

绿化树木降霾应用研究进展

闫生荣^{1,2}, 杜中英³, 张跃群², 花海蓉^{1,2}, 周丽⁴

(1. 南通科技职业学院 环境与资源系, 江苏 南通 226007; 2. 江苏省农村环境污染防治工程技术研究开发中心, 江苏 南通 226007;
3. 南通市市政工程设计院有限责任公司, 江苏 南通 226001; 4. 江苏美尚生态景观股份有限公司, 江苏 无锡 214122)

摘要:PM_{2.5}是造成灰霾天气频发的罪魁祸首,其粒径虽小但危害大,可借助自然界的清除机制,利用绿化树木削减PM_{2.5}污染不失为一种有效的生态学处理方式。现从吸附、吸收、降解、同化等角度阐释了绿化树木削减PM_{2.5}污染的效果、过程与作用机理;从树种种类、树木大小、生长速率、树冠特性、叶表特征等树木生物学特征、大气环境PM_{2.5}浓度、各类气候因子等方面讨论了不同绿化树种与PM_{2.5}之间作用的差异,探讨了当前对高效削减PM_{2.5}污染绿化树种进行分类筛选的研究,分析了道路绿地、公园绿地、居住区绿地等有效削减PM_{2.5}污染配植模式的研究;最后对如何建构削减PM_{2.5}绿化树种筛选评价指标体系、城市绿地配置技术等进行了展望。

关键词:PM_{2.5}污染;绿化树木;吸附;筛选;配植

中图分类号:S 731.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)09-0194-05

“霾”古语有之,如《尔雅·释天》曰“风而雨土为霾”,其本义指风夹着尘土。直至近年区域性灰霾重污染事件频发,灰霾才受到社会大众越来越广泛的关注^[1]。PM_{2.5}是灰霾污染的主要元凶,传统的治理方法主要是以源头控制为主,但当下无法从源头杜绝其产生,因此,目前迫切需要从“减源”转向“增汇”,以期找到削减空气中已经产生的PM_{2.5}的有效方法。植物可捕捉大气颗粒物^[2],对PM_{2.5}具有重要的“汇”之作用,从而在一定程度上改善空气质量,其已经在国内外研究中得到证实,诸如美国城市树木1年移除3.8 g/m²的PM₁₀^[3],而草本植物年移除1.12~1.52 g/m²的PM₁₀^[4];TALLIS等^[5]通过修正UFORE模型,计算出伦敦地区城市树冠层对PM₁₀年均削减量为852~2 121 t,由此可见树木在城市中对有效降低颗粒污染物在大气中的积累量起着非常大的作用。树木的叶面积总和(即绿量)可达其占地面

积的75倍,如1棵成年椴树的总叶面积可达3万m²以上,植物巨大的叶总面积,叶面粗糙多绒毛,能分泌黏性物,对PM_{2.5}等颗粒物具有很强的吸附作用^[6]。基于以自然修复自然的思路,利用城市绿化树木削减PM_{2.5}污染是当前一种值得探讨的途径,对实现人类社会与环境协同可持续发展必将大有裨益^[7]。

1 绿化树木削减PM_{2.5}的作用机理

1.1 阻滞吸附

树木对空气中颗粒物的阻滞吸附作用早在古罗马时期就已经被人们所认识,叶片以滞留、附着和粘附3种方式吸附颗粒物^[8]。当PM_{2.5}运动到树叶附近时,可以穿过空气和叶片的边界层而到达叶片表面(即滞留方式)^[9]。由于叶片表面粗糙,具有一定的湿度,有绒毛或纤毛(即附着方式),能分泌黏性物(即粘附方式),树叶就可以成功将PM_{2.5}阻滞吸附于表面。树木吸附PM_{2.5}时,往往综合了上述3种方式,共同发挥作用,不会只有其中某一种吸附方式。PM_{2.5}被吸附之后,也会在叶表发生团聚,形成更大的颗粒物,通过降雨或刮风等自然现象,沉降地面^[10]。此外,树木能随着生长不断扩大叶面积,每年又能更新新叶,这是其它吸附界面所不能比拟的。TOMAŠEVIĆ等^[11]利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)联用技术观测到的植物滞留的粉尘有50%是属于人类活动产生的细微颗粒(D<2 μm)。NOWAK等^[3,12]研究结果表明,洛杉矶、亚特兰大、纽约城市森林对PM₁₀和PM_{2.5}的去除量分别为1 470、32.2 t, 423、64.5 t, 493、37.4 t;由于PM_{2.5}对人体健康的影响要

