

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响

魏文俊^{1,2}, 王兵^{1,3}, 牛香^{1,3*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 辽宁省林业科学研究院, 沈阳 110032; 3. 江西大岗山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 新余 338033)

摘要: 叶片作为植物滞留大气颗粒物最主要的载体, 其表面微观结构特征和粗糙度的差异是颗粒物滞纳能力的重要决定因素。叶片微观结构会随着生长(内部因素)以及环境污染强度(外部因素)发生变化, 然而现有的粉尘喷洒模拟实验, 一般持续时间较短, 而微观结构变化响应具有明显的滞后性, 其结果无法客观反映由内外因素作用引起的微观结构变化对颗粒物滞纳能力的影响。本研究利用新叶和老叶研究叶片生长, 并选择自然状态下不同污染源条件研究污染强度, 分析叶片表面微观结构的变化及其对颗粒物滞纳能力的影响。研究得到3种常绿树种(矮紫杉 *Taxus cuspidata* var.、侧柏 *Platycladus orientalis* 和油松 *Pinus tabulaeformis*)的老叶滞纳 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 量均高于新叶, 随着叶片的生长其颗粒物滞纳量在增大, 且新叶与老叶对不同粒径颗粒物的滞纳量间均存在极显著的差异。生长中叶片粗糙度 R_q 值的增大是老叶颗粒物滞纳能力增大的主要原因。5个树种(侧柏、油松、国槐 *Sophora japonica*、毛白杨 *Populus tomentosa* 和银杏 *Ginkgo biloba*) TSP 和 PM₁₀ 滞纳量为重度污染区高于相对清洁区。而 PM_{2.5} 和 PM₁ 滞纳量则是油松、银杏和侧柏为重度污染区高于相对清洁区, 国槐和毛白杨为相对清洁区高于重度污染区。不同污染强度区域间叶片 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 滞纳量存在着极显著的差异, PM₁ 滞纳量也存在着差异。主要归因于与相对清洁区相比, 重度污染区叶片的气孔指数降低, 蜡质层退化, 表面纹理和细胞边界更加不规则, 绒毛变长, 变硬, 叶片微观结构的这些变化使得重度污染区叶片粗糙度 R_q 值高于相对清洁区, 且叶片背面的增加较正面更明显。研究结果将为深入揭示叶片颗粒物滞纳能力的驱动因素, 以及提出更科学地提升净化颗粒物功能的城市森林管理措施提供数据支持。

关键词: 叶片; 表面微观结构; 粗糙度; 颗粒物滞纳能力; 新老叶; 污染强度

中图分类号: X171.1; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3136-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912264

Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter

WEI Wen-jun^{1,2}, WANG Bing^{1,3}, NIU Xiang^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Liaoning Academy of Forestry, Shenyang 110032, China; 3. Dagangshan National Key Field Observation and Research Station for Forest Ecosystem, Xinyu 338033, China)

Abstract: As the most important carrier of atmospheric particles captured by plants, the differences in micromorphology characteristics and leaf roughness are important determinants of particle capture capacity. Leaf micromorphology usually changes with growth (internal factor), and with environmental pollution intensity (external factor). The existing dust-spray simulation was always short; however, the leaf micromorphology changes had a clear delayed response, and therefore its results could not reflect the micromorphology changes caused by internal and external factors that influence the particulate capture capacity of leaves. In the present study, new and old leaves were used to study leaf growth, and different pollution source conditions were selected to study pollution intensity under natural conditions, to analyze the changes in leaf surface micromorphology and their impacts on particulate capture capacity. It was found that the amounts of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ on the old leaves of three evergreen trees (*Taxus cuspidata* var., *Platycladus orientalis*, and *Pinus tabulaeformis*) were higher than those of the new leaves, and the amounts of the particles with respect to the old leaves increased with leaf growth. Moreover, there were significant differences between the new and old leaves regarding the captured amount of different-sized particles. The increase in needle roughness (R_q) of the three evergreen trees, caused by growth, was the main factor that led to an increase in particle capture capacity for old leaves. The TSP and PM₁₀ captured amounts of *P. orientalis*, *P. tabulaeformis*, *Sophora japonica*, *Populus tomentosa*, and *Ginkgo biloba* were higher in the heavily polluted area than in the clean area. The amounts of PM_{2.5} and PM₁ captured by *P. tabulaeformis*, *G. biloba*, and *P. orientalis* in the heavily polluted area were higher than those in the clean area; however, the amounts of PM_{2.5} and PM₁ captured by *S. japonica* and *P. tomentosa* in the clean area were higher than those in the heavily polluted area. Pollution intensity very significantly affected the capture capacity of TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} by leaves, as well as significantly affecting the capture capacity of PM₁. This was mainly caused by the leaf micromorphology changes found in the heavily polluted area, such as stomatal index decrease, waxy layer degradation, more irregular surface texture and boundaries of the epidermal cells, and longer and hardened trichomes. These changes caused the R_q values to be generally higher in

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0503804); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31600359)

作者简介: 魏文俊(1981~), 女, 博士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为森林生态系统功能, E-mail: wwj0318@126.com

* 通信作者, E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

the heavily polluted area than in the clean area, and the roughness of the abaxial surface increased more notably than that of the adaxial surface. These results will provide data support for further revealing the driving factors of particulate matter capture capacity of leaves and proposing more scientific urban forest management measures to improve their particulate matter removal function.

Key words: leaf; surface micromorphology; roughness; particulate matter capture ability; old and new leaves; pollution intensity

随着工业化的迅速发展,城市化进程的快速推进,悬浮颗粒物已成为我国大部分城市的空气首要污染物^[1]. 颗粒物污染不仅降低大气能见度^[2],而且还是大量有毒物质的载体,有研究发现一些呼吸道微生物过敏原和病原体的相对丰度随着颗粒物浓度的增加而增加^[3]. 北京是超大城市,2017 年末全市机动车保有量达到 590.9 万辆^[4],移动源在本地排放中占 45%,区域传输贡献在重污染日超过 50%^[5]. 在区域性大气复合性污染日益严重的背景下,仍存在较大的污染反弹现象^[6,7],因此空气污染问题亟待深入研究.

森林是空气颗粒物的有效过滤体,研究得到林地比其他土地利用类型具有更高的干沉降率^[8],因此城市森林对颗粒污染物的净化作用受到了越来越多的关注. 近些年在城市森林管理中,也越来越重视生态系统服务供给,尤其是对大气污染物净化作用^[9]. 有研究表明,将英国西米德兰兹郡可用的土地进行绿化,在树木覆盖面积增加到理论上最大的 54% 时,可以使空气 PM₁₀ 的平均浓度降低 26%,每年能够减少 200 t PM₁₀ 颗粒物^[8]. 由于叶片是植物滞留大气颗粒物最主要的载体,叶表面特性的差异是植物滞留大气颗粒物能力不同的主要原因^[10]. 叶片表面气孔、绒毛、沟槽、角质层蜡以及油脂分泌物等特殊形态均对叶片表面的粗糙度具有重要影响^[11,12],许多研究证实叶片表面颗粒物滞纳量与其粗糙度成正比^[13]. 沉积在叶表的颗粒物能够让叶表微观结构发生变化,叶片出现褶皱,表皮细胞呈卷曲状,角质层没有明显的细胞边界^[14]. 有研究表明老叶和新叶的微观结构发生了很大的变化^[15]. 由此可见,叶片微观结构会随着其自身生长(内部因素)以及环境的污染强度(外部因素)发生变化,然而关于这些内部和外部因素引起的叶片表面微观结构的变化对其颗粒物滞纳能力影响的研究仍缺乏认识,现有的粉尘模拟实验,由于实验持续时间较短,短期内颗粒物对叶片生理特性产生明显影响,但微观结构响应滞后性较明显. 因此,本研究利用自然状态下新叶和老叶研究叶片自身生长,并选择自然状态下不同污染源条件研究污染强度,进而分析叶片表面微观结构的变化及其对颗粒物滞纳能力的影响,以期深入揭示叶片颗粒物滞纳能力的驱动因素,并为提出更科学地提升移除颗粒物功能的城市森林管理措施提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

北京市(39°N, 116°E)属暖温带半湿润地区,多年平均气温为 10~12℃,多年平均降水量为 644 mm. 选择北京植物园和朝阳公园两个采样点,其中北京植物园属相对清洁区,距市中心 23 km,采样点设在道路较远处;朝阳公园属重度污染区,附近人口密度大、车流量也大,采样点设在路旁. 2017 年,北京植物园和朝阳公园空气中 PM_{2.5} 浓度分别为 58.32 μg·m⁻³和 75.43 μg·m⁻³,PM₁₀ 分别为 77.94 μg·m⁻³和 116.08 μg·m⁻³.

