

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.50790

易心钰, 彭映赫, 廖菊阳, 刘艳, 李高飞. 森林植被与大气颗粒物的关系[J]. 植物科学学报, 2017, 35(5): 790~796

Yi XY, Peng YH, Liao JY, Liu Y, Li GF. A review of the relationship between forest vegetation and atmospheric particulate matter[J].

Plant Science Journal, 2017, 35(5): 790~796

森林植被与大气颗粒物的关系

易心钰^{1,3}, 彭映赫², 廖菊阳^{1*}, 刘艳¹, 李高飞¹

(1. 湖南省森林植物园, 长沙 410116; 2. 湖南省林业科学院, 长沙 410000;
3. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 近年来, 大气颗粒物成为我国城市大气的主要污染物, 其中细颗粒物($PM_{2.5}$)粒径小、沉降困难, 对环境的危害已成为亟待解决的问题。森林植被可显著消减空气颗粒物, 有效改善空气环境质量。本文概述了植被对颗粒物的移除过程和方法, 探讨了大气颗粒物与森林植被的相互关系。从单叶、单木及群落3个尺度, 结合气象因素讨论了植被对移除大气颗粒物的影响, 分析了颗粒物的后续再悬浮过程及对植被的危害。最后, 从植被吸附颗粒物的能力测定和评价、本土高吸附 $PM_{2.5}$ 能力植被的筛选及综合研究不同植被配置结构的吸附效应等方面提出了植被吸附颗粒污染物, 尤其是细颗粒物的研究重点与趋势。

关键词: 森林植被; 大气颗粒物; 细颗粒物($PM_{2.5}$); 移除; 调控作用

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)05-0790-07

A review of the relationship between forest vegetation and atmospheric particulate matter

Yi Xin-Yu^{1,3}, Peng Ying-He², Liao Ju-Yang^{1*}, Liu Yan¹, Li Gao-Fei¹

(1. Hunan Forest Botanical Garden, Changsha 410116, China; 2. Hunan Forestry Academy, Changsha 410000, China; 3. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: At present, atmospheric particulate matter (PM) is the main source of urban air pollution in China, in which fine particulate matter ($PM_{2.5}$, ≤ 2.5 microns in aerodynamic diameter) seriously pollutes the environment due to their small size and inertia of sedimentation. Plants can significantly remove air particulate matter and effectively improve urban environmental quality. Here, we summarize the processes and methods of the removal of particulate matter by vegetation, and discuss the relationship between atmospheric particulate matter and forest vegetation. The effects of vegetation on the removal of atmospheric particulate matter are discussed with consideration of meteorological factors, and analysis of the resuspension processes and negative effects of plants on the retention abilities of atmospheric PM are also examined. Lastly, we propose key points and trends on plant adsorption of PM, especially $PM_{2.5}$, based on the measurement and evaluation of PM adsorption abilities of plants, selection of local plants with high PM adsorption ability, and comprehensive measurement and systematic study on PM removal capability, especially of $PM_{2.5}$, of different kinds of disposition model of plants.

收稿日期: 2017-07-01, 退修日期: 2017-08-08。

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404301)。

This work was supported by a grant from the Forestry Industry Research for Public Welfare Projects(201404301).

作者简介: 易心钰(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为资源植物开发与利用(E-mail: yixinyu1108@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: 542796447@qq.com)。

Key words: Forest vegetation; Atmospheric particulate matter; Fine atmospheric particulate ($PM_{2.5}$); Removal; Regulating effects

