

长春市南湖公园 5 种常绿针叶树种滞留大气颗粒物能力研究

王彤, 张丹*, 杨轶晗, 常宇飞, 吴俊杰, 王紫含 (长春大学, 吉林长春 130022)

摘要 以长春市南湖公园 5 种针叶乔木树种为研究对象, 探讨了植物叶片结构特征和叶表面微观形态特征与叶片滞留大气颗粒物能力的关系。结果表明: 5 种常绿针叶乔木树种叶表面滞留大气颗粒物的能力存在显著差异, 各树种单位叶面积滞留大气颗粒物量由高到低依次为沙冷杉(*Abies holophylla*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、黑皮油松(*Pinus tabuliformis* var. *mukdensis*)。植物叶表面的滞留大气颗粒物能力与植物种类及其微观形态结构之间具有一定的相关关系, 凸起、沟槽、气孔及各种纹理等微观结构增加了叶表面的粗糙程度, 提高了植物的滞留颗粒物能力。叶片表面的气孔数量、气孔直径、沟壑宽度、沟壑数量皆与其滞留大气颗粒物量有显著相关性。

关键词 常绿针叶树种; 滞留大气颗粒物; 叶表面微观形态特征

中图分类号 X 173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)09-0077-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.09.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Atmospheric Particulate Matter Retention Capacity of Five Evergreen Coniferous Trees in Nanhu Park, Changchun

WANG Tong, ZHANG Dan, YANG Yi-han et al (Changchun University, Changchun, Jilin 130022)

Abstract In this study, five evergreen coniferous species of Nanhu Park in Changchun were selected as the research objects to explore the relationship between leaf structure characteristics, leaf surface morphology characteristics and the ability of leaves to retain atmospheric particulate matter. The results showed that there were significant differences in the capacity of atmospheric particulate matter retention on leaf surface of five coniferous tree species, and the order of atmospheric particulate matter retention per leaf surface of each species was as follows: *Abies Holophylla*, *Picea koraiensis*, *Pinus syestris* var. *mongholica*, *Pinus koraiensis*, *Pinus tabuliformis* var. *mukdensis*. The ability of atmospheric particulate matter retention on plant leaf surface was correlated with plant species and their microstructure. The microstructures such as bulges, grooves, stomata and various textures increase the roughness of leaf surface and improve the dust retention ability of plants. The number of stomata, stomata diameter, gully width, gully number on leaf surface were significantly correlated with dust retention.

Key words Evergreen coniferous trees; Atmospheric particulate matter retention; Leaf surface micromorphological characteristics

随着经济的迅猛发展和工业化、城市化程度不断提高, 环境污染日益严重, 尤以大气污染最为凸显^[1]。大气颗粒物主要来自化石燃料燃烧、矿石冶炼、机动车等污染源的直接排放和 SO₂、NO_x、NH₃、VOC_s 等污染物的间接转化^[2]。大气颗粒物因与人类呼吸道、心血管、支气管和哮喘等疾病关系密切而受到人们越来越广泛的关注^[3-5]。PM₁₀(空气动力学直径 D_p < 10.0 μm 的颗粒物)已被证实是危害人类健康的最主要物质之一, PM_{2.5}(D_p < 2.5 μm)能够进入人体肺部导致肺泡发炎而具有更大的危害性^[6]。最新研究证实, 城市空气中的细颗粒物可以增大肺癌的发病危险^[7], 由此可见, 大气颗粒物的存在会危害市民身心健康, 降低市民生活质量^[8-9]。

树木具有过滤大气污染物的功能, 可以缓解城市大气颗粒物污染状况^[10-11], 是改善大气颗粒物浓度实际有效的方法^[12-13]。20 世纪 70 年代, 国外已开展树木减缓大气颗粒物能力的相关研究, 提出了森林植被是颗粒态污染物蓄积库的说法, 研究重点主要集中在树木滞留放射性颗粒物及金属污染物等方面^[11]。国内有关树木减缓大气颗粒物能力的研究起步相对较晚, 但发展较快。有研究结果表明, 各树种间滞留大气颗粒物量大小差异明显^[14], 并且不同植物滞留大气颗粒物的能力相差 2~10 倍以上^[15]。