第一作者简介:闫生荣(1981-),男,江苏如皋人,硕士,副教授,现主要从事空气污染防治与稀土环境生态效应等研究工作。E-mail:sofjnhqu@sina.com.

责任作者:张跃群(1968-),女,江苏如皋人,硕士,教授,硕士生导师,现主要从事园林植物生理等研究工作。E-mail:zyqntnx@sina.com.

基金项目:江苏省2014年高等学校大学生实践创新训练计划资助项目(苏教办高[2014]8号);南通市科技计划资助项目(HS2014025);南通市首批生态建设小额资助项目(通环[2014]33号);南通市公益创投大赛资助项目(团通委联[2015]D11号)。

收稿日期:2016-01-29

大于 PM_{10} , 单位重量的 $PM_{2.5}$ 去除量对应的经济价值 142 000~1 600 000 美元/t 要高于 PM_{10} 4 200 美元/t。张志丹等^[13]对北京市奥林匹克森林公园毛白杨叶片吸滞 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物进行了定量的研究和探讨, 结果表明毛白杨叶片吸滞大气颗粒物的粒径均值为 $17.8\ \mu\text{m}$, 吸滞 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的体积百分比分别为 13.7%、47.2% 和 99.9%; 叶片的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP 和总颗粒物吸滞量分别为 8.88×10^{-6} 、 30.6×10^{-6} 、 64.7×10^{-6} 、 $64.8 \times 10^{-6}\ \text{g}/\text{cm}^2$; 林分的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、TSP 和总颗粒物吸滞量分别为 0.963、3.32、7.01、7.02 kg/hm^2 。

国内外研究表明, 树木叶片 $PM_{2.5}$ 阻截效果与树种种类、树木大小、生长速率、树冠特性、叶表特征等树木生物学特征密切相关。不同树种滞留 $PM_{2.5}$ 的能力差异很大。HWANG 等^[14]、DZIERZANOWSKI 等^[15]、SÆBØ 等^[16]的研究结果表明, 针叶树种对细颗粒物的拦截能力大于阔叶树种, 而在针叶树种中, 松类又要优于柏类。由于具有茂盛的林冠层和复杂的枝干结构, 乔木通过降低绿地及周围的风速, 产生更多的湍流, 故比灌木更有利于滞留和捕获 $PM_{2.5}$ ^[17], 如赵松婷等^[18]研究结果表明, 除月季外绿柳、国槐、钻石海棠、杂交马褂木、银杏、大叶黄杨、金叶女贞、小叶黄杨等 8 种园林植物滞留 $PM_{2.5}$ 时表现出乔木滞留能力强于灌木。与落叶树相比, 常绿树着叶期长, 在一年中能更长时间地吸附 $PM_{2.5}$ ^[19]。从树木个体大小角度而言, 高大树木比矮小树木对空气流动的影响大, 易形成湍流, 可以增加 $PM_{2.5}$ 的沉降速率^[20]。从生长速率来看, 生长迅速的树木能够更快地增加吸附 $PM_{2.5}$ 的叶面积^[21]。树冠是树木阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 的主要场所, 因此树冠的形状和结构对树种吸附 $PM_{2.5}$ 的能力影响很大。树冠紧密、枝叶结构密度大的树木有助于形成湍流, 为 $PM_{2.5}$ 沉降提供有利条件, 而树冠结构疏松、叶类型简单的树木则效果较差^[14]。叶片表面是 $PM_{2.5}$ 和树木相互作用的主要场所, 其叶表微形态对树木吸附 $PM_{2.5}$ 的能力有显著影响。RäSÄNENA 等^[22]模拟测定了 NaCl 粒子在欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)、欧洲桦 (*Betula pubescens*)、椴树 (*Tilia vulgaris*) 和疣枝桦 (*Betula pendula*) 叶面的滞留能力及受叶面特征的影响发现, 叶面积大小、绒毛密度、气孔密度、气孔导度、蒸腾作用等均会影响树叶的 $PM_{2.5}$ 滞留效率。赵松婷等^[18]研究表明园林植物滞留 $PM_{2.5}$ 能力由高到低的微形态结构依次是蜡质结构>绒毛>沟槽>条状突起, 并且这些微形态结构越密集、深浅差别越大, 越有利于滞留 $PM_{2.5}$ 。NEINHUIS 等^[23]证明, 易湿性叶片的滞尘能力较强, 而具有特殊表面结构和疏水蜡质的叶片, 不易润湿, 滞留颗粒物能力较差。杨佳等^[24]研究表明, 国贸桥的垂柳下表面接触角和北京植物园相比较小, 润湿性更好, 这在一定程度上增强了叶片对 $PM_{2.5}$ 的滞留能力。