1.2 供试树种选择和叶片采集

北京植物园采样点选择侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和矮紫杉(*Taxus cuspidata* var.)这 3 个常绿树种的当年生叶(1 年生)和非当年生叶(≥2 年生)分别用于新叶和老叶表面颗粒物滞纳量测定和叶片微观结构的观察. 在北京植物园(相对清洁区)和朝阳公园(重度污染区)两个采样点内,选择侧柏、油松、国槐(*Sophora japonica*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)和银杏(*Ginkgo biloba*)这 5 个树种用于不同污染强度下叶片表面颗粒物滞纳量测定和叶片微观结构的观察. 供试树种基本生长状况见表 1.

表 1 供试树种基本生长状况			
Table 1 Growth of the six tree species			
采样点	树种	胸径/cm	树高/m
北京植物园监测点	侧柏	14.9±2.7	12.3±1.1
	油松	11.4±0.9	5.7±0.7
	矮紫杉	6.3±0.5	3.5±0.2
	国槐	16.2±3.6	11.2±1.0
	毛白杨	19.6±2.5	18.2±2.3
	银杏	15.2±1.9	15.9±2.7
朝阳公园监测点	侧柏	12.7±1.6	11.3±1.5
	油松	12.6±1.9	5.3±1.0
	国槐	13.5±2.1	9.7±1.1
	毛白杨	20.9±3.7	21.5±2.6
	银杏	14.3±2.3	13.7±1.8

为避免因颗粒物捕获时间长短不同而影响新叶与老叶和相对清洁区与重度污染区叶面滞尘量的可比性,于 2017 年 9 月 5~6 日进行叶片采集. 2017 年 8 月的月降水量超过 200 mm,经过 8 月降雨的洗脱为叶片滞尘量设置了相同的“零点”,保证了各采

样点的叶片捕获颗粒物时间长度的一致性. 考虑到采样高度也可能影响叶面滞尘量, 因此各树种选择 3 株样木在树冠的上、中、下部位及东、南、西、北这 4 个方向采集叶片, 要求叶片完整、无病虫害和断残, 每株树采集 100 g 左右叶片, 将采集的叶片封存于保鲜袋(无静电)中, 尽快带回实验室放入 4℃ 冰箱中保存.

1.3 单位叶片颗粒物滞纳量测定

根据风蚀的原理, 将叶片上的细颗粒吹起再悬浮, 重新混匀形成气溶胶. 为保证气流能够通过叶片, 将新鲜叶片样品均匀平铺到宽 0.5 m、高 0.5 m、长 1 m 的风洞中. 通过具有多个开口的静压室将约 10 m³ 不含颗粒物的纯净空气引入到风洞中. 在 20 m·s⁻¹ 的风速下持续 6~10 min, 保证叶片表面的所有颗粒物悬浮在风洞中^[16, 17]. 再使用便携式环境粉尘监测仪(DustMate, Turnkey, Cheshire, UK)测定风洞内颗粒物浓度. 每个树种重复 3 次测量. 利用公式(1)计算单位叶面积颗粒物的滞纳量.

$$M_i = \sum_{j=1}^n m_{ij}/S_i \quad (1)$$

式中, M_i 表示单位叶面积滞纳颗粒物的质量($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); m 表示风洞内叶片样品表面滞纳颗粒物的质量; i 表示树种; j 包含 4 种粒径颗粒物(总悬浮颗粒物(TSP)、PM₁₀、PM_{2.5}和 PM_{1.0}); n 表示 3 个重复; S_i 表示样本叶片面积(cm^2).

使用扫描仪(LIDE 110, Canon, Tokyo, Japan)扫描阔叶树种叶片, 并将图像转换为黑白图像. 然后, 使用 Adobe Photoshop (Photoshop CS2, Adobe, CA, USA) 获得黑色区域, 黑色区域表示阔叶树种叶表面积. 采集约 100 g 针叶, 用游标卡尺测量针叶尖端和底端的直径和针叶长度, 并取平均值^[18]. 假设针叶为圆锥体, 利用公式(2)计算其平均表面积:

$$A_{\text{needle}} = \frac{1}{2} \pi \cdot (D_1 + D_2) \times \left[\frac{1}{4} \cdot (D_2 - D_1)^2 + l^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, D_1 表示针叶尖端平均直径(mm); D_2 表示针叶底端平均直径(mm); l 表示针叶平均长度(mm). 用针数乘以平均针叶面积, 计算出总针面积.

1.4 叶表面特征的原子力显微镜观察

用超纯水冲洗叶片的正、背面, 用吸水纸吸去叶表面水分, 针叶切成 5 mm 的叶段, 阔叶避开叶脉将叶片切成约 5 mm×5 mm 的样本. 在室温下, 利用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM, Multimode 8, Bruker, Karlsruhe, Germany), 以非接触模式用金

涂层 Si₃N₄ 探针针对样品随机选择 3 个位置进行扫描和拍摄. 扫描速率 0.5 Hz, 横向分辨率为 0.2 nm, 垂直分辨率为 0.01 nm, 每个叶片重复扫描 3 次. 采用 NanoScope 分析软件(NanoScope Analysis 1.4, Bruker, Karlsruhe, Germany)对图片进行分析, 获取叶片表面三维结构图像及叶片粗糙度(轮廓算术平均偏差 Ra、轮廓最大高度 Rz 和均方根粗糙度 Rq)等.

1.5 叶片微观结构观察

将针叶切成 4 mm 的叶段, 阔叶从叶片两侧中部将其切成约 4 mm×4 mm 的样本, 立即用 2.5% (体积分数) 戊二醛溶液进行固定, 再分别加入 50%、70%、80%、90% 和 100% 乙醇逐级梯度脱水, 叶片经过喷金处理后, 采用扫描电子显微镜(S3400N, Hitachi, Tokyo, Japan)对叶片表面微观结构进行观察, 在 300× 视野下拍照保存.

1.6 数据处理和分析

利用 Image J 对每个树种选择 5 张 300× 视野图片进行气孔数量、气孔长度、保卫细胞长度、绒毛数量和长度等的统计和测量, 利用公式(3)计算气孔指数(stomatal index, SI)^[19].

$$SI = SD \times L_g \quad (3)$$

式中, SI 表示气孔指数(mm^{-1}); SD 表示气孔密度($\text{n}\cdot\text{mm}^{-2}$); L_g 表示保卫细胞长度(mm).

采用 Sigmastat 3.5 [Systat Software Inc. (SSI), San Jose, CA, USA] 分别进行新老叶和树种、以及污染强度和树种对叶片颗粒物滞纳量的双因素方差分析, 采用 Sigmaplot 10.0 作图.

2 结果与分析

2.1 新老叶片表面颗粒物滞纳量变化

3 种常绿树种的老叶滞纳 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 量均高于新叶(图 1), 随着叶片的生长其颗粒物滞纳量在增强, 且新叶与老叶对不同粒径颗粒物的滞纳量间均存在极显著的差异(表 2). 新叶时, TSP 和 PM₁₀ 滞纳量为侧柏最高、矮紫杉次之, 油松最低; PM_{2.5} 和 PM₁ 滞纳量为矮紫杉最高、侧柏次之, 油松最低. 老叶时, TSP 滞纳量为矮紫杉>侧柏>油松(图 1). 4 种粒径颗粒物中, 除 PM₁₀ 外, 不同树种间颗粒物滞纳量也存在着极显著的差异(表 2). 这可能与叶片本身的微结构以及粗糙度等的树种间差异以及新老叶的变化有着较大的关系.

