

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力

张维康¹, 王兵^{1,2}, 牛香^{2*}

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林科院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要: 城市园林植物作为城市生态系统的重要组成部分, 在滞纳空气颗粒物, 净化城市大气环境发挥着重要作用。本文以北京市 6 种常见园林植物为研究对象, 利用气溶胶再发生器 (QRJZFSQ-I) 测定了不同污染地区叶片对大气颗粒物的滞纳能力, 同时利用环境扫描电镜观察了测试树种叶片结构变化。结果表明: ①在所测的树种中, 针叶树种单位叶面积滞纳空气颗粒物的能力比阔叶树种高, 其中油松 (*Pinus tabulaeformis*) 滞纳量最高, 为 $(3.89 \pm 0.026) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其次是白皮松 (*Pinus bungeana*), 为 $(2.82 \pm 0.392) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 毛白杨 (*Populus tomentosa*) 最小, 为 $(2.00 \pm 0.118) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; ②通过观察叶片微观形态结构发现, 针叶树种气孔排列紧密, 气孔密度比阔叶树种大, 表面粗糙度高于阔叶树种, 而且能够分泌油脂; ③在不同污染区, 相同树种叶片滞纳 PM_{10} 存在显著差异, 五环周围的树种叶片单位叶面积滞纳 PM_{10} 能力要高于植物园的, 而相同树种叶片单位叶面积滞纳 $\text{PM}_{2.5}$ 则无明显差异; ④在不同污染区下, 叶片结构发生了重要的适应性变化, 相对于轻污染区, 在重污染区植物叶片外表皮细胞收缩, 叶片表皮纹理变得更加粗糙, 气孔频度和绒毛长度增加。尽管暴露于重污染区植物叶片发生重要变化, 但是这些植物仍然能够正常健康地生长。

关键词: 植物园; 五环路; 园林植物; 颗粒物; 滞纳能力; 叶片结构

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2381-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.07.008

Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing

ZHANG Wei-kang¹, WANG Bing^{1,2}, NIU Xiang^{2*}

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Urban landscape plants, as one of the important factors of the urban ecosystem, play an important role in stagnating airborne particulates and purifying urban atmospheric environment. In this article, six kinds of common garden plants were studied, and aerosol generator (QRJZFSQ-I) was used to measure the ability of their leaves to stagnate atmospheric particulates (TSP and $\text{PM}_{2.5}$) in different polluted regions. Meanwhile, environmental scanning electron microscope was used to observe changes in the leaf structure of the tested tree species. The results showed: ①Among the tested tree species, the ability of coniferous species to stagnate atmospheric particulates was higher than that of broad-leaved species per unit leaf area. *Pinus tabulaeformis* stagnated the highest volume of $(3.89 \pm 0.026) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, followed by *Pinus bungeana* of $(2.82 \pm 0.392) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, and *Populus tomentosa* stagnated the minimum of $(2.00 \pm 0.118) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; ②Through observing the leaf microstructure morphology, coniferous species were found to have tightly packed stomas, stoma density and surface roughness higher than those of broad-leaved species, and they could also secrete oil; ③In different polluted regions, the leaves of the same tree species showed significant difference in stagnating TSP. Per unit leaf area, the tree species leaves situated around the 5th Ring Road had higher ability to absorb TSP than the tree species leaves at Botanical Garden, while their abilities to absorb $\text{PM}_{2.5}$ showed no significant difference; ④In different polluted regions, significantly adaptive changes were found in leaf structure. Comparing to the region with light pollution, the outer epidermal cells of the plant leaves in region with heavy pollution shrank, and the roughness of the leaf skin textures as well as the stomatal frequency and villous length increased. In spite of the significant changes in plant leaves exposed to the heavy pollution, these plants could still maintain normal and healthy growth.

Key words: botanical garden; the 5th Ring Road; landscape plants; particulate matter; adsorption capacity; the leaf microstructure morphology

目前,随着城市化和工业化的快速发展,城市环境污染已经成为公共关注的环境问题,最近十几年国内外许多学者对城市环境污染问题进行了相关研究^[1-5]。城市环境污染是一种十分广泛污染类型,包括弥漫在空气中的烟尘和气溶胶,其中空气颗粒物污染是城市环境污染的一个主要类型,它可以直接或间接地危害着人体健康,特别是 PM_{10} 和

$\text{PM}_{2.5}$ 对人体的影响。1993 年 Dockery 等^[6]首次提出了 PM_{10} ($D_p < 10 \mu\text{m}$) 能对人体健康产生严重危害,随着研究的深入,人们逐渐开始关注颗粒物

收稿日期: 2014-11-22; 修订日期: 2015-01-04

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (20130430101)

作者简介: 张维康 (1986 ~), 男, 博士, 主要研究方向为森林生态学,
E-mail: zhwk1986@bjfu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