除以上树木生物学特性外, 需要注意的是有些树种会释放出异戊二烯、单萜烯等生物挥发性有机化合物 (VOCs), 其反应活性高, 能与大气中的氮氧化物等发生光化学反应, 生成臭氧和二次有机气溶胶, 成为 $PM_{2.5}$ 的一个来源^[25]。此外, 树木滞留 $PM_{2.5}$ 能力与大气环境中 $PM_{2.5}$ 浓度有关, 北京单位叶面积 $PM_{2.5}$ 全年去除量为 $0.27\ \text{g}/\text{m}^2$, 居于洛杉矶、亚特兰大、纽约等 10 个城市第四位, 其与北京 $PM_{2.5}$ 处于高浓度水平有关^[12,26]; 而风速、降水、相对湿度等各类气候因子影响了大气 $PM_{2.5}$ 浓度, 进而对树木滞留 $PM_{2.5}$ 能力亦产生影响。

1.2 吸收

电镜照片显示, $PM_{2.5}$ 的直径远小于植物气孔或皮孔的直径^[27], 因此一部分 $PM_{2.5}$ 可借助树木的光合、呼吸作用, 通过扩散运动进入到叶片气孔或枝条皮孔内部, 其直接被植物细胞固定于液泡中或参与循环与物质的合成利用^[28]。 $PM_{2.5}$ 组成十分复杂, 是各种各样固体细颗粒和液滴的“大杂烩”, 化学成分高达上百种, 主要成分是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等盐类、多环芳烃 (PAHs)、多氯联苯 (PCBs)、甾烷、重金属、微量元素、无机碳、有机碳等。绿化树木除了叶表能够吸附 $PM_{2.5}$ 以外, 还能在一定程度上吸收消化 $PM_{2.5}$ 中的化学成分^[29]。有研究表明绿化树木可将 $PM_{2.5}$ 携带物如 PCBs、PAHs 等亲脂性有机污染物剥离下来并收入叶片体内进行降解^[30]; 洗刷过的叶片表面的 PAHs 浓度和未洗刷的没有显著差异, 说明 PAHs 转移的速度比较快^[31]。 $PM_{2.5}$ 颗粒中的可溶性硫酸盐、氯化物等无机盐类污染物会溶解在湿润的树木叶片表面水膜上, 并被叶片所吸收, 进一步净化 $PM_{2.5}$ 颗粒的污染性^[32]。随着叶片表面水分的增多, $PM_{2.5}$ 携带的可溶性无机盐污染物在植物表面溶解的越多, 植物对其吸收的也越多^[33]。由于大量的机动车尾气排放及轮胎磨蚀, Zn、Pb 等重金属元素在城市 $PM_{2.5}$ 成份中所占比例较高^[34]。不同树木由于叶片基因或生理水平等原因对不同元素的阻滞吸收能力差别显著, 如海桐叶片吸滞 Pb 的量为 $0.38\ \text{mg}/\text{kg}$, 而雪松高达 $4.57\ \text{mg}/\text{kg}$; 但海桐叶片吸收 Zn 的能力却很强, 高达 $26.53\ \text{mg}/\text{kg}$ ^[35]。此外, 以降水或枝叶脱落将 $PM_{2.5}$ 从大气中经留叶表回到地表, 可被树木吸收进而参与生长循环^[36]。