2.2 不同污染强度区域叶片表面颗粒物滞纳量变化

5 个树种的 TSP、PM₁₀ 滞纳量为重度污染区高于相对清洁区(图 2). 而 PM_{2.5} 和 PM₁ 滞纳量则是油松、银杏和侧柏为重度污染区高于相对清洁区, 国槐和毛白杨为相对清洁区高于重度污染区(图 2). 不

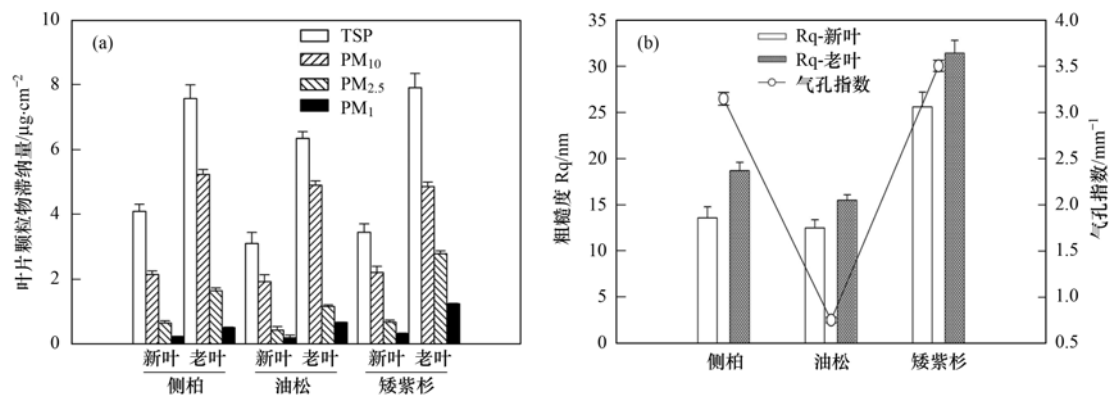


图1 新老叶片颗粒物滞纳量及其粗糙度 (Rq)

Fig. 1 Particulate matters on leaf surface and roughness (Rq) for new leaves and old leaves

表2 新老叶和树种对叶片颗粒物滞纳能力影响的
双因素方差分析¹⁾

Table 2 Two-factor analysis of variance of new and old leaves
and tree species on the particles capture capacity of leaves

颗粒物粒径	F 值及其显著性		
	新老叶	树种	交互作用
TSP	733.333 ***	23.367 ***	9.203 **
PM ₁₀	128.221 ***	0.819	0.255
PM _{2.5}	237.299 ***	40.233 ***	30.98 ***
PM ₁	131.814 ***	24.881 ***	24.272 ***

1) 星号表示各因素的影响显著性, *** 表示 $P \leq 0.001$, ** 表示 $P \leq 0.01$

同污染强度区域间叶片 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的滞纳量存在着极显著的差异,对 PM₁ 的滞纳量也存在着差异(表3)。主要是受空气中颗粒物浓度的影响,此外,在一定程度上取决于叶片蒙尘后其表面微观结构的变化程度。对于不同树种而言,相对清洁区的 TSP、PM₁₀ 滞纳量为侧柏>油松>毛白杨>银杏>国槐,PM_{2.5} 和 PM₁ 的规律则不一致。重度污染区 TSP 滞纳量侧柏>油松>毛白杨>国槐>银杏,PM₁₀ 为侧柏>油松>毛白杨>银杏>国槐(图2)。树种间的颗粒物滞纳量也存在着极显著的差异(表3)。

表3 污染强度和树种对叶片颗粒物滞纳能力影响的
双因素方差分析

Table 3 Two-factor analysis of variance of pollution intensity and tree
species on the particles capture capacity of leaves

颗粒物粒径	F 值及其显著性		
	污染强度	树种	交互作用
TSP	122.515 ***	209.663 ***	8.062 ***
PM ₁₀	46.612 ***	80.611 ***	4.399 **
PM _{2.5}	14.53 ***	52.579 ***	5.507 **
PM ₁	5.902 *	14.919 ***	7.591 ***

1) 星号表示各因素的影响显著性, *** 表示 $P \leq 0.001$, ** 表示 $P \leq 0.01$, * 表示 $P \leq 0.05$

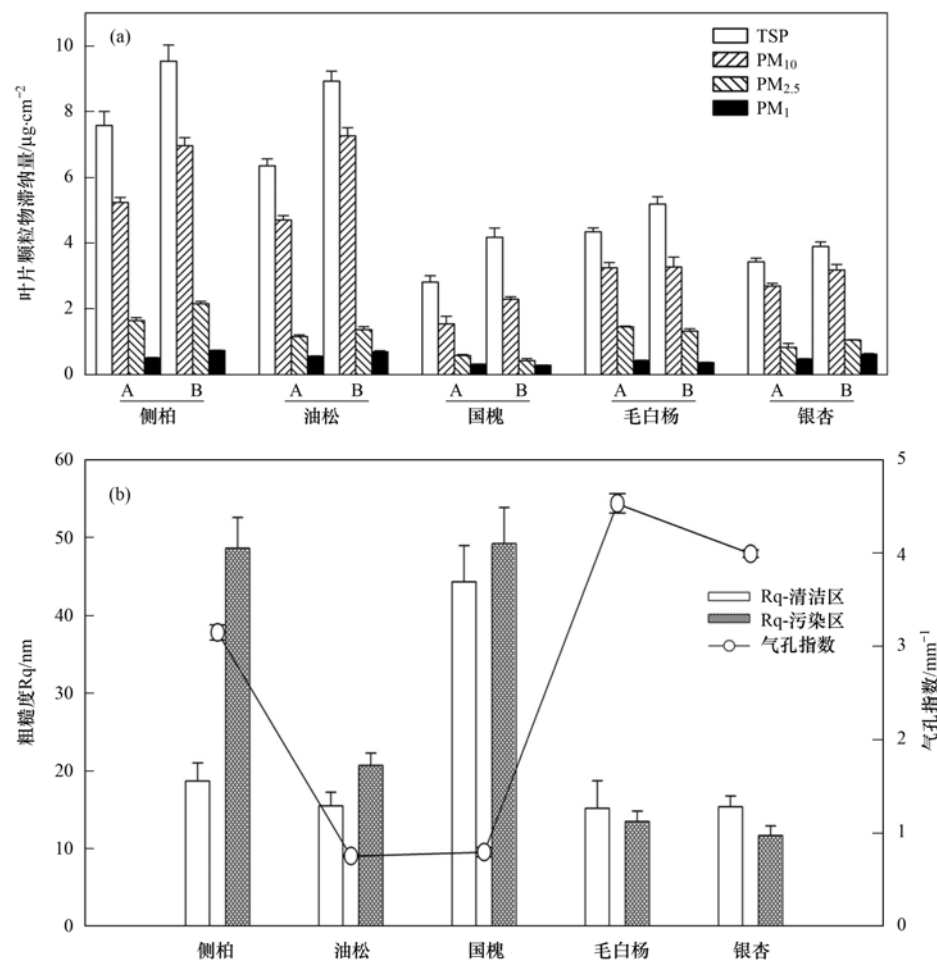
2.3 叶片表面微观结构对叶片生长和污染的响应
及其与颗粒物滞纳能力的关系

从扫描电镜图片结果可知[图3(a)~3(d)和

表4],矮紫杉新叶和老叶的正面较平滑,纹理较浅,背面则不均匀地分布着近圆形张开的气孔及密布的不规则的凸起表皮细胞,老叶和新叶的表面结构相似;新叶正面和背面分布着少量的颗粒物,而老叶表面覆盖大量的颗粒物,颗粒物分布在凸细胞间和气孔的沟槽处,尤其是正面密被颗粒物。从 AFM 二维和三维图结果看[图4(a)~4(d)、图5(a)~5(d)和表4],新叶正面和背面由较小的凸起结构组成,尤其是背面是微小的纳米粒子,而老叶叶面由高低不平的峰和谷组成,结构更复杂,新叶、老叶的正面和背面的 Rq 分别为 18.6、2.04、25.4 和 29.9 nm,随着叶龄的增加,正背面的粗糙度逐渐趋近。