[$\text{PM}_{2.5}$ ($D_p < 2.5 \mu\text{m}$) 和 PM_{10}] 对人体健康的危害, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 亦称为可吸入颗粒物, 它们可以通过呼吸系统进入肺泡中, 引起呼吸道疾病, 又因为 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 表面积大, 吸附大量有毒有害物质, 进而引起心脏病、免疫系统等疾病^[7,8]. 城市中颗粒物的来源复杂多变, 其中最重要的来源是道路机动车辆尾气排放、化石燃料燃烧、建筑粉尘^[9]. 如何有效地控制和降低城市大气颗粒物污染, 是一个亟待解决的问题. 北京作为我国的首都, 随着城市化进程的不断加快, 能源与交通规模逐渐扩大, 城市人口迅速膨胀, 大气污染已经日益成为地区性问题; 污染性质也逐渐向复合型污染转变, 多种不利条件形成的北京市复合型大气环境污染亟待深入研究, 因此迫切需要对北京地区大气污染带来的新问题进行全面、深入和综合性的研究, 寻求从根本上解决北京地区的大气污染问题. 利用植物对大气颗粒物的滞留吸附作用是降低大气颗粒物污染的一种有效手段, 已被国内外学者所证实^[10-15]. 特别是针叶树种比起阔叶树种能够有效地移除空气中的颗粒物^[16]. 植物移除空气中的颗粒物能力主要依靠其叶片功能和叶片结构, 如叶表面纹理、绒毛、油脂以及湿润性等特征利于大气颗粒物的附着, 而复杂的枝茎结构支持的巨大叶面积使其能够滞留大量的大气颗粒物. 但是各种植物由于叶表面特征、树冠结构枝叶密度和叶面倾角的不同, 对大气颗粒物的滞纳能力存在着很大的差异^[9]. 因此利用植物叶片分析不同污染地区植物滞纳空气颗粒物能力的差异, 是一种很好的手段.

城市森林生态系统是城市生态系统的重要组成部分, 城市森林通过增加地表粗糙度, 降低风速和枝叶茎的吸附作用, 在净化大气、吸收污染物、滞纳空气颗粒物等方面起着重要的作用^[17]. 不同的树种对空气颗粒物的滞纳能力不同, 主要由于树种树冠形状、叶表面的特征, 包括蜡质、表皮、气孔和绒毛的不同所致. 迄今为止, 国内外学者在城市绿化树种滞纳大气颗粒物能力和提高环境质量等方面做了一些开拓性研究, 如 Freer-Smith 等^[18] 对英国 5 种针阔叶树种滞纳粗细颗粒物能力进行了研究, 结果表明: 油松滞纳粗细颗粒物有最强的能力, 治疳花楸 (*Sorbus aria*) 次之, 三角叶杨 (*Populus deltoides*) 最小. 同时还有学者从叶片结构形态角度阐释了不同树种滞纳颗粒物的机制研究, 如 Pal 等^[19] 研究了印度 8 种植物在不同污染程度下叶片微观形态结构的变化, 结果表明在重污染下叶片蜡质层厚度、绒毛

长短和气孔密度发生了重要变化, 这种变化使其更能适应重污染环境. 但是在不同污染地区下, 不同树种之间滞纳颗粒物能力的比较以及对同种树种叶片形态结构造成的影响, 这一方面研究的较少.

本文对北京市 6 种主要园林树种在不同污染地区叶片单位面积滞留空气颗粒物能力及机制进行了研究, 主要的研究目的是: ①在不同污染地区下, 定量地确定不同树种滞纳不同粒径颗粒物能力的差异; ②从叶片结构分析了不同树种滞纳颗粒物能力差异的原因; ③不同污染区对树种叶片结构和生长造成的影响.

1 材料与方法

1.1 研究地点

本次供试树种来自于北京植物园和北京五环路. 北京植物园位于北京西山脚下五环路外, 全园总规划面积 400 hm^2 , 园内植物有 150 万余株, 是集植物资源展示和保护、科研、科普、游憩和开发为一体的综合性植物园. 主要树种类型包括油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla*)、毛白杨 (*Populus tomentosa*)、旱柳 (*Salix matsudana*) 等, 植被覆盖率达到 80% 以上. 园内植物生长过程受人类散步、休憩影响较多而受汽车尾气、工厂等人类生产活动影响较少. 另一供试树种的选择来源于北京市北五环高速公路旁边的绿化树种, 该地点树种生长受汽车尾气、工厂等人类生产活动的影响较大, 不同地点 6 ~ 8 月受污染情况如表 1 所示, 植物园受污染程度要低于五环路, 因此本研究选定植物园为低污染区, 五环路为重污染区.

1.2 供试材料

2014 年 6 ~ 8 月, 每个月选择一无风晴朗天 (10 d 左右没有降雨) 同时在北京植物园和北五环路边上采摘 6 种植物的叶片, 6 种植物分别如下:

油松 (*Pinus tabulaeformis*), 由于其常绿、高叶表面积和叶子的排列顺序, 成为治理环境污染的有效树种. 因此, 在本研究中选择两种针叶树. 其中油松已被研究证明在滞纳空气颗粒物上有较强的能力, 同时油松也是北方城市常见园林植物.