树木滞留大气颗粒物能力受叶片结构特征、外界环境条

件等诸多因素影响^[16], 已有研究表明叶片表面沟状组织、褶皱及纤毛的存在对滞留大气颗粒物能力具有一定影响^[14, 17]。然而, 随着物候的变化, 绝大部分植物秋冬落叶休眠已成为其基本规律, 这极大地减弱了城市绿化植物发挥其生态效益的能力。尤其是在北方秋冬季节, 气候干燥风沙肆意, 针叶常绿树种是冬季发挥滞留大气颗粒物效应的主要绿化树种。陈玮等^[18]对东北地区城市针叶树种冬季滞留大气颗粒物效应进行了研究, 结果表明: 不同针叶树种滞留大气颗粒物能力具有一定差异。然而, 已有研究大多集中在叶片表面滞留大气颗粒物能力的对比, 有关叶片蜡质层滞留大气颗粒物能力的研究尚鲜见报道。笔者选取长春市 5 种常见的常绿针叶树种, 探明不同针叶树种叶片表面及叶片蜡质层滞留大气颗粒物能力差异, 探讨不同树种叶表面形态特征对其滞留大气颗粒物能力的影响, 旨在筛选出减缓大气颗粒物能力较强的针叶树种, 为降低城市大气颗粒物污染及提高空气质量提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与树种选择 长春市位于 124° 18' ~ 127° 05' E, 43° 05' ~ 45° 15' N, 居北半球中纬度北温带地区。年均气温 5.5 °C, 年降雨量 582 mm。长春南湖公园总面积 222 余万 m², 是东北最大的市内公园。选取南湖公园常见的 5 种针叶乔木树种作为研究对象, 分别为红皮云杉(*Picea koraiensis*)、沙冷杉(*Abies holophylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、黑皮油松(*Pinus tabuliformis* var. *mukdensis*) 和红松(*Pinus koraiensis*)。

1.2 研究方法

1.2.1 叶片采集 每个树种选取 3 株典型、健康的植株, 分

基金项目 “长大学者攀登计划”项目(ZKP202015)。

作者简介 王彤(1997—), 女, 吉林双辽人, 硕士, 从事城市森林园林生态功能研究。*通信作者, 讲师, 从事城市森林群落结构、多样性、生态服务功能研究。

收稿日期 2022-06-17

别从树冠东、西、南、北方向的上、中、下不同部位进行叶片采集。每株植物采集叶片的数量不低于30片,采集好的叶片立即封存于自封袋中带回实验室即将采集好的叶片一部分用于滞留大气颗粒物含量及叶片结构特征测定,另一部分叶片采用扫描电子显微镜(JSM-6510LA)进行叶表面微观形态特征测定。

1.2.2 叶片滞留大气颗粒物量测定。叶片表面滞留大气颗粒物含量测定采用蒸馏水浸洗法。将采集后的叶片用蒸馏水浸泡2~3 h,用玻璃棒充分搅拌,最后用镊子将叶片小心夹出。将孔径为0.22 μm 的聚四氟乙烯微孔滤膜于80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,用万分之一天平称重,记为 $W_1(\text{g})$,浸洗液通过真空抽滤装置进行抽滤,抽滤后将带有大气颗粒物的微孔滤膜重量计为 $W_2(\text{g})$,2次重量之差(W_2-W_1)即为采集样品上所附着的大气颗粒物重量。浸洗后的叶片晾干后用叶面积仪求算叶面积 $S(\text{mm}^2)$ ^[19-20]。

叶片蜡质层滞留大气颗粒物含量测定采用氯仿浸洗法。将蒸馏水浸洗后的叶片用氯仿浸泡2 h,然后将滤液通过真空抽滤装置进行抽滤,抽滤后带有大气颗粒物的微孔滤膜重量计为 $W_3(\text{g})$ 。

单位叶面积滞留大气颗粒物量、蜡质层滞留大气颗粒物量和叶片滞留大气颗粒物总量计算公式如下:

$$W_{\text{叶表面}} = (W_2 - W_1) / S$$

$$W_{\text{蜡质层}} = (W_3 - W_1) / S$$

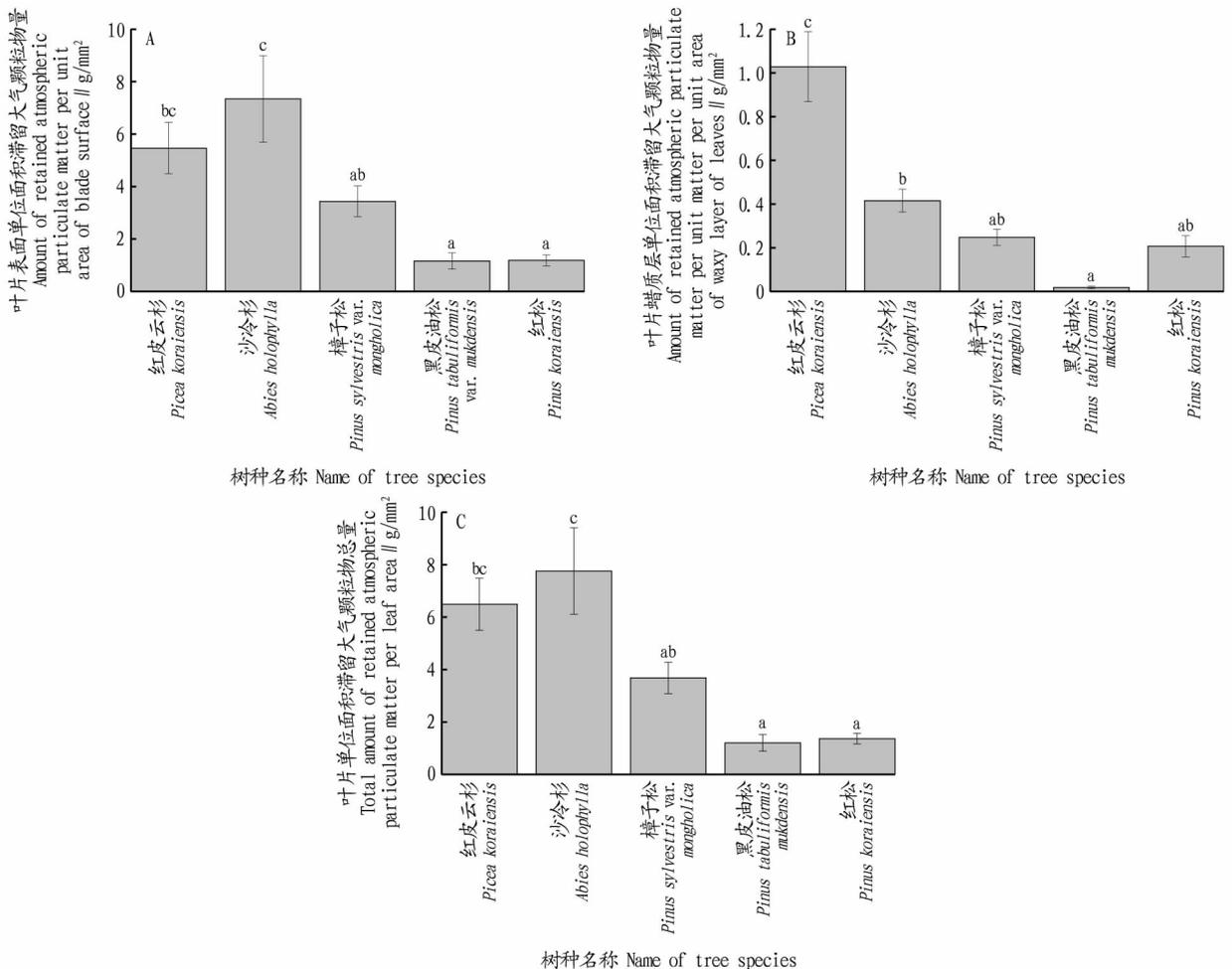
$$W_{\text{总}} = W_{\text{叶表面}} + W_{\text{蜡质层}}$$

1.2.3 叶表面微观结构测定。选取所测试树种叶片样品,每个树种3个重复,每份样品取出3~5片叶片,从样本主叶脉两侧中部切成面积约1 cm×1 cm的小方块,采用扫描电子显微镜观测叶片表面微结构特征,包括气孔大小、气孔数量、叶表面有无绒毛及叶表面沟壑情况等。

2 结果与分析

2.1 不同树种滞留大气颗粒物量对比分析 如图1A所示,不同树种叶片表面滞留大气颗粒物能力有差异,沙冷杉叶片表面单位面积滞留大气颗粒物量最高,其次为红皮云杉、樟子松和黑皮油松,红松最低。其中,沙冷杉叶片表面单位面积滞留大气颗粒物量显著高于樟子松、黑皮油松和红松($P < 0.05$),分别为樟子松、黑皮油松和红松的2.13、6.17、6.33倍。

如图1B所示,不同树种叶片蜡质层滞留颗粒物能力也有差异,但滞留颗粒物能力大小与叶片表面表现不一致,其



注:不同小写字母表示树种间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among trees ($P < 0.05$).

