脊状突起,下表皮气孔周围有线形较短纹饰,覆盖有蜡质层,蜡质可能因受到自然环境、污染物等的影响,分布不均匀,增加了叶表的粗糙程度。

粒物聚集在孔下室。此外,气孔周围常形成环状、条纹状和褶皱纹饰,能够增加叶表粗糙程度。由表 5 滞尘量与气孔密度的相关性分析可知,植物滞尘量与气孔密度正相关,但相关性未达到显著水平。

2.5 表皮毛特征电镜观察

植物的表皮毛主要分为非腺毛和腺毛 2 类。由表 6 可知,茶条枫(图 2-A)、榆叶梅(图 2-B)等上下表皮均有不分枝的非腺毛,下表皮毛密度均>上表皮毛密度。其中茶条槭表皮单毛密最度大(上表皮 16 个·mm⁻²,下表皮 49 个·mm⁻²),锦带花和水

曲柳下表皮存在较长的非腺毛;天目琼花、珍珠绣线菊、梓和旱柳上表皮存在非腺毛,其中珍珠绣线菊(图 2-C)的非腺毛为分枝毛,表面有不规则突起,利于增加叶表与颗粒物的接触面积。红瑞木(图 1-D)、山桃稠李(图 2-D)、金焰绣线菊叶脉处有表皮毛分布,可以滞留较大颗粒物。由表 7 可知,供试树种中山桃稠李(图 3-A)、小叶丁香图(图 3-B)等植物叶

下表皮分布有腺毛,水曲柳(图 3-D)、红王子锦带(图 3-E)、旱柳(图 3-F)等植物上下表皮均有腺毛,除暴马丁香外下表皮腺毛密度均>上表皮。小叶丁香下表皮腺毛密度最大($31\text{ 个}\cdot\text{mm}^{-2}$),密度最小的斑叶稠李为 $1\text{ 个}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。由表 7 滞尘量与表皮毛的相关性分析可知,植物滞尘量与叶表非腺毛密度、腺毛密度及表皮毛均呈正相关关系。

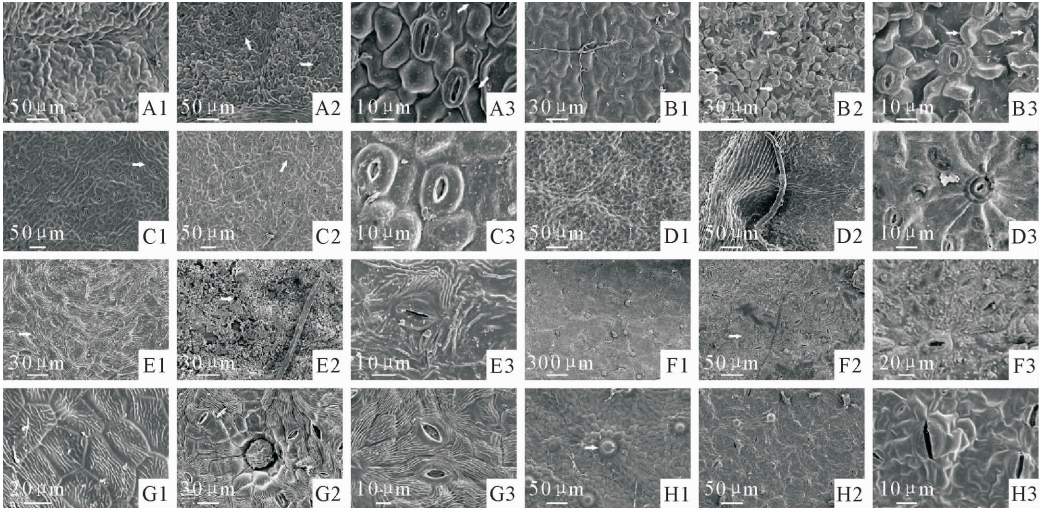


图 1 不同植物叶表细胞及角质层纹饰特征

Fig. 1 Characteristics of different plant-leaf-surface cells and the cuticular layers