1.3 降解

$PM_{2.5}$ 携带的污染物经由绿化树木滞留并吸收后, 在植物体内可继续进行降解。KÁS 等^[37]观察到几种植物在无菌培养条件下能有效地降解多种 PCBs, 但总体来说有机污染物在植物体内降解仍比较困难。目前较为可行的方法是, 从可以分解 PCBs 的动物或微生物中提取合成用于分解污染物酶类的基因, 通过转基因手段转入植物体内, 以期达到较为理想的有机类污染物降解能力^[38]。

1.4 同化

PM_{2.5}富集的主要水溶性化学成分如 SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻等溶于绿化树木叶片表面水分并被植物吸收后,再进行同化利用,其可以净化 PM_{2.5}携带量最多的污染物,从而达到净化空气污染的作用。MORIKAWA 等^[39]研究了 200 余种天然植物同化 N 元素的情况,发现不同植物的同化能力差异最高可达 600 倍,杨柳科(Salicaceae)具有较高的同化 N 元素能力。鉴于 NO_x 等造成的二次污染是 PM_{2.5}形成的一个重要来源,季静等^[40]研究了玉米吸收 NO_x 经同化作用合成自身所需物质的相关代谢途径及基因表达情况,发现玉米杂种后代 F₁ 与亲本相比有 6 个基因在吸收 NO_x 后的相关代谢途径中上调,杂种优势育种符合这一定向选择,可以提高植物叶片表面积、提高 N 代谢能力,对降低灰霾空气对人体毒害大的 NO_x 具有非常重要意义,其为开拓植物修复 PM_{2.5} 污染甚至其它环境的污染提供了新途径。

2 消减 PM_{2.5} 绿化树种的分类筛选

通过减少 PM_{2.5} 阻滞吸附能力低的树种或替换表现好的树种能够提高绿化造林对 PM_{2.5} 的去除效率,故高滞留 PM_{2.5} 能力绿化树种的选择和使用是一种具有更高的 PM_{2.5} 去除效率且更加可行的方法^[26]。常亚敏等^[41]对影响树木阻滞吸附 PM_{2.5} 能力的树种生物学特性进行了分析,并结合树种对城市环境的适应性建立了适用于控制 PM_{2.5} 污染的城市绿化树种的选择方法,应用该方法对北京城市绿化常用的 51 种乔木、14 种灌木树种进行了评价。结果显示,圆柏等 7 种乔木树种和金银木等 3 种灌木树种的 PM_{2.5} 阻滞吸附能力和城市环境适应能力都为强等级,而其余的大部分树种的 2 项能力为中或强等级。建议在北京针对 PM_{2.5} 污染进行的城市绿化中可以优先考虑使用上述树种。江苏省中国科学院植物研究所与南京信息工程大学合作,利用室内烟雾箱模拟试验,高精度的 PM_{2.5} 与污染气体监测仪器实时监测室内环境中 PM_{2.5} 和污染气体浓度与化学组成等污染特性,对南京常见园林绿化树种和室内植物分别进行 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 等污染物的消减功能研究试验。研究结果表明,16 种室内绿植对 PM_{2.5} 消减作用排序为:芦荟>花叶万年青>橡皮树>袖珍椰子>金边假连翘>富贵竹>铁十字秋海棠>绿巨人>虎皮兰>绿萝>吊兰>金心巴西木>白掌>一叶兰>万年青>螺纹铁;5 种常绿园林植物对 PM_{2.5} 消减作用排序为:雪松>桂花>女贞>广玉兰>石楠^[42]。经过 2 年多数据统计分析,北京市园林科学研究所与中国城市建设研究院对 60 多个树种进行了研究,目前已经选定了 18 种吸附 PM_{2.5} 能力强、有一定降尘效果的绿化植物,其包括元宝枫、柿树、国槐、银杏、臭椿、楸树、圆柏、杜仲、毛白杨、栾树、刺槐等乔木;紫