侧柏和油松新叶的纹理较老叶清晰,侧柏气孔椭圆呈张开状不均匀分布,油松气孔规律分布且张开,表面颗粒物极少。两个树种的老叶纹理没有新叶清晰,沟槽处有颗粒物分布[图3(e)~3(f),图3(h)~3(i)和表4]。重度污染区明显多于相对清洁区,气孔开度较相对清洁区小,部分气孔被颗粒物阻塞。重度污染区的侧柏和油松叶片表面蜡质层由于污染更严重局部受到破坏[图3(f)~3(g),图3(i)~3(j)和表4]。从 AFM 图结果看,两个树种叶片的粗糙度 Rq 随叶龄增加增大得并不明显,但重度污染区的粗糙度明显高于相对清洁区的[图4(e)~4(j),图5(e)~5(j)和表4]。

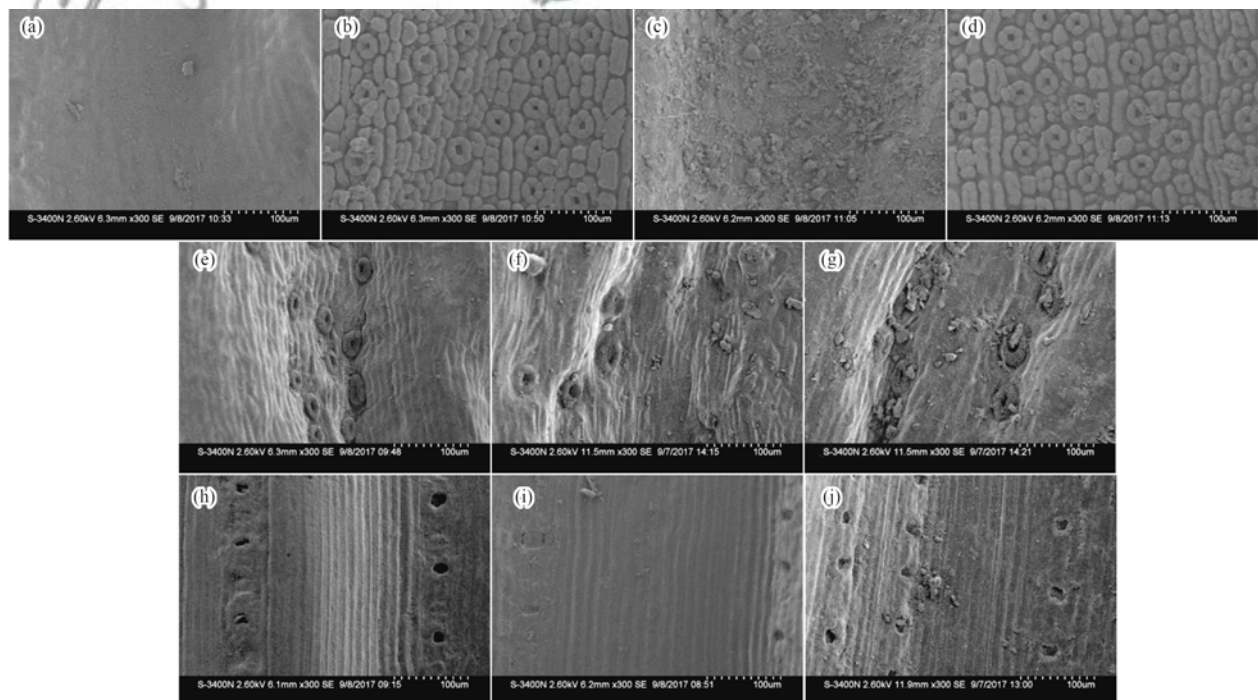
与相对清洁区相比,重度污染区国槐叶片正背面的绒毛数量变稀疏,变长,变硬,由倒伏在叶表面变为竖立的状态,叶表皮细胞的蜡质层受到严重破坏,纹理结构由凸起细胞的规律排列变为不规则排列,重度污染区叶片表面颗粒物分布更多,背面的颗粒物主要分布在叶脊以及绒毛密集的位置,气孔的开度较小[图6(a)~6(d)和表4]。AFM 图片显示,叶片正面峰谷起伏相似,测得的粗糙度 Rq 值也接近;叶片背面,重度污染区的粗糙度 Rq 值远大于相对清洁区的[图7(a)~7(d)、图8(a)~8(d)和表4]。



A 代表北京植物园监测点, B 代表朝阳公园监测点

图 2 不同污染强度区域叶片颗粒物滞纳量及其粗糙度 (Rq)

Fig. 2 Particulate matter on leaf surface and its roughness Rq for different pollution intensity areas



矮紫杉的相对清洁区: (a) 新叶-正面, (b) 新叶-背面, (c) 老叶-正面, (d) 老叶-背面; 侧柏的相对清洁区: (e) 新叶, (f) 老叶, (g) 侧柏的重度污染区; 油松的相对清洁区: (h) 新叶, (i) 老叶, (j) 油松的重度污染区