白皮松 (*Pinus bungeana*), 另一种针叶树种, 是中国特有树种之一, 由于耐贫瘠干旱条件, 分布范围广, 适应能力强, 同时树形多姿, 别具特色, 早已成为

表 1 植物园和五环路 6~8 月 PM _{2.5} 浓度状况 ¹⁾								
Table 1 PM _{2.5} concentrations situation of Botanical Garden and the 5 th Ring Road from June to August								
PM _{2.5} 物浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	植物园				五环			
	6 月	7 月	8 月	总计	6 月	7 月	8 月	总计
< 50	18 d	12 d	19 d	49 d	15 d	10 d	17 d	42 d
50 ~ 100	8 d	10 d	8 d	26 d	10 d	12 d	8 d	30 d
100 ~ 150	4 d	3 d	3 d	10 d	5 d	3 d	4 d	12 d
> 150		6 d	1 d	7 d		6 d	2 d	8 d

1) 数据来源于北京植物园空气质量监测站和国家环境保护部

华北地区和庭园绿化的优良树种.

毛白杨(*Populus tomentosa*), 高大乔木, 是北方最常见的树种. 由于生长速度快, 适应能力强, 种植普遍, 能够改造城市生态系统, 大大改善城市局部空气质量.

银杏(*Ginkgo biloba*), 裸子植物中型宽叶落叶乔木, 中国特有树种, 也是北京街道绿化主要树种. 银杏叶片呈扇形, 光滑无绒毛, 吸附颗粒物能力较差.

元宝枫(*Acer truncatum*), 一种中型树种, 树冠浓密, 结构复杂, 对滞纳空气颗粒物就有较强能力.

表 2 6 种园林植物生长状况及叶片采集量						
Table 2 Growth of the six plant species and number of the collected leaves						
树种	植物园			五环路		
	树高/m	胸径/cm	叶片数量/g	树高/m	胸径/cm	叶片数量/g
油松	5. 50 ± 1. 00	10. 15 ± 0. 23	100	4. 00 ± 0. 50	9. 52 ± 0. 34	100
白皮松	5. 00 ± 1. 50	10. 22 ± 0. 42	100	4. 50 ± 1. 50	8. 23 ± 0. 42	100
杨树	15. 00 ± 2. 00	15. 5 ± 0. 15	200	13. 00 ± 1. 50	14. 35 ± 0. 25	200
银杏	12. 50 ± 1. 50	12. 34 ± 0. 22	150	10. 50 ± 0. 50	10. 50 ± 0. 22	150
元宝枫	6. 50 ± 0. 50	10. 67 ± 0. 13	150	5. 50 ± 0. 50	9. 35 ± 0. 13	150
柳树	12. 50 ± 1. 50	13. 54 ± 0. 08	150	11. 00 ± 0. 50	12. 79 ± 0. 08	150

1.4 单位叶面积滞尘量

将待测树种的叶片分别放入气溶胶再发生器(QRJZFSQ-I)的料盒中, 通过风蚀原理, 将叶片上滞纳的颗粒物吹起、混匀, 再次形成气溶胶, 每个树种进行 3 次重复. 然后利用连接在气溶胶再发生器上的 DUSTMATE 手持式环境粉尘检测仪测定气溶胶中 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的质量 M_{inj} (单位: μg ; i 为不同树种; n 为 3 次重复, 取值 1~3; j 为颗粒物种类).

把测量完的阔叶树种叶片放入扫描仪(Canon LIDE 110)进行扫描, 使用 Adobe Photoshop 软件对扫描完之后的图像进行处理, 利用叶面积分析软件计算叶片面积 S (单位: cm^2). 而针叶树种则利用游标卡尺测其长度和直径计算其叶面积. 不同树种单位叶面积吸附颗粒物量计算公式为:

$$M_i = \sum_1^n m_{ij}/S_i \tag{1}$$

旱柳, 中型线状披针形叶落叶乔木, 常用于园林观赏.

1.3 叶片采集方法

每种植物选取 3 株生长状况良好, 林龄相近的个体植株. 在 6~8 月间 10 d 左右没有降雨的情况下, 在乔木生长高度 2~3 m 处, 分别在东、南、西、北这 4 个方向采集叶片, 根据叶片大小在每株树采集 100~200 g 不等叶片(如表 2), 采摘的叶片要求成熟、完整、无病虫害和断残. 把采摘下来的叶片立即封存于自封袋中, 及时带到位于植物园内的实验室进行测量.

式中, M_i 表示不同树种单位叶面积吸附不同粒径颗粒物的质量(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), i 表示不同树种, j 表示颗粒物种类, $n = 3$.

1.5 叶片微观结构

①另取各树种生长状况良好的叶片, 立即封存于塑料袋内, 带回实验室; ②在实验室内, 在叶片两侧中部将新鲜叶片切成边长约 4 mm × 4 mm 的小立方块, 立即用 2.5% (体积分数) 戊二醛溶液进行固定; ③样品经过喷金处理后, 采用 S-3400 扫描电子显微镜(日本, 日立)观察叶片表面结构, 选择适当的比例进行拍摄^[20].