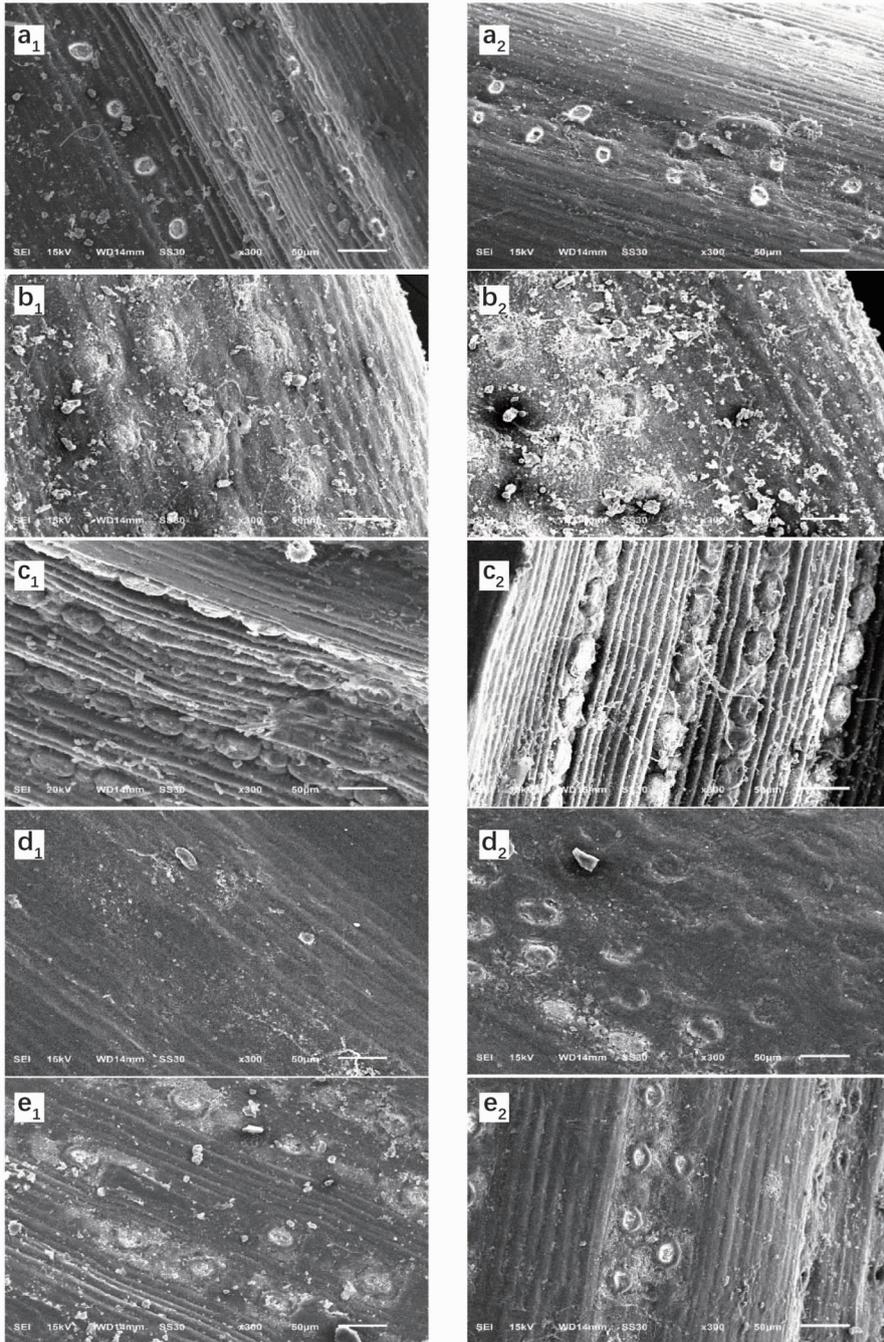
图1 不同树种滞留大气颗粒物量

Fig. 1 The amount of atmospheric particulate matter retained by different coniferous species

中红皮云杉叶片蜡质层单位面积滞留大气颗粒物量最高,其次依次为沙冷杉、樟子松和红松,黑皮油松最低。红皮云杉叶片蜡质层滞留大气颗粒物量分别是沙冷杉、樟子松、红松和黑皮油松的 2.45、4.12、4.90、51.5 倍,且红皮云杉显著高于其他树种 ($P < 0.05$),且沙冷杉显著高于黑皮油松 ($P < 0.05$)。

不同树种叶片滞留大气颗粒物总量与叶片表面单位面积滞留大气颗粒物量具有相同的趋势,也表现为沙冷杉最

高,其次依次为红皮云杉、樟子松、红松,黑皮油松最低,滞留大气颗粒物总量分别为 7.76、6.49、3.68、1.37 和 1.20 g/m^2 ,其中,沙冷杉叶片单位面积滞留大气颗粒物总量显著高于樟子松、红松和黑皮油松 ($P < 0.05$),分别为樟子松、红松和黑皮油松的 2.11、5.66、6.47 倍(图 1C)。这主要是由于樟子松、红松以及黑皮油松叶片表面气孔排列整齐,沟壑起伏不明显,滞留少量颗粒物;而红皮云杉叶片上表面(图 2b₁)气孔分布较多且深,下表面(图 2b₂)气孔明显、相邻缝隙滞留颗粒



注:1 表示叶片上表面;2 表示叶片下表面;a. 黑皮油松;b. 红皮云杉;c. 红松;d. 沙冷杉;e. 樟子松。

Note:1 Represents the upper surface of the leaf;2 Represents the lower surface of the leaf. a. *Pinus tabulaeformis* var. *mukdensis*; b. *Picea koraiensis*; c. *Pinus koraiensis*; d. *Abies holophylla*; e. *Pinus sylvestris* var. *mongholica*.