表 4 25 种城市绿化植物气孔特征

Table 4 Surface characteristics of stomata in the 25 urban greenery plants

植物种类	气孔形状	密度/(个·mm ⁻²)	植物种类	气孔形状	密度/(个·mm ⁻²)
金山绣线菊	长圆形	907	东北连翘	卵圆形	578
珍珠绣线菊	卵圆形	178	红王子锦带	长圆形	398
榆叶梅	长圆形	796	旱柳	长圆形	502
锦带花	卵圆形	159	天目琼花	长圆形	99
金焰绣线菊	卵圆形	739	红丁香	长圆形	161
小叶丁香	长圆形	312	接骨木	卵圆形	319
桑	长圆形	159	暴马丁香	卵圆形	197(24)
圆锥绣球	圆形	265(106)	紫丁香	长圆形	421
茶条槭	卵圆形	490	杏	长圆形	268
梓	长圆形	72	水蜡	卵圆形	442
山桃稠李	卵圆形	390	华北卫矛	卵圆形	199
红瑞木	圆形	1 447	白桦	卵圆形	1 720
水曲柳	卵圆形	951			

注:括号内表示上表皮细胞气孔密度。

表 5 滞尘量与气孔密度、表皮毛密度的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of dust retention and density of stomatal morphology and foliar trichome

	气孔密度	非腺毛密度	腺毛密度	表皮毛密度
滞尘量	0.256	0.217	0.545	0.217

3 结论与讨论

哈尔滨常见绿化乔木滞尘能力由大到小依次为:桑、梓、斑叶稠李、水曲柳、旱柳、暴马丁香、杏、白杜、白桦。16 种绿化灌木中,金山绣线菊、珍珠绣线

菊和榆叶梅的滞尘能力较强,红丁香、接骨木、紫丁香和水蜡的滞尘能力显著低于滞尘能力较强的树种。不同植物滞尘量差异显著,灌木的滞尘量>乔木,这与李新宇^[21]等的结论相符,这与不同生活型植物的垂直高度不同有关,高大的乔木可以阻滞空气中的扬尘和降尘,密而矮的灌木主要阻滞地面扬尘。

植物叶表的粗糙度影响着细小颗粒物的滞留,叶表大量沟状、孔状峰谷区域和凹陷能够增加叶面粗糙程度,可以对粉尘起到筛选作用,进而增强植物的滞尘能力^[10,19]。较大颗粒物的滞留主要与颗粒

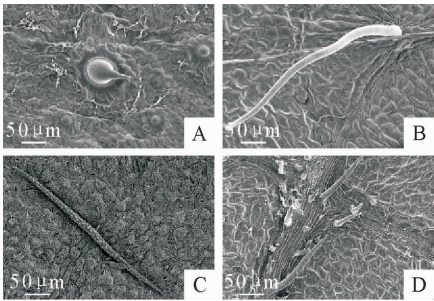


图 2 不同植物表皮毛形态

Fig. 2 Forms of different plant epidermal hair

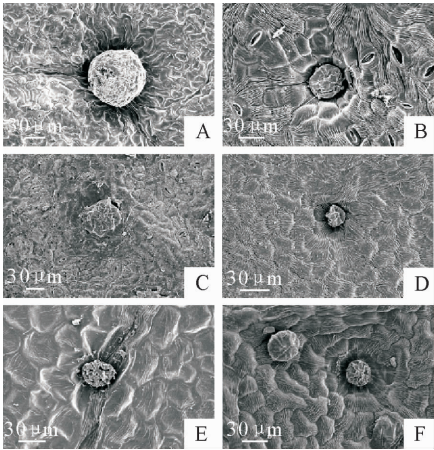


图 3 不同植物表皮腺毛形态

Fig. 3 Glandular hair forms of different plant epidermal cells

表 6 10 种植物非腺毛密度

Table 6 Density of leaf epidermal hair in the 10 urban greenery plants (个·mm⁻²)

植物种类	非腺毛密度		植物种类	非腺毛密度	
	上表皮	下表皮		上表皮	下表皮
茶条枫	16	49	珍珠绣线菊	4	0
榆叶梅	9	11	天目琼花	2	0
红王子锦带	3	2	梓	1	0
白杜	1	3	水曲柳	0	3
旱柳	9	0	锦带花	0	1

表 7 12 种植物腺毛密度

Table 7 Density of glandular opaque spot in 12 urban greenery plants (个·mm⁻²)

植物种类	腺毛密度		植物种类	腺毛密度	
	上表皮	下表皮		上表皮	下表皮
斑叶稠李	0	1	红丁香	0	22
小叶丁香	14	31	接骨木	0	9
桑	0	12	暴马丁香	5	7
水曲柳	14	8	紫丁香	0	17
红王子锦带	4	3	杏	0	5
旱柳	11	10	水蜡	0	6