图 3 常绿树种叶片的扫描电镜拍摄图片

Fig. 3 Scanning electron micrographs of leaf surfaces for evergreen tree species

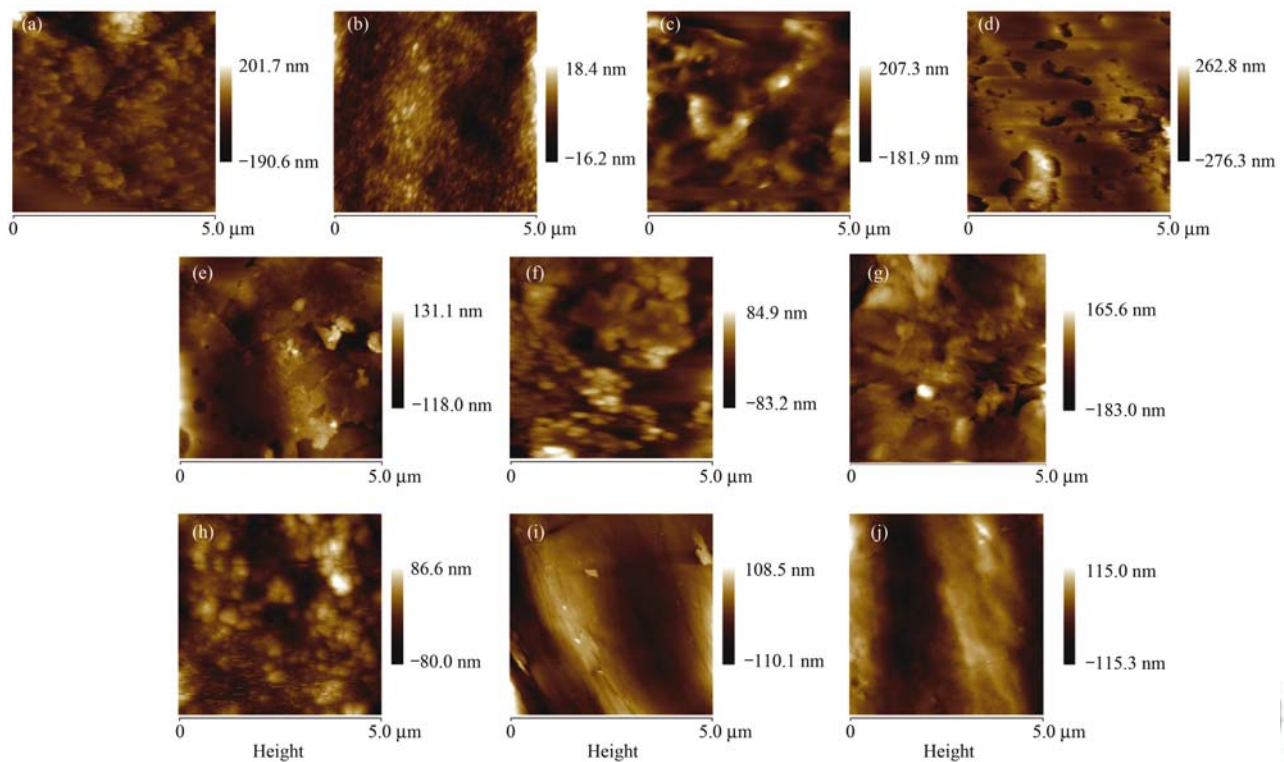
表 4 叶片微观结构特征与粗糙度¹⁾

Table 4 Characteristics of leaf surface microstructure and their roughness

采样点	树种	新老叶	叶片表面	轮廓算术平均偏差 (Ra)/nm	轮廓最大高度 (Rz)/nm	面积比	均方根粗糙度 (Rq)/nm	气孔密度(300×) /个	
北京植物园	侧柏	新叶	正背	10.9	114	1.02	13.6	8±2	
	油松			10.2	22.7	1.04	12.5	10±4	
	矮紫杉			18.6	98.7	1.09	25.6		
				2.04	4.46	1.00	2.53	21±4	
	侧柏	老叶	正背	14.6	45	1.04	18.7	13±2	
	油松			12.8	20.8	1.02	15.5	5±2	
	矮紫杉			25.4	297	1.08	31.4		
				29.9	290	1.26	42.6	19±3	
	国槐	正背	32.5	244	1.40	44.3			
		13	83.4	1.05	18.3	13±4			
	毛白杨	正背	11.5	28	1.04	15.2			
		17.5	35.6	1.05	22.1	38±3			
	银杏	正背	11.9	32.7	1.05	15.4			
		20.3	74.7	1.06	26.7	13±2			
朝阳公园	侧柏		正背	37.1	69.2	1.09	48.6	5±2	
	油松			15.3	25.1	1.03	17.9	7±3	
	国槐			35.5	159	1.33	49.2		
				104	793	1.70	127	14±2	
	毛白杨	正背	10.7	41.4	1.05	13.5			
		42.4	259	1.23	55.4	42±3			
	银杏	正背	9.26	55.6	1.03	11.7			
		23.9	72.8	1.13	31.1	9±3			
采样点	树种	新老叶	叶片表面	气孔指数 /mm ⁻¹	气孔长度 /μm	气孔宽度 /μm	保卫细胞长度 /μm	绒毛长度 /μm	绒毛数量 (300×)/个
北京植物园	侧柏	新叶	正背	1.94	12.13±0.78	4.5±0.38	33.2±0.86		
	油松			0.77	21.36±0.82	14.4±1.24			
	矮紫杉			4.82	10.39±0.41	6.39±0.41	30.92±0.40		
	侧柏	老叶	正背	3.15	10.06±0.46	4.59±0.16	33.84±0.63		
	油松			0.75	20.7±1.28	14.33±1.24			
	矮紫杉			3.50	11.28±0.47	7.12±0.39	31.15±0.56		
	国槐	正背	0.80	6.5±0.49	1.6±0.19	8.67±0.62	121.85±8.67	9±2	
	毛白杨	正背	4.53	10±0.63	2.25±0.25	16.33±0.29			
	银杏	正背	3.99	21.94±0.59	13.16±0.41	43.68±0.79			
	朝阳公园	侧柏		正背	1.41	21.63±1.28	7.33±0.83	41.12±1.18	
油松		0.63			24.38±1.09	14.98±0.81			
国槐		0.57			9.3±0.35	3.2±0.2	10.9±0.37	192.1±18.42	4±1
毛白杨		4.08			9.65±0.89	1.63±0.16	16±0.69		
银杏		2.57			26.63±0.84	16.75±0.89	43.33±0.91		

1) 气孔密度和绒毛数量的单位表示扫描电镜 300 倍视野下气孔(或绒毛)的数量

相对清洁区和重度污染区的毛白杨叶片正面较光滑,纹理较浅,均覆盖着较多的颗粒物,背面气孔分布较密,气孔保卫细胞边缘不规则较粗糙,颗粒物主要分布在气孔的周围与叶脊的周围.两种污染强度区域叶片的正面蜡质层均受到一定程度的破坏,相对清洁区破坏的程度比重度污染区严重.重度污染区叶片背面蜡质层遭受破坏严重,而相对清洁区保存比较完整[图 6(e)~6(h)和表 4].两种污染强度下叶正面的粗糙度接近,叶背面重度污染区的叶面高低起伏更大,



图例中颜色愈深粗糙度 R_q 值越大;图片编号的说明同图3

图4 常绿树种叶片表面 AFM 二维图像

Fig. 4 Two-dimensional AFM images of leaf surfaces for evergreen tree species

粗糙度更大[图7(e)~7(h)、图8(e)~8(h)和表4].

银杏叶片正面有明显的纹理结构,沟槽结构明显,沟槽内均附着颗粒物,重度污染区的蜡质层有所损坏.银杏叶片背面相对清洁区的气孔保卫细胞和叶片表面均由有规律的凸起细胞组成,而重度污染区的背面气孔保卫细胞的凸起细胞较退化,叶片表面的凸起细胞也变为不规则的沟谷结构,背面附着的颗粒物均较叶片正面明显减少.银杏叶的正背面附着颗粒物重度污染区比相对清洁区多[图6(i)~6(l)和表4].银杏叶的正背面重度污染区粗糙度与相对清洁区相近[图7(i)~7(l)、图8(i)~8(l)和表4].

3 讨论

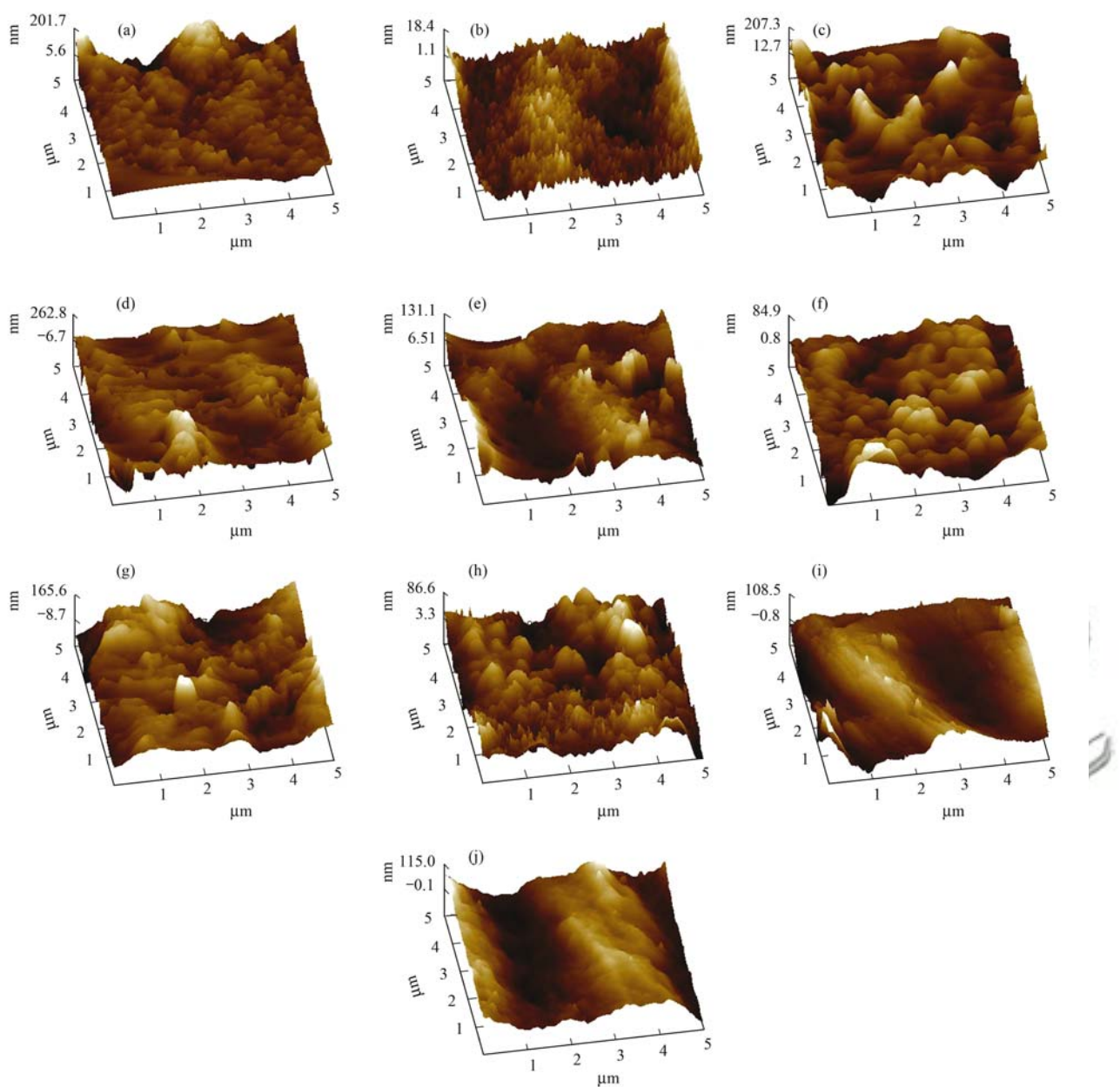
3.1 叶片表面颗粒物滞纳量的动态变化

树木叶片滞纳颗粒物能力与叶龄相关,有研究发现2年生的挪威云杉(*Picea abies*)叶片滞纳颗粒物能力高于1年生叶片^[20],石松也具有相似的变化规律^[21].与4月相比,10月国槐叶片正面沉积了更多的颗粒物^[15].本文同样得到侧柏、油松和矮紫杉叶片的TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_1 滞纳能力均随着叶龄在增强.