叶矮樱、丁香、胡枝子、木槿、榆叶梅、牡丹、钻石海棠等灌木^[43]。

3 消减 PM_{2.5} 绿地配植模式的研究

在城市绿地中种植消减 PM_{2.5} 能力强的树种,并对乔灌木不同生活型植物进行合理的结构设计,则对减轻城市 PM_{2.5} 污染具有重要的意义^[44]。吴志萍等^[45]研究了 6 种城市绿地环境下空气 PM_{2.5} 浓度的变化规律,发现春、秋、冬季有乔木的绿地内空气 PM_{2.5} 浓度较低。北京市园林科学研究所与中国城市建设研究院共同总结出有效消除 PM_{2.5} 污染的绿地配置模式,并制定出《消减细颗粒物型道路绿地设计导则》,目前已进入到推广应用阶段。该导则中绿地宽度应在 30 m 以上,并选择 6~12 种消减 PM_{2.5} 效果好的植物搭配使用。在路边设置 6~8 m 宽的灌草景观带(植株较矮),可以种植紫叶矮樱、榆叶梅等;后面为混交乔木林(高大挺拔),可种植国槐、毛白杨、圆柏、元宝枫等;绿化带的群落郁闭度要保持在 70% 以上(即为密林)。高低错落的绿化带既可以美化景观,还能充分触及到低空和高空的 PM_{2.5} 污染物,能够最大限度地削减空气中 PM_{2.5} 浓度^[46]。李新宇等^[47]对北小河公园绿地具有代表性的植物群落 PM_{2.5} 浓度进行测定,对不同植物群落全年 PM_{2.5} 浓度的变化特征进行了对比分析。结果表明:1)公园内绿地 PM_{2.5} 浓度低于公园外裸地处 PM_{2.5} 浓度 20%;2)夏季北小河公园绿地内 PM_{2.5} 的平均浓度为 56.59 μg/m³,为四季中最低水平;3)从全年平均来看,北小河公园内不同植物群落类型内 PM_{2.5} 浓度大小排序为:乔灌草型>乔草型>草坪>灌草型>纯针叶林。由于纯林结构形成较大的树冠,对于颗粒物的拦截作用较大,林内 PM_{2.5} 浓度低于其余几种植物群落。针对绿地对空气中可吸入颗粒物污染防治,王国玉等^[48]在对道路绿带、公园绿地典型样地消减 PM_{2.5} 功能监测的基础上,分析影响绿地 PM_{2.5} 消减能力的宽度、绿地规模、植物群落、物种构成、水平结构、垂直结构等关键指标,进而构建 6 种消减 PM_{2.5} 污染典型植物群落模式,为北京地区应对空气污染绿地建设提供一定的技术支撑。惠劼等^[49]提出了以“遏制源头、吸附收集、扩散阻隔”为途径的 PM_{2.5} 治理思路,以“容器”为防范措施,运用规划引导、交通组织、植物配置、景观营造等手段,降低 PM_{2.5} 对城市居住微环境的污染。该理念在“墙·苑-西安东门里居住环境设计”中进行了探索与运用,并一举问鼎 2012 年国际园林景观设计行业协会与世界屋顶绿化协会组织的“艾景奖”-居住区环境设计类金奖。然而并不是林分结构越复杂,其对 PM_{2.5} 浓度的削减作用越大,林分结构过于紧密,反而不利于 PM_{2.5} 的扩散,如北京奥林匹克森林公园中针阔、阔阔混交配置对 PM_{2.5} 的削减作用反而要好于针阔+灌木混交配置^[28]。