物同叶面之间的物理作用力有关^[20]。即使是叶表面无毛的植物,若叶表具有沟状组织其滞尘能力也很强^[7]。叶表细胞不规则排列形成小室或沟槽、脊状或浅波形起伏及细小叶脉能够增加叶表粗糙程

度,利于滞留细颗粒物。这与陈玮^[17]、石辉^[19]等的结论类似,即叶表面凸凹不平的瘤状物使叶片具有较好的堆集灰尘的形态,而粒径较小的颗粒物易进入叶表的凹陷处。

角质膜纹饰主要分为:条纹状纹饰、脊状纹饰、皱褶增厚和较平滑纹饰。通过对比发现,具有较深交错的条纹状纹饰、脊状纹饰和皱褶增厚角质纹饰等特征的叶表粗糙程度较大,更容易固定颗粒物(珍珠绣线菊、锦带花、桑等);而叶表纹饰细密或较浅(红丁香、白桦、白杜)、角质层较平滑(接骨木、水蜡、杏等)的植物吸附颗粒物的能力较差。贾彦^[10]等通过对粉尘粒径测定和叶表结构观察由电镜观测也得到了类似结论。刘璐^[5]等的研究表明植物叶表的疏水蜡质层能增加植物的斥水性,导致颗粒物与叶表的接触角较大,接触面积较小,而李海梅^[6]等的研究中具有蜡质表层的女贞和大叶黄杨滞尘能力较强,这可能是由于部分蜡质被破坏,形成粗糙的表面,增加了颗粒物与叶表的接触面,利于将颗粒物深藏在蜡质层的空隙间,具体的蜡质形成过程及蜡质成分对滞尘的影响有待进一步的研究。

J. Burkhadt^[11]的风洞试验发现细颗粒物主要滞留在气孔附近,且通过气孔滞尘的叶片,滞尘能力较通过叶表面和纤毛滞尘的叶片稳定^[20]。不同植物气孔分布位置不同,气孔密度也存在差异,俞学如^[22]等的研究表明植物滞尘基本符合滞尘量随着气孔数量的增加而增加的规律,刘璐^[5]、刘玲^[23]等的研究发现气孔密度较大、气孔开口较大的植物截留颗粒物的能力较强,而气孔排列整齐的植物滞尘能力较弱。本研究发现气孔能够在一定程度上增加叶表对颗粒物的阻滞能力,其密度与植物滞尘量正相关。从滞尘量与气孔密度对比观察可以看出灌木中气孔密度相对较大的金山绣线菊、榆叶梅、金焰绣线菊等及乔木中气孔密度相对较大的水曲柳、旱柳等单位叶面积滞尘量较大;而红丁香、接骨木、暴马丁香和水蜡等灌木及白杜、杏等乔木气孔密度相对较低,滞尘量较小,这可能是由于气孔在一定程度上增加了叶表的粗糙程度及叶表与颗粒物的接触面积,且气孔周围有相对较强的空气流动和湿润的微环境,增强了对空气中亲水颗粒物的吸附。

表皮毛可以增加叶表与颗粒物的接触面积,利于颗粒物的滞留。叶表皮毛的形状、数量、质地也是植物滞尘能力差异的重要原因。柴一新^[7]、陈芳^[8]等研究均表明叶面粗糙、密附细毛的植物滞尘能力较强,而叶表光滑无毛的植物滞尘能力较弱。本研究中相关性分析表明叶表皮毛密度与植物滞尘量正相关。细密的绒毛有利于增加颗粒物与植物叶片的

接触面,而密度较小且呈针状的表皮毛不利于滞留颗粒物^[12]。有研究表明许多下表皮的表皮毛是腺毛,可以分泌大量脂类物质起到黏附粗颗粒的作用^[24]。植物通过表皮附属物附着的大气颗粒物较易被风或雨冲刷掉,从而使叶片重新发挥固着颗粒物的作用。

叶片是植物滞留大气颗粒物的主要载体,植物滞尘能力与叶片微形态特征密切相关^[6,17-18]。本研究中叶表造成供试树种滞尘差异的主要原因有叶表角质层纹饰、叶表细胞特征与排列方式、气孔特征与密度以及叶表皮毛的特征。依据叶表微形态选择不同生活型植物中滞尘量较大的树种、进行合理进行结构设计,对发挥植物滞尘效果具有重要意义。

参考文献:

[1] BRUNEKREEF B,HOLGATE S T. Air pollution and health [J]. The Lancet,2002,360(9341):1233-1242.