叶片表面滞纳 $PM_{2.5}$ 量与空气污染水平呈正相

关^[13].空气颗粒物浓度高时,4~5d后女贞(*Ligustrum lucidum*)和珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)叶片颗粒物滞纳就能达到饱和^[22].车流量和树木与道路的距离对女贞叶片 $PM_{2.5}$ 的滞留量有显著影响,叶片 $PM_{2.5}$ 滞纳量与车流量之间存在显著的正相关关系^[23].本研究中得到重度污染区5种树种(侧柏、油松、国槐、毛白杨和银杏)的叶片TSP和 PM_{10} 滞纳量均高于相对清洁区,重度污染区侧柏、油松和银杏的叶片 $PM_{2.5}$ 和 PM_1 滞纳量明显高于相对清洁区.这可能是由于不同粒径颗粒滞纳能力的差异,除了受到空气中颗粒物浓度的影响外,还取决于叶片微观结构变化对空气污染强度的响应.

关于常绿和落叶树种在叶片滞纳颗粒物能力方面差异的研究,Freer-Smith等^[12]和Moreno等^[24]得到常绿树种叶片滞纳颗粒物量高于落叶树种的叶片,常绿树种由于针叶常绿因此比落叶树种对颗粒物的去除贡献更大,这种差异在冬季尤为明显.雪松1年生针叶对颗粒物的滞纳能力并不比落叶树种国槐和二球悬铃木强^[15].本研究中发现相对清洁区成熟的毛白杨叶片颗粒物滞纳量高于矮紫杉和油松1年生针叶,成熟的银杏叶片高于油松1年生针叶.因此,在评价常绿针叶滞纳颗粒物能力时,叶龄的影响不容忽视.



图片编号的说明同图 3

图 5 常绿树种叶片表面 AFM 三维图像

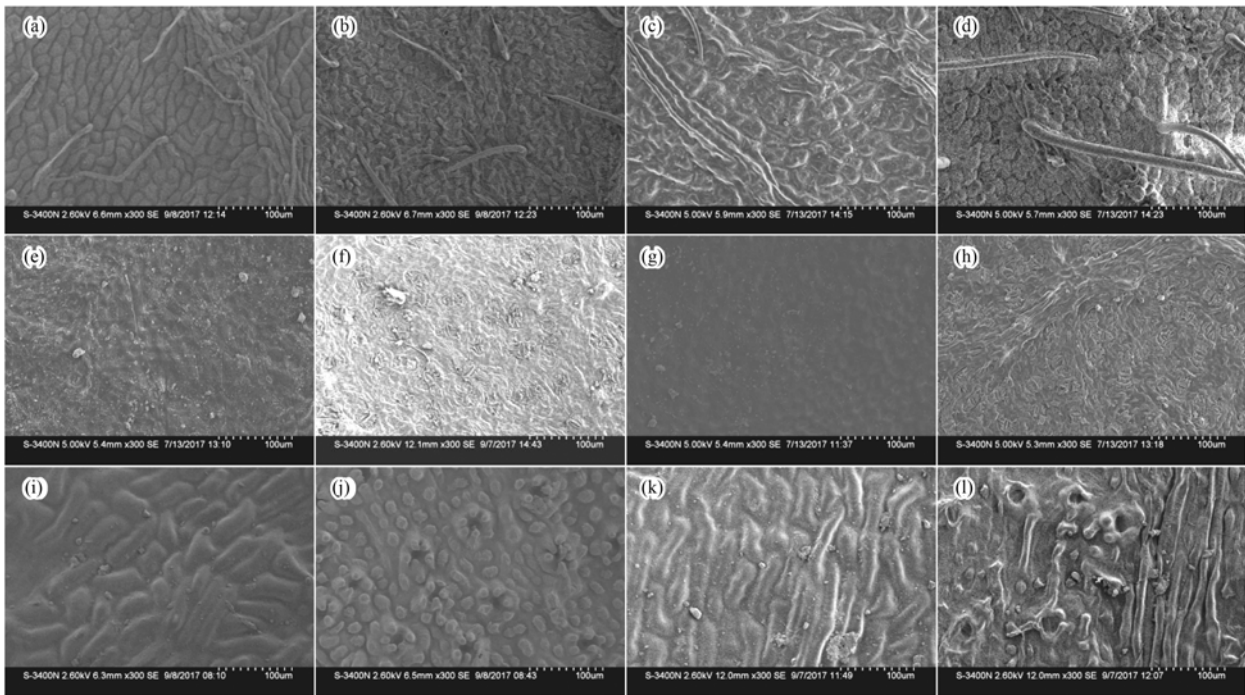
Fig. 5 Three-dimensional AFM images of leaf surfaces for evergreen tree species

3.2 叶片微观结构变化对颗粒物滞纳能力的影响

叶片表面微观结构特征和粗糙度的差异是其颗粒物滞纳能力的重要决定因素^[13]. 叶片表面的粗糙度是由形态学参数决定的,如角质层的纹理、表皮细胞边界的隆起、气孔、绒毛以及表皮和角质层蜡等^[25,26]. 随着叶龄的增加,侧柏、油松和矮紫杉针叶的 R_q 值增加. 叶片扫描图像中叶表颗粒物的数量和叶片上细颗粒物滞纳量均呈现增加的趋势. 叶片接触角随叶龄的增大而减小^[15],而其滞纳颗粒物的能力随叶片接触角的减小而增大. 润湿性的增加可能是由于表皮蜡质层的机械磨损和化学破坏造成的,是导致叶片颗粒物滞纳能力变化的主要因素^[15].

3 个针叶树种中,与新叶相比,矮紫杉的老叶颗粒物滞纳量增加最明显,表明其叶片滞纳颗粒物能力比侧柏和油松更强. 叶片表面滞纳的一些粒径大的颗粒物在降雨和大风等外力的作用下很容易被洗脱掉,矮紫杉的叶片表面 R_q 和气孔指数较大有助于颗粒物的稳定附着避免被外力移除,并且其老叶正面的蜡质层与新叶相比破坏严重,由于叶蜡层的损坏湿润性增加而使得老叶正面的颗粒物滞纳量增加明显,并且随着叶龄的增加,叶片背面的粗糙度增加明显,正背面的粗糙度逐渐趋近,也增加了颗粒物的滞纳能力.