4 问题与展望

目前对于绿化树木对颗粒物的作用的定量研究主要集中在树木叶片滞留总颗粒物效益方面,对于树木叶片滞留 PM_{10} 的效果少见报道,而针对树木消减 $PM_{2.5}$ 的量化研究则刚刚起步,在以下几个方面仍需进行深入研究:1)由于受到各方面条件的限制,多数研究对树种的选择有限且较为随机,没有覆盖到当地所有的树种,且缺乏长期连续的采样分析,不足以全面地衡量树木叶片滞留 $PM_{2.5}$ 的能力,今后要扩大研究对象和延长研究时间。2)树木自身的形态学特征如树种种类、树木大小、生长速率、树冠特性、叶表特征等都会对树木的阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 能力造成影响,但目前还无法可靠地揭示各生物学特性的影响之间的大小差异,今后要加强这方面的量化研究。3)绿化树木消减 $PM_{2.5}$ 测试结果受采样地、采样时间、采样部位、试验环境等多种因素的影响,不同地点所测结果数值和变化趋势有不小出入,甚至相悖。如何避免测试环境条件差异对绿化树木消减 $PM_{2.5}$ 研究的影响也是以后亟待解决的问题。4)不少城市在制定、修订城市绿地系统规划时,坚持适地适树,以“大绿量、大生态、大景观”为目标,做到乔、灌、花、草科学配置,充分发挥植物特有生态学特性,在实现生态功能最大化的基础上,营造“四季有绿、应时有花、季相丰富”的生态景观效果。但是,对于 $PM_{2.5}$ 污染区绿化几乎没有推荐消减 $PM_{2.5}$ 的针对性绿化树种。可结合各区域近年绿化普查数据和 $PM_{2.5}$ 源解析资料,确定“降霾”绿化树种筛选对象和采样点,从树木吸附 $PM_{2.5}$ 量、对 $PM_{2.5}$ 污染的抗性、观赏性等入手,统筹考虑 VOCs 释放,利用聚类分析法、指数判断法、主成分分析法等构建系统化的树木消减 $PM_{2.5}$ 的筛选评价指标体系。5)在进行消减 $PM_{2.5}$ 绿化树种筛选时,可借助转基因手段或人工筛选突变树种,培育出高吸收、降解、同化 $PM_{2.5}$ 携带污染物的转基因树种。6)在分类筛选出各区域消减 $PM_{2.5}$ 效果好的优势绿化树种后,综合考虑 $PM_{2.5}$ 污染源类别、源强、总量、大气扩散条件等因素,结合绿地规模、植物种类、“乔+灌+花+草”配置、群落结构、生态功能、景观功能等因素,利用 Envi-met 模型模拟 $PM_{2.5}$ 在城市绿地内的浓度分布,对高效削减 $PM_{2.5}$ 污染的绿化植物配置模式进行研究,并要大力开展针对城市范围的大尺度区域绿地 $PM_{2.5}$ 削减量量化估算。7)树木叶片滞留 $PM_{2.5}$ 所携带的 PCBs、PAHs、重金属、碳氮等植物营养元素在大气、 $PM_{2.5}$ 、植物、土壤之间的迁移转化, $PM_{2.5}$ 胁迫对树木叶片的危害,对光合速率、蒸腾速率等生理生化影响, $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_x 等对树木的复合污染研究等少见报道,这些都是将来的研究热点。