2 结果与分析

2.1 不同树种叶片滞纳颗粒物密度

图 1 显示了植物园不同树种单位叶面积滞纳颗粒物能力的差异, 从中可知, 不同树种单位叶面滞纳

颗粒物能力存在显著差异,叶片滞纳空气颗粒物能力排序为油松>白皮松>柳树>元宝枫>银杏>杨树. 其中油松单位叶面积滞纳颗粒物能力最强,为 $(3.89 \pm 0.026) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,白皮松次之,为 $(2.82 \pm 0.392) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,杨树最小,为 $(2.00 \pm 0.118) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. 单位叶面积滞纳颗粒物最大的油松是杨树的1.94倍. 从针阔叶树种滞纳空气颗粒物对比来看,针叶树种单位叶面积滞纳颗粒物的量要比阔叶树种高,这与 Sæbø 等^[21]对挪威和芬兰不同树种叶片滞纳空气颗粒物研究结果相似,主要原因是不同树种叶片形态结构不同而具有不同的滞尘能力,针叶树种相对于阔叶树种表面更加粗糙、能分泌油脂、气孔数排列密度均较高,这些方面能够使颗粒物更有效地滞留在叶片表面,从而加强了针叶滞纳效果.

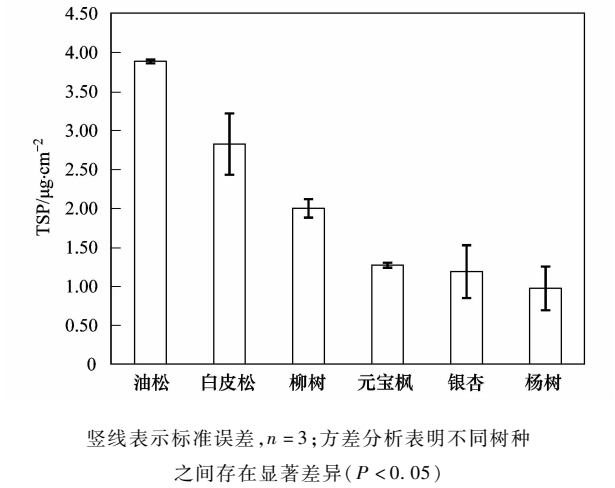


图1 不同树种单位叶面积滞纳颗粒物量
Fig. 1 Adsorption amount of particulate matter per unit leaf area in different species

图2显示了不同研究地点树木单位叶面积滞纳PM₁₀的差异. 从中可知,五环边上树木单位叶面滞纳PM₁₀量高于植物园内相同树木叶片滞纳量,具有显著差异,同时显示了不同树种叶片滞纳PM₁₀能力排序与图1排序结果一样. 图3显示了五环和植物园树木单位叶面积对PM_{2.5}滞纳能力差异对比,结果发现植物园树木叶片滞纳PM_{2.5}与五环边上相同树种滞纳PM_{2.5}能力没有显著差异,且树木滞纳PM_{2.5}能力大小排序也与图1结果不一样. 所研究的树木滞纳PM_{2.5}能力排序为油松>柳树>白皮松>银杏>元宝枫>柳树. 可能由于PM_{2.5}粒径较小,重量比较轻,比起PM₁₀可以在空气中停留更长时间,能随风漂浮距离较远,因此在不同地点上相同树种之间滞纳PM_{2.5}没有显著性差异.

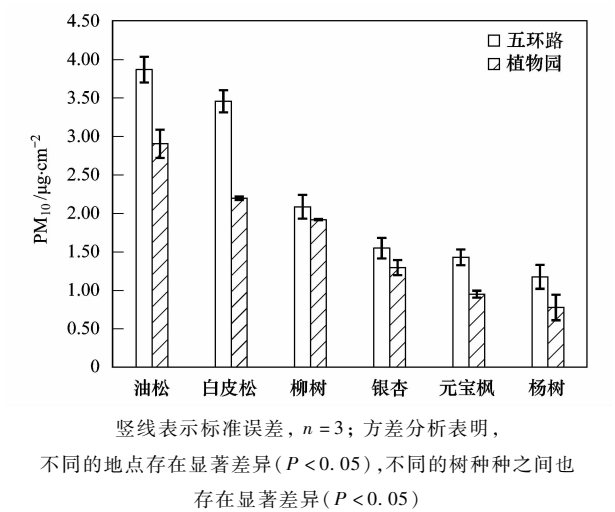


图2 在不同污染区树种单位叶面积滞纳PM₁₀的差异
Fig. 2 Difference in PM₁₀ adsorption per unit leaf area of species in different polluted areas