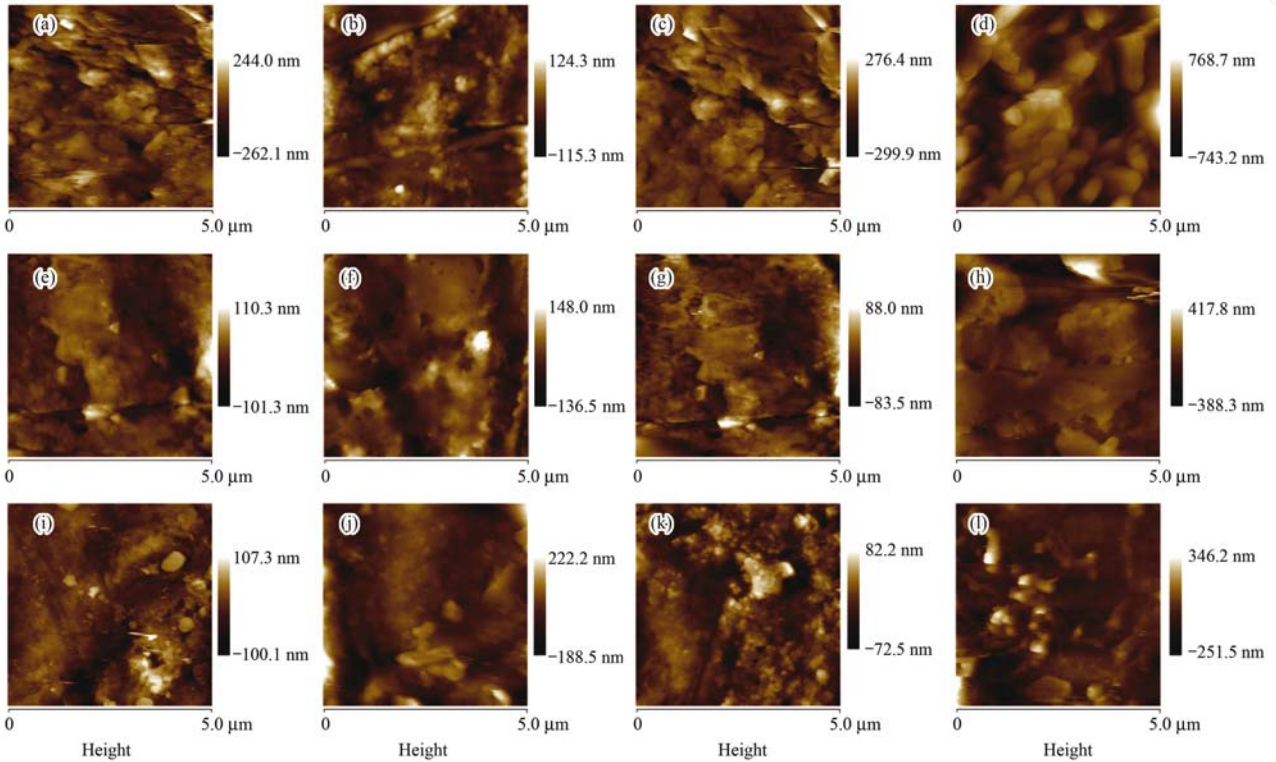
叶片表面微观结构变化除了与自身生长有关外,由于老叶蒙尘时间比新叶长,因此污染物对叶片



国槐的相对清洁区:(a) 正面,(b) 背面;国槐的重度污染区:(c) 正面,(d) 背面;毛白杨的相对清洁区:(e) 正面,(f) 背面;毛白杨的重度污染区:(g) 正面,(h) 背面;银杏的相对清洁区:(i) 正面,(j) 背面;银杏的重度污染区:(k) 正面,(l) 背面,下同

图 6 落叶树种叶片的扫描电镜拍摄图片

Fig. 6 Scanning electron micrographs of leaf surfaces for deciduous tree species



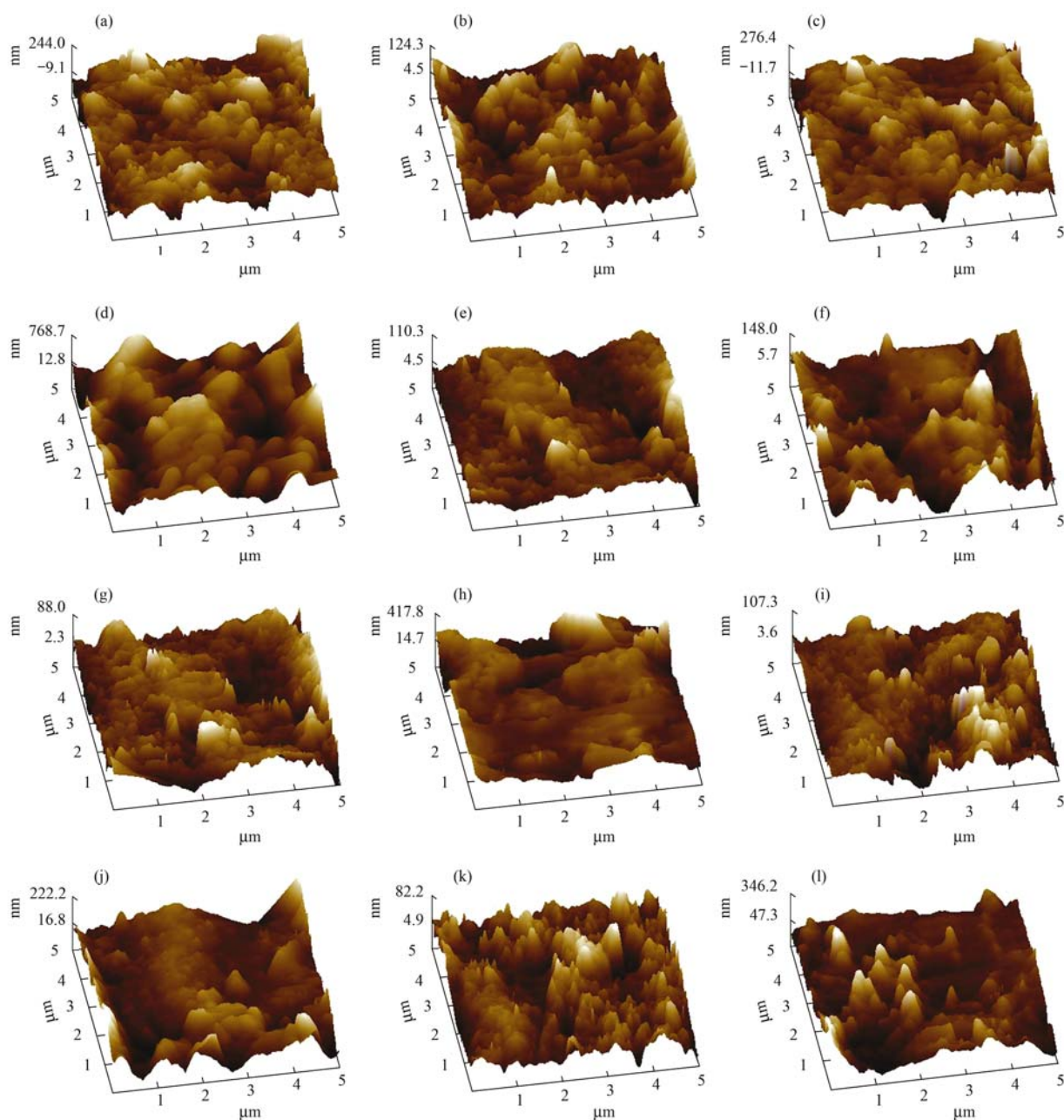
图例中颜色愈深粗糙度 Rq 值越大; 图片编号的说明同图 6

图 7 落叶树种叶片表面 AFM 二维图像

Fig. 7 Two-dimensional AFM images of leaf surfaces for deciduous tree species

的影响也不容忽视. 环境污染会改变叶片表面结构及特征, 从而改变其滞尘能力. 与相对清洁区相比, 重度污染区叶片的气孔指数降低^[27], 气孔堵塞, 蜡

质层退化^[14], 表面布满颗粒物^[28]. 国槐和银杏叶片表面纹理变得不规则, 细胞边界也变得更加不规则^[25, 28]. 国槐叶表面绒毛变稀疏^[14, 28]、变长^[25, 28]和



图片编号的说明同图 6

图 8 落叶树种叶片表面 AFM 三维图像

Fig. 8 Three-dimensional AFM images of leaf surfaces for deciduous tree species

变硬,这与张维康等^[28]关于绒毛变软结果存在差异,在未来的研究中通过更多的采样来进一步揭示其变化差异的原因.得到的研究结果与 Rai 等^[14]的颗粒物喷洒实验结果一致,其还发现颗粒物处理的幼苗叶片表现为表皮细胞和气孔均变小. Pal 等^[25]的研究发现污染环境中的叶片外表皮细胞收缩,气孔频度双倍增加.无论颗粒物喷洒实验,还是暴露于污染环境中的叶片研究结果都证实了污染物对叶片结构存在较大的影响.粗糙度 R_q 总体上都是重度污染区高于相对清洁区,且叶片背面的粗糙度增加较正面明显,主要是由于气孔主要分布在背面,尤其是国槐和毛白杨的叶片背面,重度污染区的叶片气

孔从数量、形态、大小以及开度上与相对清洁区相比都发生了较大的变化.叶片湿润性越强,表皮叶蜡层对环境污染的脆弱性就越高^[29],尤其是正面叶蜡层的机械损伤和化学腐蚀作用要比背面更明显^[30].