图 2 不同树种叶片结构特征

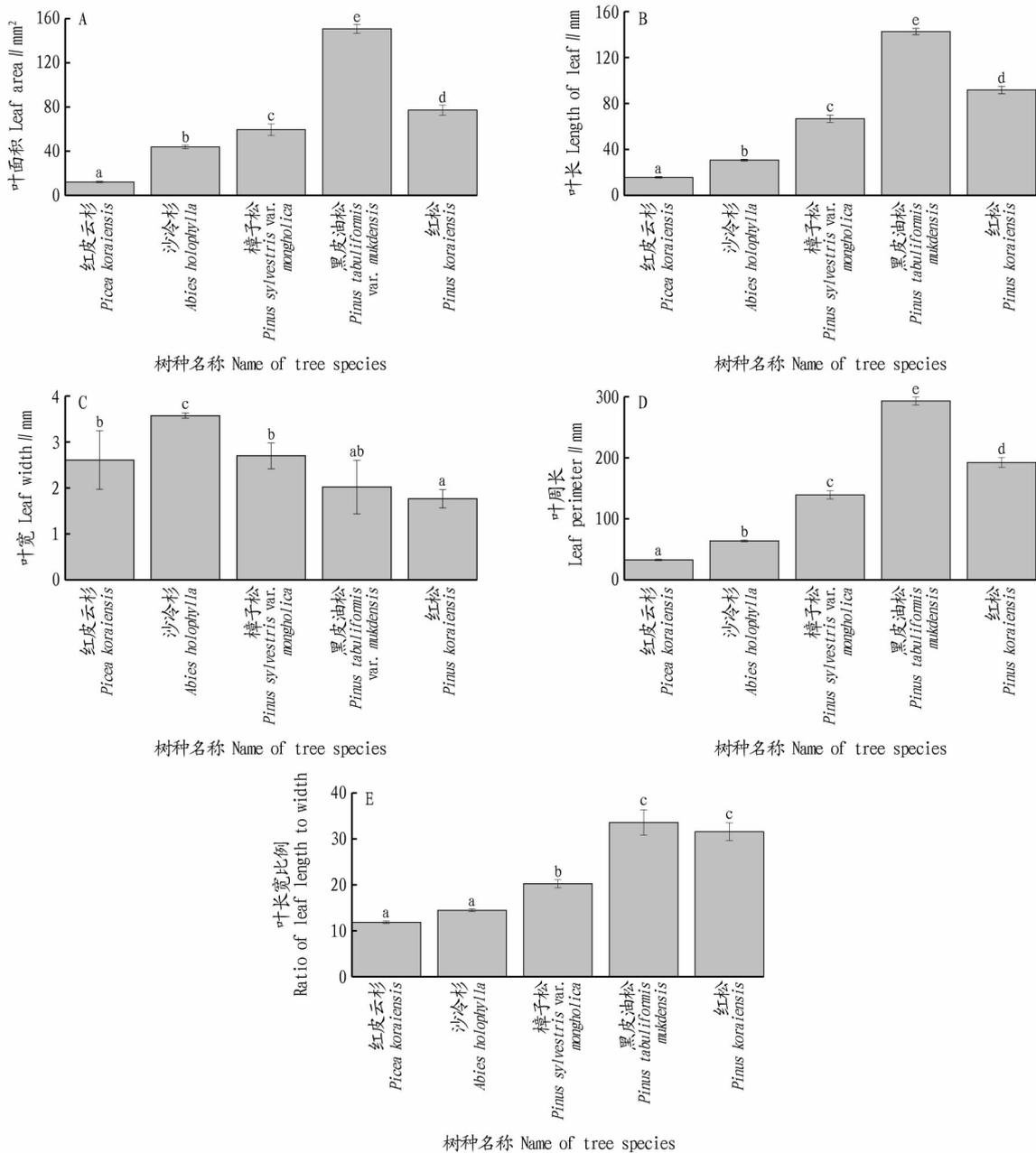
Fig. 2 Leaf structure of different tree species

物较多;沙冷杉上表面(图2d₁)有较宽的条状凸起,有利于大气颗粒物的附着,部分区域大气颗粒物堆叠明显,下表面(图2d₂)气孔中滞留大量颗粒物。综合以上结果,不同树种之间的滞留大气颗粒物能力差异较大,无论是叶片表面还是叶片蜡质层,5种针叶乔木树种中沙冷杉和红皮云杉都具有较好的滞留大气颗粒物能力。

2.2 不同树种叶片结构特征

如图3所示,不同树种叶片

结构特征具有显著差异。其中,叶宽表现为沙冷杉>樟子松>红皮云杉>黑皮油松>红松,沙冷杉叶宽分别为樟子松、红皮云杉、黑皮油松和红松的1.32、1.37、1.77、2.02倍。而叶面积、叶长、叶周长及叶长宽比例均表现为黑皮油松>红松>樟子松>沙冷杉>红皮云杉,黑皮油松的叶面积、叶长均显著高于红松、樟子松、沙冷杉和红皮云杉($P<0.05$),黑皮油松叶长宽比例显著高于樟子松、红皮云杉和沙冷杉。



注:不同小写字母表示树种间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among trees ($P<0.05$).