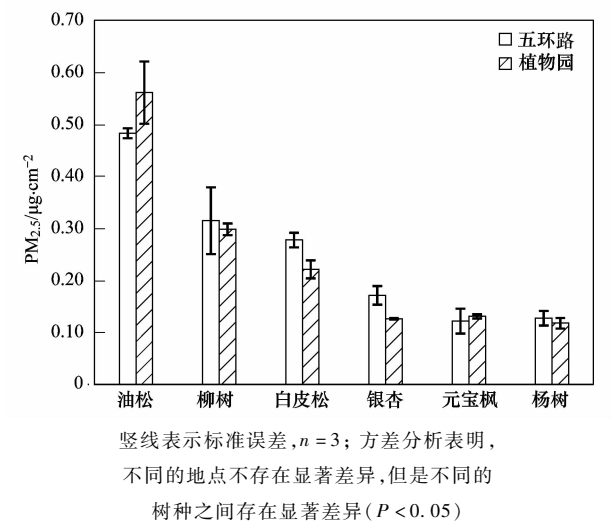
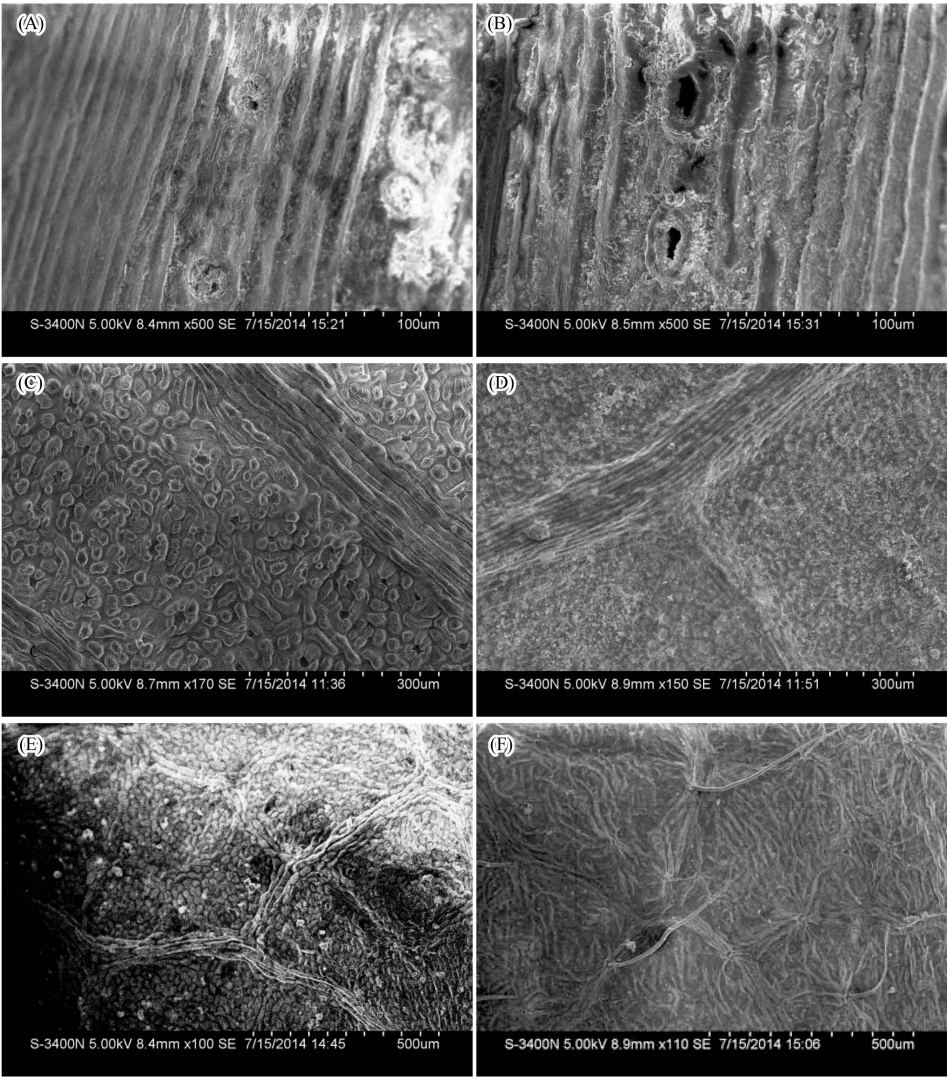


图3 在不同污染区树种单位叶面积滞纳PM_{2.5}的差异
Fig. 3 Difference in PM_{2.5} adsorption per unit leaf area of species in different polluted areas

2.2 不同树种叶片结构差异分析

6种研究植物叶片表面微观结构如图4所示,油松和白皮松气孔排列密度和表面粗糙度均高于柳树、银杏、元宝枫和杨树. 油松(A)气孔为圆形,气孔竖行排列,气孔密度较大,气孔周围有分泌物,上面附着不规则的颗粒物,且在叶表的气孔周围由于细胞排列凹凸不平,有利于灰尘颗粒停留,成为灰尘最集中的位置,叶面上纹理排列紧密,有条形突起,表面较粗糙,凹凸不平;白皮松(B)整体来看,表面也较为粗糙,气孔呈椭圆形,在放大相同显微倍数下,气孔比油松气孔大,但气孔周边相比于油松较光滑,附着的颗粒物也较少;纹理不规则、呈片状分布,看不见绒毛,叶表面有蜡质存在;银杏(C)表面