与相对清洁区的叶片 TSP 和 PM_{10} 滞纳量相比,重度污染区的每个树种均更高,叶片微观结构在颗粒物浓度高的重度污染区发生了上述分析的变化,是其叶片粗糙度 R_q 在一定程度上增加的主要原因,粗糙度的增加使叶表颗粒物滞纳量增加.但 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 细颗粒物的滞纳量与叶片粗糙度的关系较复杂,主要由于小颗粒物的滞纳更大程度上取决于气孔密度、开度、沟槽宽度、绒毛、表皮细胞轮廓

和叶蜡层等附着条件,此外,另一个重要的原因是细颗粒物通常可以由排放源远距离传输。

相对清洁区 TSP 和 PM_{10} 滞纳量为侧柏 > 油松 > 毛白杨 > 银杏 > 国槐,重度污染区 TSP 滞纳量为侧柏 > 油松 > 毛白杨 > 国槐 > 银杏, PM_{10} 滞纳量则为侧柏 > 油松 > 毛白杨 > 银杏 > 国槐。主要原因是重度污染区国槐叶片的粗糙度 R_q 远高于相对清洁区,重度污染区与相对清洁区银杏叶片的粗糙度变化不大,但从叶片扫描图像可以看出银杏叶片正表皮细胞轮廓变得不清晰,背面气孔保卫细胞变得不规则并且表皮凸细胞也发生退化。重度污染区与相对清洁区毛白杨的叶片粗糙度变化也不大,但是毛白杨不规则的气孔保卫细胞,以及叶脊更有利于颗粒物的滞纳,因此污染更严重的重度污染区由于颗粒物浓度大,叶表面滞纳的颗粒物量更多。而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 各树种的滞纳量的规律不一致,这与张维康等^[28]的研究结果相似,主要是由于细颗粒物的附着条件影响因素更多更复杂。因此,还需要进一步的研究揭示叶片如何滞纳细颗粒,以及哪些因素在这个过程中起着重要的作用。

4 结论

叶片颗粒物滞纳能力与其粗糙度成正相关关系,由生长(内部因素)以及环境污染强度(外部因素)引起的叶片微观结构变化会改变其粗糙度,直接影响着叶片的颗粒物滞纳能力。侧柏、油松和矮紫杉老叶的粗糙度 R_q 值增加是导致叶片颗粒物滞纳能力增强的主要原因。毛白杨成熟叶颗粒物滞纳量高于矮紫杉和油松新叶,银杏成熟叶高于油松新叶,在比较常绿和落叶树种滞纳颗粒物能力时,常绿针叶新老叶的影响不容忽视。重度污染区叶片的气孔指数降低,蜡质层退化,表面纹理和细胞边界更加不规则,绒毛变长,变硬,叶片表面微观结构的这些变化使得重度污染区粗糙度 R_q 值高于相对清洁区,且叶片背面增加较正面明显,从而也使得叶片颗粒物滞纳能力在重度污染区明显增强。蒙尘后,叶片生长及生理特性受到严重影响前,其表面微观结构的形态适应性变化在一定程度上能够增强其滞纳颗粒物能力。

参考文献:

- [1] Shi P J, Bai X M, Kong F, *et al.* Urbanization and air quality as major drivers of altered spatiotemporal patterns of heavy rainfall in China[J]. *Landscape Ecology*, 2017, **32**(8): 1723-1738.
- [2] Wan J M, Lin M, Chan C Y, *et al.* Change of air quality and its impact on atmospheric visibility in central-western Pearl River Delta[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **172**(1-4): 339-351.
- [3] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [4] 北京市统计局. 北京统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [5] 北京市生态环境局. 最新科研成果新一轮北京市 $PM_{2.5}$ 来源解析正式发布[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzn/jgsz/jjgjszjzz/xcyjxc/wfbb/832588/index.html>, 2018-05-14.
- [6] Yan S J, Cao H, Chen Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of air quality and air pollutants in 2013 in Beijing[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(14): 13996-14007.
- [7] Hu Z Z, Tang X G, Zheng C, *et al.* Spatial and temporal analyses of air pollutants and meteorological driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(14): 540.
- [8] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, *et al.* Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM_{10} in two UK conurbations[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(38): 8455-8467.
- [9] Conway T M, Almas A D, Coore D. Ecosystem services, ecological integrity, and native species planting: How to balance these ideas in urban forest management? [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, **41**: 1-5.
- [10] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, *et al.* Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, **103**(2): 129-138.
- [11] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability[J]. *New Phytologist*, 1998, **138**(1): 91-98.
- [12] Freer-Smith P H, El-Khatib A A, Taylor G. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **155**(1-4): 173-187.
- [13] Lu S W, Yang X B, Li S N, *et al.* Effects of plant leaf surface and different pollution levels on $PM_{2.5}$ adsorption capacity[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, **34**: 64-70.
- [14] Rai A, Kulshreshtha K, Srivastava P K, *et al.* Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants[J]. *The Environmentalist*, 2010, **30**(1): 18-23.
- [15] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化[J]. *生态学报*, 2015, **35**(6): 1696-1705.
Wang H X, Shi H, Wang Y H. Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(6): 1696-1705.
- [16] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 叶片表面粗糙度对颗粒物滞纳能力及洗脱特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(4): 110-115.
- [17] Fang Y Y, Wang B, Niu X. Effects of surface roughness on leaf particulate matter capturing capability and rain wash-off characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(4): 110-115.
- [18] Zhang W K, Wang B, Niu X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing[J]. *Forests*, 2017, **8**(3): 92.
- [19] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of

- submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6987-6994.
- [19] Brewer C A, Nuñez C I. Patterns of leaf wettability along an extreme moisture gradient in Western Patagonia, Argentina[J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2007, **168**(5): 555-562.
- [20] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, *et al.* Particle capture efficiency of different-aged needles of Norway spruce under moderate and severe drought[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, **44**(7): 831-835.
- [21] Terzaghi E, Wild E, Zacchello G, *et al.* Forest Filter Effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 378-384.
- [22] Wang H X, Shi H, Li Y Y, *et al.* Seasonal variations in leaf capturing of particulate matter, surface wettability and micromorphology in urban tree species [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(4): 579-588.
- [23] 王会霞, 石辉, 王彦辉, 等. 城市绿化树种女贞对 PM_{2.5} 的滞留能力[J]. *生态科学*, 2014, **33**(4): 749-753.
Wang H X, Shi H, Wang Y H, *et al.* PM_{2.5} removal by plant leaves: taking *Ligustrum lucidum* as an example[J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(4): 749-753.
- [24] Moreno E, Sagnotti L, Dinarès-Turell J, *et al.* Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2967-2977.
- [25] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K, J, *et al.* Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? [J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2002, **197**(1): 47-55.
- [26] Nairn J J, Forster W A, Van Leeuwen R M. Quantification of physical (roughness) and chemical (dielectric constant) leaf surface properties relevant to wettability and adhesion[J]. *Pest Management Science*, 2011, **67**(12): 1562-1570.
- [27] Pourkhabbaz A, Rastin N, Olbrich A, *et al.* Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees, *Platanus orientalis* L. [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **85**(3): 251-255.
- [28] 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.
Zhang W K, Wang B, Niu X. Adsorption capacity of the air particulate matter in urban landscape plants in different polluted regions of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2381-2388.
- [29] Haines B L, Jernstedt J A, Neufeld H S. Direct foliar effects of simulated acid rain II. Leaf surface characteristics [J]. *New Phytologist*, 1985, **99**(3): 407-416.
- [30] Burkhardt J, Peters K, Crossley A. The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1995, **46**(288): 823-831.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)