图3 不同树种叶表面微形态特征

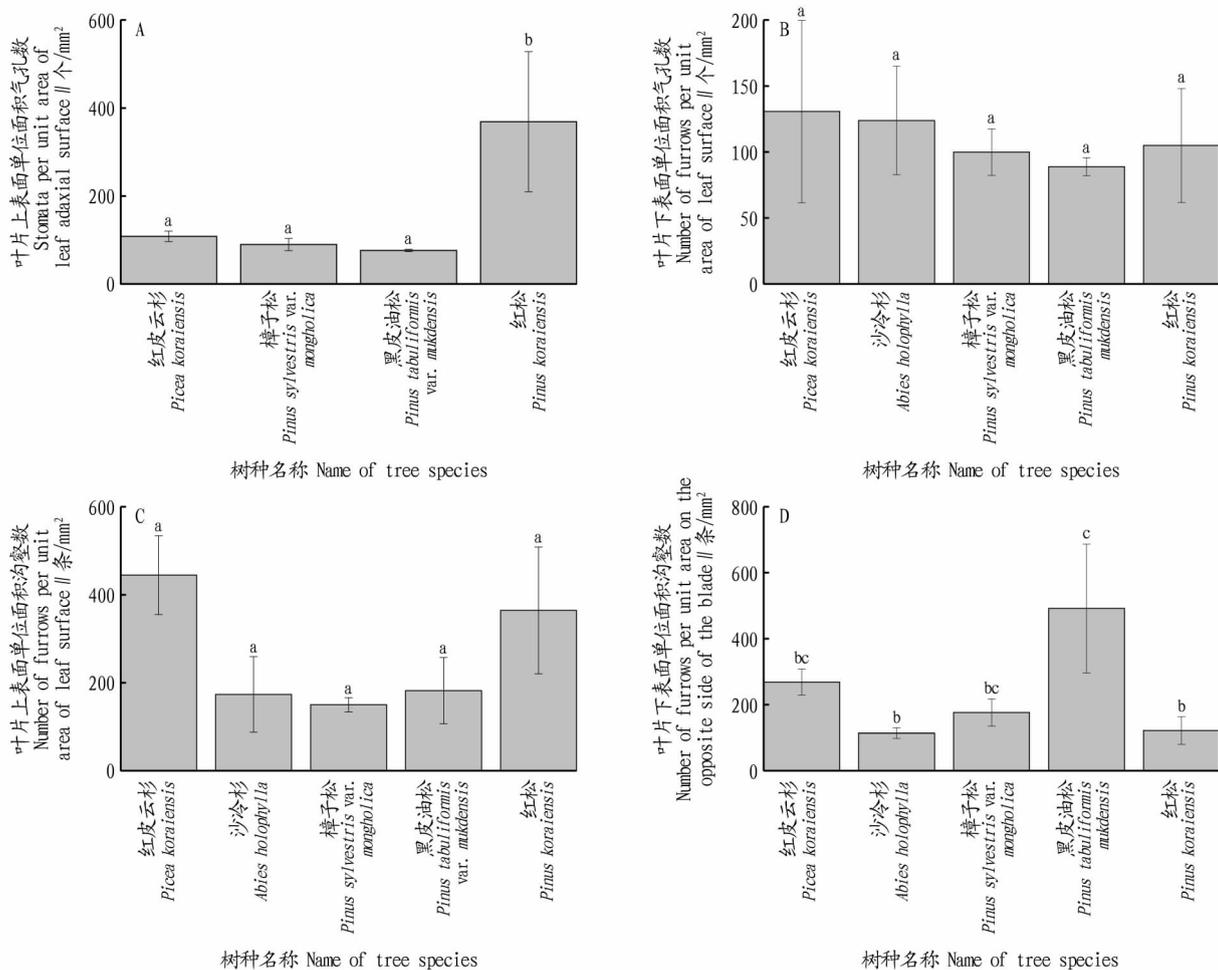
Fig. 3 Leaf surface microstructure of different coniferous species

2.3 不同树种叶片表面微形态特征 如图4所示,不同树种叶片上表面单位面积气孔数有显著差异,除沙冷杉叶片上表面没有气孔外,红松叶片上表面单位面积气孔数显著多于红皮云杉、樟子松和黑皮油松($P<0.05$),分别为红皮

云杉、樟子松和黑皮油松的3.40、4.11、4.83倍(图4A)。而叶片下表面单位面积气孔数不同树种之间差异较小,其中红皮云杉最多,其次为沙冷杉、红松和樟子松,黑皮油松最少,分别为130.68、123.89、104.97、99.91、88.86个/mm²

(图 4B)。不同树种上表面单位面积沟壑数有明显差异,红皮云杉数最多,其次为红松、黑皮油松和沙冷杉,樟子松最少,分别为 444.72、364.53、182.06、173.64、150.13 条/mm²,其中红皮云杉分别为红松、黑皮油松、沙冷杉和樟子松的 1.22、2.44、2.56、2.96 倍(图 4C)。不同树种下表面单位

积沟壑数表现为黑皮油松最多,其次为红皮云杉、樟子松、红松,沙冷杉最少,分别为 491.59、268.36、176.44、121.76、113.83 条/mm²,其中,黑皮油松下表面单位面积沟壑数分别为红皮云杉、樟子松、红松和沙冷杉的 1.83、2.79、4.04、4.32 倍(图 4D)。



注:不同小写字母表示树种间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among trees ($P < 0.05$).