A. 油松；B. 白皮松；C. 银杏；D. 杨树；E. 元宝枫；F. 柳树

图 4 不同树种叶片微观形态

Fig. 4 Microcosmic structure of leaves of different tree species

光滑,气孔密度较小,气孔周围光滑清晰可见,没有蜡质、无表皮纤毛;杨树(D)表皮趋于平滑,气孔很少,气孔凹陷于角质层之下,角质层拱盖突起完全包围气孔,无分泌物;纹理清晰可见、呈现较浅的网状纹饰,无表皮绒毛和腺体,表面附着颗粒物较少;元宝枫(E)气孔呈放射状平行分布,有一定的浅沟,表面上具有类似网状或蜂窝状的沟状组织,纹理清晰可见但不规则;柳树气孔较大且较为平滑(F),气孔密度和气孔开口较小,无明显的起伏,气孔周围密集有较浅的线形纹饰,表面纤毛较多、毛体柔软且较长,呈短圆柱形,排列较稀疏。

2.3 不同污染区树种叶片结构的差异

图 5 为不同污染区植物叶片表面的形态特征。从中可知,在重污染条件下植物叶片微观形态发生

重要变化。气孔的变化(A1,A2):相对于轻污染(植物园 A1),重污染(五环路 A2)条件下植物叶片气孔周围细胞塌陷消融,气孔周围布满颗粒物,处于闭合半闭合状态;蜡质层的变化(B1,B2):在重污染程度下,植物叶片蜡质层逐渐消失(B2),是为了能够更多地滞纳空气颗粒物,B2 比 B1 显示了滞纳更多的颗粒物。表皮纹理的变化(C1,C2):在重污染情况下,植物叶片纹理会变得不规则,且粗糙度增加,致使叶片表面接触角变大,接触角变大可以更有效地滞留颗粒物^[22];叶片绒毛的变化(D1,D2):植物叶片表面绒毛在重污染条件下长度会增加,绒毛柔软性也会增加,但是绒毛的密度会相应地减少,柴一新等^[20]研究发现,植物叶片绒毛越细长,更容易卡住颗粒物,使其难以脱离,从而加强了滞尘效果;同