参考文献

- [1] 李宇军. 中国城市环境保护面临的挑战及其对策[J]. 云南农业大学学报, 2014, 8(5): 104-109.
- [2] 洪秀玲, 杨雪媛, 杨梦尧, 等. 测定植物叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物质量的方法[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 147-154.
- [3] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2006(4): 115-123.
- [4] YANG J, YU Q, GONG P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 7266-7273.
- [5] 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.
- [6] 陆红梅. 森林: 调控 $PM_{2.5}$ 的绿色净化器[J]. 园林, 2013(6): 12-15.
- [7] 李辰, 洪秀玲, 任建武, 等. 植物叶片滞尘与 $PM_{2.5}$ 等颗粒物致霾的防治[J]. 环境与生活, 2014(12): 191-192.
- [8] POPEK R, GAWROŃSKA H, WROCHNA M, et al. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study[J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 245-256.
- [9] 殷杉. 上海浦东新区绿地系统研究: 分布格局、生态系统特征及服务功能[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 17.
- [10] 余新晓, 程正霖, 孙丰宾. 城市水土保持措施对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的作用[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 122-125.
- [11] TOMAŠEVIĆ M, VUKMIROVIĆ Z, RAJŠIĆ S, et al. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. Chemosphere, 2005, 61: 753-760.
- [12] NOWAK D J, HIRABAYASHI S, BODINE A, et al. Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten US cities and associated health effects[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 395-402.
- [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): 1-5.
- [14] HWANG H J, YOON 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王兵, 张维康, 牛香, 等. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 408-414.
- [18] 赵松婷, 李新宇, 李延明. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 271-276.
- [19] 洪秀玲. 社区散生林木叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 18.
- [20] 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.
- [21] 刘萌萌. 林带对阻滞吸附 $PM_{2.5}$ 等颗粒物的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 9.
- [22] RÄSÄNEN J V, HOLOPAINEN T, JOUTSENSAARIB J, et al.

Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183:64-70.

[23] 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.

[24] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 等. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3):384-392.

[25] CLAEYS M, GRAHAM B, VAS G, et al. Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene[J]. *Science*, 2004, 303(5661):1173-1176.

[26] 常亚敏. 北京平原新造林 PM_{2.5} 去除效应分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015:16.

[27] 李延明, 李新宇. 植物抗霾[J]. *景观设计学*, 2014(4):62-67.

[28] 李素莉. 北京典型配置城市森林对 PM_{2.5} 影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015:18.

[29] 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.

[30] TRAPP S, MIGLIORANZA K S B, MOSBÆ K H. Sorption of lipophilic organic compounds to wood and implications for their environmental fate[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(8):1561-1566.

[31] 陈小平, 焦奕雯, 裴婷婷, 等. 园林植物吸附细颗粒物(PM_{2.5})效应研究进展[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9):2558-2566.

[32] 周启星, 魏树和, 张倩茹. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[33] 彭长连, 温达志, 孙梓健. 城市绿化植物对大气污染的响应[J]. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(4):321-327.

[34] 王志磊, 赵红霞, 翟付顺. 园林植物防治雾霾的应用研究[J]. *北方园艺*, 2015(4):196-199.

[35] 赵晨曦. 基于不同尺度的植物对 PM_{2.5} 的削减及滞留影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015:6.

[36] 郑志侠, 吴文, 汪家权. 大气颗粒物中重金属污染研究进展[J]. *现代农业科技*, 2013(3):241-243.

[37] KÁS J, BURKHARD J, DENMEROVÁ K, et al. Perspectives in biodegradation of alkanes and PCBs[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1997, 69(11):2357-2370.