图 4 不同树种叶表面微观形态及大气颗粒物分布

Fig. 4 Leaf surface micromorphology and atmospheric particulate matter distribution of different coniferous tree species

2.4 不同树种叶片滞留大气颗粒物影响因素 由表 1 可知,黑皮油松叶片滞留大气颗粒物总量与其叶片上表面沟壑宽度($r=0.717$)以及叶片下表面气孔直径($r=0.726$)呈显著正相关($P < 0.05$),红皮云杉与其叶片上表面单位面积沟壑宽度($r=0.717$)呈显著正相关($P < 0.05$),而沙冷杉与叶片下表面气孔直径($r=-0.732$)呈显著负相关($P < 0.05$),红松与叶片上表面气孔直径($r=0.817$)呈显著正相关,但与叶片下表面沟壑宽度($r=-0.717$)呈显著负相关($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同树种滞留大气颗粒物能力差异分析 植物滞留大气颗粒物的能力因植物种类、气候环境、生长状态、生活型等差异而不同^[21]。柴一新等^[14]对哈尔滨市主要绿化树种进行滞留大气颗粒物能力研究表明,不同树种间滞留大气颗粒物量具有显著差异,红皮云杉、杜松是滞留大气颗粒物能力较

强的树种。这与该研究结果有一定相似性,5 种针叶树种中红皮云杉滞留颗粒物能力较强。苏俊霞等^[15]对山西师范大学校园绿化植物滞留大气颗粒物能力的研究表明,不同植物滞留大气颗粒物的能力可差 2~10 倍以上。该研究中沙冷杉叶片表面单位叶面积滞留大气颗粒物量分别为樟子松、黑皮油松和红松的 2.13、6.17、6.33 倍。Xu 等^[22]通过对哈尔滨 3 种常绿乔木叶片颗粒物数、组成和形态结构的差异研究得出,红皮云杉叶片滞留大气颗粒物中 23.11%来自蜡质层,黑皮油松叶片所滞留的大气颗粒物中 38.22%来自蜡质层,在不同树种间叶片蜡质层滞留大气颗粒物量有显著差异。该研究中红皮云杉与黑皮油松叶片蜡质层滞留颗粒物量有显著差异,红皮云杉蜡质层滞留大气颗粒物量为黑皮油松的 51.5 倍,并且红皮云杉蜡质层滞留大气颗粒物量占其叶表面滞留颗粒物量的 19.4%,而黑皮油松蜡质层滞留大气颗粒物

量仅占其叶表面滞留大气颗粒物总量的 1.7%。

表 1 不同树种叶表面微结构特征与滞留大气颗粒物总量之间相关性

Table 1 Correlation between leaf surface microstructure and particulate matter retention of different tree species

| 指标 Index | 叶片上表面沟壑宽度 Width of grooves on the upper surface of the leaf | 叶片上表面沟壑数 Number of grooves on the upper surface of the leaf | 叶片下表面 气孔直径 Leaf lower surface pore diameter | 叶片上表面 气孔直径 Leaf upper surface pore diameter | 叶片下表面沟壑宽度 Width of grooves on the lower surface of the leaf |
|---|--|--|--|--|--|
| 黑皮油松 SPM+WPM <i>Pinus tabulaeformis</i> var. <i>mukdensis</i> SPM+WPM | 0.717* | -0.711 | 0.726* | 0.000 | 0.222 |
| 红皮云杉 SPM <i>Picea koraiensis</i> SPM | 0.717* | 0.889 | -0.067 | -0.483 | -0.067 |
| 沙冷杉 WPM <i>Abies holophylla</i> WPM | -0.535 | -0.242 | -0.732* | 0.419 | 0.329 |
| 红松 WPM <i>Pinus koraiensis</i> WPM | -0.444 | 0.794 | 0.000 | 0.817* | -0.717* |

注: * 表示在 0.05 水平(双尾)具有显著相关关系;SPM. 叶片表面滞留大气颗粒物量;WPM. 叶片蜡质层滞留颗粒物量。

Note: * represented that there was significant correlation at the 0.05 level(two-tailed). SPM. Represented the amount of atmospheric particulate matter retained on the leaf surface;WPM. Represented the amount of atmospheric particulate matter retained on the leaf wax layer.