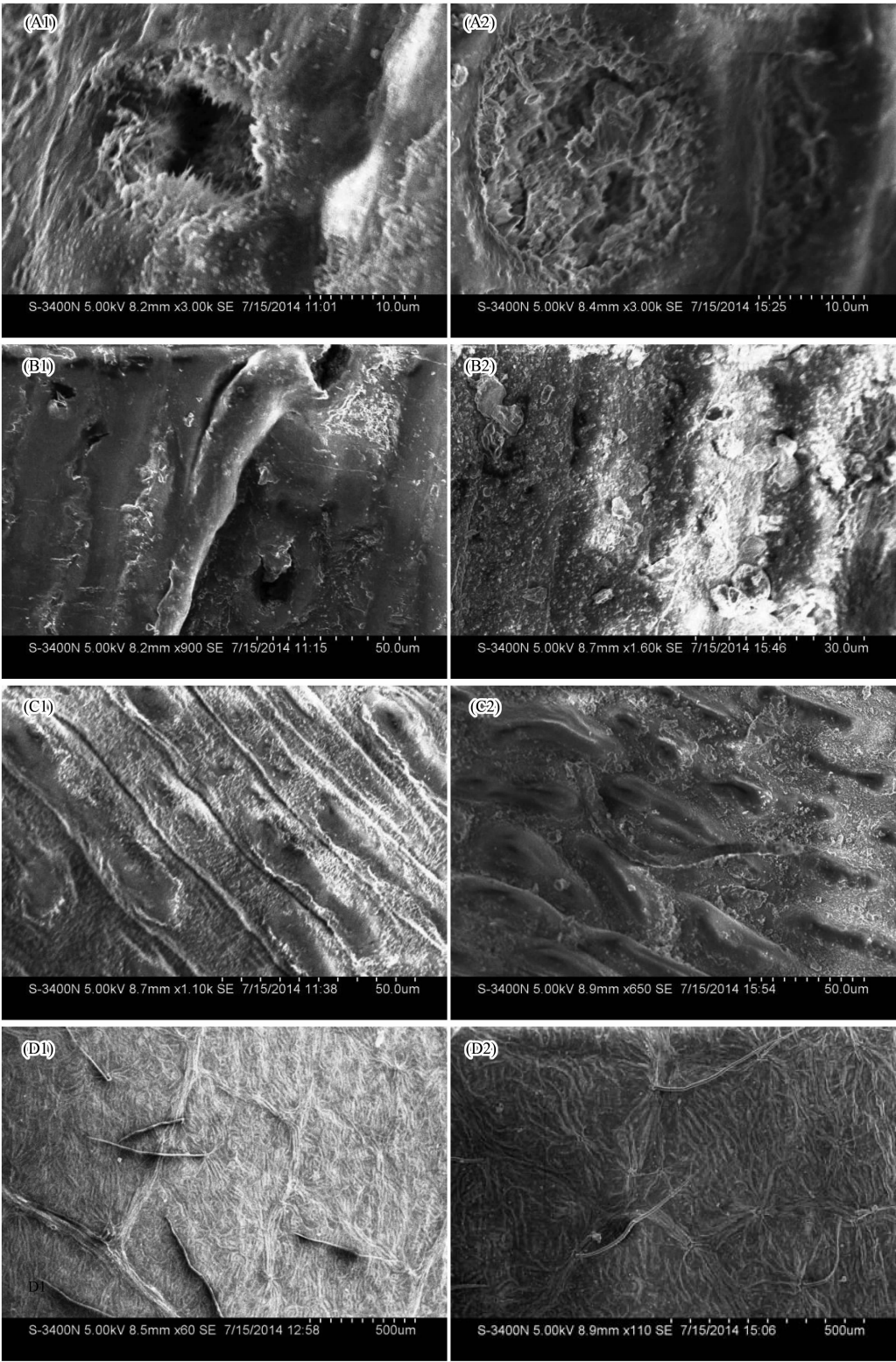


图 5 不同污染区对叶片微观形态的影响

Fig. 5 Effect of different polluted regions on leaf microstructure morphology

时 Pal 等^[19] 研究结果显示在重污染情况下植物叶片绒毛会变长,叶片纹理变得更加粗糙,这是植物应对重污染环境的策略,能够使其更好地适应环境的变化.

3 讨论

3.1 不同树种滞纳颗粒物差异分析

植被可以增加地表粗糙度,降低风速,提高地表

湿润度,从而增加空气颗粒物的沉降速率, Matsuda 等^[23]通过通过通量塔和模型研究了日本中部地区阔叶林干沉降速率,结果表明有林地沉降速率高于草地和无林地. 因此国际上许多国家已经认识到这一点,并通过增加城市植被覆盖率来移除城市空气颗粒物浓度,治理城市环境,提高环境质量^[24,25]. 植被在增加空气颗粒物沉降速率的同时,还可以通过吸附滞纳空气颗粒物,这方面已经得到国内外研究者的认同. 但是不同树种吸附滞纳颗粒物的能力是不同的,王蕾等^[9]对北京市 11 种园林植物的叶表面形态结构与滞尘能力进行了研究,结果表明冬青卫矛 (*Euonymus japonicus*)、五叶地锦 (*Parthenocissus quinquefolia*) 有较强的滞尘能力,而桃 (*Amygdalus persica*) 的滞尘能力较小,指出了灌木树种的滞尘能力高于乔木,该研究结果与 Dzierzanowski 等^[26]、齐飞艳等^[27]的研究结果一样. 本研究结果认为乔木树种在滞纳颗粒物能力上,针叶树种总体要高于阔叶树种,在不同的污染区,树种滞纳粗颗粒物 ($D_p > 2.5 \mu\text{m}$) 存在显著差异,而滞纳细颗粒物 ($D_p < 2.5 \mu\text{m}$) 不存在显著差异,该研究结果与 Beckett 等^[16]的研究结果一样,主要是因为细颗粒物较轻,滞留在大气中时间长于粗颗粒物,能够随风漂浮较远距离;其次是由于风向的影响,植物园位于五环的西北方向,夏季处于下风向. Sæbø 等^[21]对挪威和芬兰的 22 种乔木进行了研究,结果发现针叶树种整体滞纳颗粒物的能力也高于阔叶树种,这说明在不同环境条件下,植物之间滞尘规律大体一致. 但是滞纳超细颗粒物 ($\text{PM} < 0.1 \mu\text{m}$) 以下的的能力,树种之间变化规律需要进一步研究.

3.2 叶片表皮形态结构对滞纳颗粒物的影响

树木吸附滞纳空气颗粒物主要以叶片为载体,因此叶片的微观形态,包括气孔大小密度、纹理结构、表皮粗糙度、蜡质层和绒毛的长短等成为影响植物叶片滞纳颗粒物的主要因素. Wang 等^[22]以西安市 21 种常见绿化植物为对象,采用人工降尘方法测定植物叶片的最大滞尘量,指出植物叶片表面绒毛、润湿性、表面自由能及其含量对植物滞尘能力的影响最大,其中悬铃木滞纳能力最大为 $0.97 \sim 5.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,雪松次之,国槐最小为 $0.29 \sim 3.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. Dzierzanowski 等^[26]认为叶片蜡质层是植物叶片滞纳颗粒物的主要影响因素. 总体来说,叶片表面粗糙度,湿润性、自由能、绒毛、气孔和蜡质层是影响叶片滞纳颗粒物的主要因素.

3.3 不同污染区对叶片结构形态的影响

污染程度重的地区,对叶片微观结构造成的影响为气孔被颗粒物堵塞或半堵塞,气孔周围细胞塌陷、绒毛变长变柔软等变化, Pal 等^[19]也认为在不同颗粒物浓度下,植物叶片结构形态会发生变化,主要表现为气孔被堵塞、纤毛会变长,表面粗糙度增加,同时由于气孔被堵塞或者关闭,导致光合作用减弱,从而使植物的生长速度变缓. 该研究结果与本研究结果相似,但是在不同污染程度下,植物叶片微观结构是怎样发生变化的,变化诱因是空气颗粒物浓度还是其他污染物,这些变化对于植物的生长生理产生怎样的影响,这些影响是否提高了对植物滞纳空气颗粒物和吸收污染物的能力,这些方面国内外学者研究得较少,在以后应该关注这一面的研究^[28~30].