[38] YUKAWA M, SUGIURA M. Additional pathway to translate the downstream *ndhK* cistron in partially overlapping *ndhC-ndhK* mRNAs in chloroplasts[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(14):5701-5706.

[39] MORIKAWA H, HIGAKI A, NOHNO M, et al. More than a 600-fold variation in nitrogen dioxide assimilation among 217 plant taxa[J]. *Plant Cell and Environment*, 1998, 21(2):180-190.

[40] 季静, 王昱, 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.

[41] 常亚敏, 闫蓬勃, 杨军. 北京地区控制 PM_{2.5} 污染的城市绿化树种选择建议[J]. *中国园林*, 2015(1):69-73.

[42] 顾小萍. 南京公布园林植物对空气中 PM_{2.5} 污染消减作用研究成果[EB/OL]. <http://www.njdaily.cn/2015/0312/1072770.shtml>. [2015-03-11].

[43] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 等. 北方常用园林植物滞留颗粒物能力评价[J]. *中国园林*, 2015(3):72-75.

[44] 赵松婷, 李新宇, 李延明. 北京市 29 种园林植物滞留大气细颗粒物能力研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6):1004-1012.

[45] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 等. 6 种城市绿地空气 PM_{2.5} 浓度变化规律的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(4):494-498.

[46] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 等. 北京市不同主干道绿地群落对大气 PM_{2.5} 浓度消减作用的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4):615-621.

[47] 李新宇, 赵松婷, 郭佳, 等. 公园绿地不同植物群落对细颗粒物 PM_{2.5} 浓度的影响[J]. *农业科技与信息(现代园林)*, 2014, 11(11):11-13.

[48] 王国玉, 白伟岚, 董东箭, 等. 城市绿地消减 PM_{2.5} 污染植物配置技术的思考[J]. *农业科技与信息(现代园林)*, 2014, 11(2):23-29.

[49] 惠劼, 李洁, 王倩, 等. 以“容器效应”降低城市住区环境 PM_{2.5} 的策略初探: 以西安东门里居住环境设计为例[J]. *建筑与文化*, 2014(2):120-122.

Research Advance of Minifying PM_{2.5} Pollution by Afforestation Trees

YAN Shengrong^{1,2}, DU Zhongying³, ZHANG Yuequn², HUA Hairong^{1,2}, ZHOU Li⁴

(1. Department of Environment and Resource, Nantong College of Science and Technology, Nantong, Jiangsu 226007; 2. Jiangsu R&D Center for Engineering Technology of Preventing and Curing Rural Environmental Pollution, Nantong, Jiangsu 226007; 3. Nantong Municipal Engineering Design Institute Co. Ltd., Nantong, Jiangsu 226001; 4. Jiangsu Misho Ecology Landscape Co. Ltd., Wuxi, Jiangsu 214122)

Abstract: Dusthaze frequently occurred caused by the ringleader of PM_{2.5}. Due to its small size, PM_{2.5} seriously polluted the environment, while afforestation trees could alleviate the pollution from PM_{2.5} to a certain extent by the removal mechanism of natural ecosystem. Interpreted the effect, process and mechanism of minifying PM_{2.5} pollution of afforestation trees from the angles of adsorption, intake, degradation and assimilation, discussed the influencing factors of minifying PM_{2.5} pollution of afforestation trees, such as type, size, growth rate, crown and leaf surface characteristics of afforestation trees, PM_{2.5} concentration of atmospheric environment and climatic factors, investigated the classification and selection of afforestation trees efficiently minifying PM_{2.5} pollution, analyzed the arrangement patterns of green lands such as roadway, park and village minifying PM_{2.5} pollution. Finally, the development direction of constructing the evaluation index system of afforestation trees minifying PM_{2.5} pollution and the plant design technology minifying PM_{2.5} pollution was prospected.

Keywords: PM_{2.5} pollution; afforestation trees; adsorption; screening; arrangement of trees and shrubs