3.2 不同树种滞留大气颗粒物能力与叶片表面微形态特征的关系 不同树种叶片表面滞留大气颗粒物能力与其叶片表面气孔数量、沟壑宽度和沟壑深度具有一定相关性。刘璐等^[23]对广州市 18 种常用行道树的叶片表面形态与滞留大气颗粒物的能力的研究表明,叶表面具有网状结构,气孔密度较大,且气孔开口大等特征更利于粉尘的滞留;而气孔排列整齐,无起伏结构则不利于叶片颗粒物的滞留。该研究中滞留大气颗粒物总量表现为沙冷杉最高,其次为红皮云杉、樟子松和红松,黑皮油松最低。王琴等^[24]研究表明,叶表面的气孔和颗粒物滞留量之间未发现显著相关,但与沟槽宽度有关。而孙应都等^[25]则认为,气孔密度和大小与颗粒物滞留能力有关。该研究也表明,叶片表面沟壑宽度影响植物滞留大气颗粒物量,黑皮油松和红皮云杉叶片滞留大气颗粒物总量与其叶片上表面沟壑宽度呈显著正相关,红松叶片蜡质层滞留大气颗粒物总量与叶片下表面沟壑宽度呈显著负相关。以上结果表明,树木叶片表面的微观结构与其滞留大气颗粒物总量有显著相关性,但不同树种间影响因素具有一定差异。

4 结论

该研究结果表明,不同树种叶片表面单位叶面积滞留大气颗粒物量表现为沙冷杉>红皮云杉>樟子松>黑皮油松>红松,其中沙冷杉是红松的 6.33 倍,叶片蜡质层单位叶面积滞留大气颗粒物量以红皮云杉最高,黑皮油松最低,红皮云杉滞留大气颗粒物量是黑皮油松的 51.5 倍。

植物叶表面的滞留大气颗粒物能力与植物种类及叶表面的微形态特征之间具有显著相关关系,植物叶表面的凸起、沟壑宽度、气孔直径是影响不同植物滞留大气颗粒物能力的主要因素。

参考文献

- [1] 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.
- [2] BECKETT K P, FREER-SMITH P, TAYLOR G. Effective tree species for local air quality management[J]. *Arboric*,2000,26(1):12-19.
- [3] OSTRO B D, LIPSETT M L, WIENER M B, et al. Asthmatic responses to airborne acid aerosols[J]. *Am J Public Health*,1991,81(6):694-702.
- [4] POPE C A III, BATES D V, RAIZENNE M E. Health effects of particulate air pollution: Time for reassessment? [J]. *Environ Health Perspect*,1995,

- 103(5):472-480.
- [5] POWE N A, WILLIS K G. Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO_2 and PM_{10}) absorption attributable to woodland in Britain[J]. *J Environ Manage*,2004,70(2):119-128.
- [6] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. *Environ Pollut*,1998,99(3):347-360.
- [7] 郭二果,王成,郝光发,等. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化[J]. *生态学报*,2009,29(6):3253-3263.
- [8] 唐吟凯,刘胜华. 城市土地利用类型与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关性研究:以武汉市为例[J]. *长江流域资源与环境*,2015,24(9):1458-1463.
- [9] 王会霞,石辉,张雅静,等. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒物粒径的影响[J]. *安全与环境学报*,2015,15(1):258-262.
- [10] 李松,邓宝昆,邵技新,等. 基于 GIS 的贵阳 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度城乡过渡特征及影响因素研究[J]. *生态环境学报*,2014,23(8):1298-1304.
- [11] LOHR V I, PEARSON-MIMS C H, TARNAI J, et al. How urban residents rate and rank the benefits and problems associated with trees in cities[J]. *J Arboric*,2004,30(1):28-35.
- [12] 李瑞雪,张明军,张永芳. 石家庄大叶黄杨叶片滞尘量及滞尘颗粒物的粒度[J]. *城市环境与城市生态*,2009,22(1):15-19.
- [13] WANG X H, BI X H, SHENG G Y, et al. Chemical composition and sources of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ aerosols in Guangzhou, China[J]. *Environ Monit Assess*,2006,119(1):425-439.
- [14] 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.
- [15] 苏俊霞,靳绍军,闫金广,等. 山西师范大学校园主要绿化植物滞尘能力的研究[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*,2006,20(2):85-88.
- [16] 阿丽亚·拜都热拉,玉米提·哈力克,塔依尔江·艾山,等. 阿克苏市 5 种常见绿化树种滞尘规律[J]. *植物生态学报*,2014,38(9):970-977.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李万春,田燕,王鹏云. 基于常规扫描仪的植物叶面积计算系统[J]. *气象*,2004,30(8):39-41.
- [20] 王蓉丽,方英姿,马玲. 金华市主要城市园林植物综合滞尘能力的研究[J]. *浙江农业科学*,2009,50(3):574-577.
- [21] LOVETT G M, LINDBERG S E. Concentration and deposition of particles and vapors in a vertical profile through a forest canopy[J]. *Atmos Environ*,1992,26(8):1469-1476.
- [22] XU H J, WANG W J, WANG H M, et al. Differences in quantity and composition of leaf particulate matter and morphological structures in three evergreen trees and their association in Harbin, China[J]. *Environmental pollution*,2019,252:1772-1790.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 孙应都,陈奇伯,李艳梅,等. 昆明市 6 个绿化树种叶表微结构与滞尘能力的关系研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*,2019,39(3):78-85.