4 结论

(1)北京市 6 种园林植物滞纳空气颗粒物能力排序为油松 > 白皮松 > 柳树 > 元宝枫 > 银杏 > 杨树,其中油松单位叶面积滞纳颗粒物能力最强,为 $(3.89 \pm 0.026) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$,白皮松次之,为 $(2.82 \pm 0.392) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$,杨树最小,为 $(2.00 \pm 0.118) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$. 单位叶面积滞纳颗粒物最大的油松是杨树的 1.94 倍.

(2)在不同污染区,相同树种滞纳 PM_{10} 存在显著差异,重污染地区(五环)的滞纳 PM_{10} 量要高于轻污染区(植物园)的,而相同树种叶片滞纳 $\text{PM}_{2.5}$ 量则没有明显差异.

(3)油松和白皮松叶片气孔排列密度和表面粗糙度要高于柳树、银杏、元宝枫和杨树. 相对于轻污染区,在重污染区,植物叶片结构发生重要变化,气孔被颗粒物堵塞,处于封闭或半封闭状态,气孔周围细胞塌陷,绒毛变长变柔软,蜡质层消失,表皮变得更加粗糙,这些变化是为了增加植物对周围环境的适应性.

参考文献:

- [1] Iqbal M, Abdin M Z, Mahmooduzzafar M, et al. Resistance mechanisms in plants against air pollution [M]. Plant Response to Air Pollution, 1996. 194-240.
- [2] Frost K, Frank, E Maibach E. Relative risk in the news media: A quantification of misrepresentation [J]. American Journal of Public Health, 1997, 87(5): 842-845.
- [3] Moraes R M, Delitti W B C, Moraes, J A P V. Gas exchange, growth and chemical parameters in a native Atlantic forest tree species in polluted areas of Cubatão, Brazil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, 54(3): 339-345.
- [4] El-Khatib A A, Hegazy A K, Amany, et al. Induction of

biomarkers associated with cadmium detoxification in aquatic species[J]. Journal of Environmental Studies, 2011, **7**: 9-16.

[5] 季静, 王罡, 杜希龙, 等. 京津冀地区植物对灰霾空气中 PM_{2.5}等细颗粒物吸附能力分析[J]. 中国科学(生命科学), 2013, **43**(8): 694-699.

[6] Dockery D W, Pope C A, Xu X P, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities[J]. The New England Journal of Medicine, 1993, **329**(24): 1753-1759.

[7] Clark N A, Demers P A, Karr C J. Effect of early life exposure to air pollution on development of childhood asthma [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(2): 284-290.

[8] 张文丽, 徐东群, 崔九思. 空气细颗粒物(PM_{2.5}) 污染特征及其毒性机制的研究进展[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(1): 59-63.

[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): 597-601.

[10] 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.

[11] EL-Khatib A A, El-Rahman A M, Elsheikh O M. Leaf geometric design of urban trees: potentiality to capture airborne particle pollutants[J]. Journal of Environmental Studies, 2011, **7**: 49-59.

[12] Beckett K P, Freer-Smith P, Taylor G. Effective tree species for local air-quality management [J]. Journal of Arboriculture, 2000, **26**(1): 12-19.

[13] 张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 植物叶片吸滞 PM_{2.5}等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨叶片为例[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2238-2242.

[14] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物(PM_{2.5}) 与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2203-2210.

[15] 吴海龙, 余新晓, 师忱, 等. PM_{2.5}特征及森林植被对其调控研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, **10**(6): 116-122.

[16] 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.

[17] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, *et al.* Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects [J]. Environmental Pollution, 2013, **178**: 395-402.

[18] 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 globuls) with European and North American species [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2004, **155**(1-4): 173-187.

[19] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad 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.

[20] 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.

[21] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, *et al.* Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. Science of the Total Environment, 2012, **427-428**(12): 347-354.

[22] Wang H X, Shi H, Li Y Y, *et al.* Seasonal variations in leaf capturing of particulate matter, surface wettability and micro morphology in urban tree species[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, **7**(4): 579-588.

[23] Matsuda K, Fujimura Y, Hayashi K, *et al.* Deposition velocity of PM_{2.5} sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(36): 4582-4587.

[24] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, *et al.* Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(38): 8455-8467.

[25] Paoletti E, Bardelli T, Giovannini G, *et al.* Air quality impact of an urban park over time[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **4**(10): 10-16.

[26] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, *et al.* Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, **13**(10): 1037-1046.

[27] 齐飞艳, 朱彦锋, 赵勇, 等. 郑州市园林植物滞留大气颗粒物能力的研究[J]. 河南农业大学学报, 2009, **43**(3): 256-259.

[28] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其源解析[J]. 前沿科学, 2013, **7**(2): 12-19.

[29] 朱光磊, 张远航, 曾立民. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的来源研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 1-5.

[30] 洪扬斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 PM_{2.5} 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, **28**(3): 77-82.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	LI Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel: 010-62941102 , 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717 , China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian) , P. O. Box 399 , Beijing 100044 , China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行