[2] 王赞红. 近地面大气颗粒物粒度与粒形特征[J]. 环境科学, 2007,28(9):1935-1940.

WANG Z H. Size distribution and shape characteristics of sub-aerial airborne particles [J]. Environmental Science, 2007, 28 (9):1935-1940. (in Chinese)

[3] 么旭阳,胡耀升,刘艳红. 北京市 8 种常见绿化树种滞尘效应 [J]. 西北林学院学报,2014,29(3):92-95.

YAO X Y,HU Y S,LIU Y H. Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):92-95. (in Chinese)

[4] ONDER S,DURSUN S. Air borne heavy metal pollution of *Cedrus libani* (A. Rich.) in the city centre of Konya (Turkey) [J]. Atmospheric Environment,2006,40(6):1122-1133.

[5] 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.

LIU L ,GUAN D S,CHEN Y Q. Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou municipality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (8):2604-2614. (in Chinese)

[6] 李海梅,刘霞. 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1659-1662.

LI H M,LIU X. Relationships between leaf epidermal morphology and dust-retaining capability of main garden trees in Chengyang district of Qingdao City[J]. Chinese Journal of Ecology,2008,27(10):1659-1662. (in Chinese)

[7] 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,2002,13(9):1121-1126.

CHAI Y X,ZHU N,HAN H J. Dust removal of urban tree species in Harbin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(9):1121-1126. (in Chinese)

[8] 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, 25(1):34-38.

[9] 王蕾,高尚玉,刘连友,等. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. 应用生态学报,2006,17(4):4597-4601.

[10] 贾彦,吴超,董春芳,等. 7 种绿化植物滞尘的微观测定[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(11):4547-4553.

JIA Y,WU C,DONG C F, *et al.* Measurement on ability of dust removal of seven green plants at micro-conditions [J]. Journal of Central South University:Science and Technology, 2012,43(11):4547-4553. (in Chinese)

[11] BURKHARDT J,PETERS K,CROSSLEY A. The presence of structural surface waxes on coniferousneedles affects the pattern of dry deposition of fine particles[J]. Journal of Experimental Botany,1995,46(7):823-831.

[12] 王会霞,石辉,李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3077-3082.

[13] GB3095-2012,环境空气质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.

[14] 蔡永立,宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学 I. 叶片解剖特征的比较[J]. 植物生态学报,2001,25(1):90-98,130-131.

[15] 王艳芬,陈佐忠,黄德华,等. 锡林河流域灰尘自然沉降量初报 [J]. 植物生态学报,2000,24(4):459-462.

WANG Y F,CHEN Z Z,HUANG D H, *et al.* Temporal variation in dust deposition in the Xilin river basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2000,24(4):459-462. (in Chinese)

[16] 斯佩克特 D L,戈德曼 R D,莱因万德 L A. 细胞实验指南(下册)[M]. 北京:科学出版社,2001.

[17] 陈玮,何兴元,张粤,等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2113-2116.

[18] BECKETT K P,FREER-SMITH P H,TAYLOR G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites[J]. Arboricultural Journal,2000,24(2-3):209-230.

[19] 石辉,王会霞,李秧秧,等. 女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察[J]. 生态学报,2011,31(5):1471-1477.

[20] BECKETT K P,FREER-SMITH P H,TAYLOR G. Urban woodlands; their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environmental pollution,1998,99(3):347-360.

[21] 李新宇,赵松婷,郭佳,等. 基于扫描电镜定量评价植物滞留大气颗粒物能力[J]. 西北林学院学报,2016,31(1):286-291.

LI X Y,ZHAO S T,GUO J, *et al.* Evaluation of the retention capability of air particulates by common trees based on SEM [J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(1): 286-291. (in Chinese)

[22] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D]. 南京:南京林业大学,2008.

[23] 刘玲,方炎明,王顺昌,等. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. 环境科学,2013,34(6): 2361-236.

LIU L,FANG Y M,WANG S C, *et al.* Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven tress species [J]. Environmental Science,2013,34(6):2361-236. (in Chinese)

[24] KARDEL F,WUYTS K,MAHER B A, *et al.* Leaf saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring: inter-species differences and in-season variation [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (29):5164-5171.