随着社会经济的高速发展, 城市化进程的不断加快, 空气环境质量日益下降。近年来, 雾霾天气在我国大部分地区频繁发生, 大气污染成为我国面临的重要环境问题。可吸入颗粒物是造成空气污染的首要因素, 颗粒物粒径越小, 危害越大^[1], 其主要成分为 $PM_{2.5}$ (即直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的颗粒物)可直接进入人体肺部进行气体交换, 危害人类健康^[2], 且目前尚不能通过治理污染源解决这一问题。研究证实, 森林植被可通过增加地表粗糙度、降低风速、阻挡和吸滞颗粒物等方式, 将空气颗粒物存储在森林内部。因此, 植被对降低空气污染物浓度, 净化大气环境发挥着至关重要的作用^[3-5]。植物对颗粒物的吸附除了与叶表面属性、树冠结构、植物配置等因素有关外, 也受气象及人为因素的影响^[6,7]。目前, 国内外学者已在植被对颗粒物的吸附能力、过程及作用机理等方面取得了一定的成果, 但少有结合植被信息和气象因素等的综合分析。在此, 本文对国内外有关颗粒物(主要是 $PM_{2.5}$)与植被相互作用关系的研究成果进行综述, 基于单叶、单木及林分3个尺度, 分析不同条件下植被对移除大气颗粒物效益的影响, 以期为降低大气颗粒物的研究提供理论参考。

1 植被对颗粒物的移除过程及方法

大气颗粒物沉降是指颗粒物撞击后滞留在物体表面, 从而脱离大气环境的过程^[8]。根据其作用过程可分为干沉降和湿沉降。由于颗粒物中 $PM_{2.5}$ 的粒径较小, 导致其自身重力不足难以发生沉降, 因此湍流为 $PM_{2.5}$ 最典型的干沉降方式^[9], 且湍流作用越强, 越有助于 $PM_{2.5}$ 沉降。湿沉降为非降水条件下, $PM_{2.5}$ 的主要沉降方式。研究表明, 植被可通过直接和间接2种方式实现对 $PM_{2.5}$ 的移除, 且不同移除过程的作用机制也不相同^[10,11]。直接方式体现为: (1)植被可通过其茂密的树冠及复层结构产生阻力, 有效降低风速, 使空气中携带的颗粒物下沉到叶片表面; (2)当 $PM_{2.5}$ 撞击到叶片表面时, 叶表面具有叶表微结构、粗糙度、湿润度等特性可实现对颗粒污染物的截取和固定。间接方式是指植被冠层的蒸腾、庇荫作用可调节局部微环

境, 降低大气温度, 提高空气相对湿度, 有利于颗粒物的沉降^[12]。

2 植被吸附颗粒物的影响因素

从较小尺度上分析, 叶片结构、种间差异等是影响植物吸附能力的内在因素。例如, 叶表面具有一定的湿润度和粗糙度, 有利于颗粒物的沉积, 且植物的生理过程, 如光合、呼吸作用等均有助于颗粒物的去除。在较大尺度上, 尤其是植被覆盖率高、植物生长较好的地区, 植被对颗粒物的影响占主导地位, 即在不同尺度条件下, 植被的内在属性与外界影响因素会体现出不同的特性, 需根据不同尺度进行分析。

2.1 叶表面形态

2.1.1 叶的形状和面积

叶片具有表面多皱、粗糙、多绒毛、可分泌黏性的油脂和汁液等特点, 因此植被可以截取和固定大气颗粒污染物, 使其脱离大气环境, 植被成为环境污染的重要过滤体。叶片结构是植被吸附大气颗粒物的基础, 并与植被物种差异、植物配置等特点构成了影响植物阻滞大气颗粒污染物的内在属性^[13]。

研究表明, 植被滞留颗粒物的能力与叶的形状及面积大小有关。叶面积较小的植被多拦截细颗粒物, 而大叶植被则多移除细颗粒物^[14]。熊治廷等^[15]研究认为, 叶片面积与植被滞留颗粒物的能力成正比; 但也有研究表明, 叶面积与对颗粒物的吸附能力相关性并不显著。赵晨曦等^[8]研究表明, 针叶树松科、柏科树种的圆柱形针叶、刺叶或鳞叶, 叶片形状细小复杂、边缘不规则, 易形成湍流, 利于 $PM_{2.5}$ 沉降。陈玮等^[16]研究表明, 沙松(*Abies holophylla* Maxim)、冷杉(*Abies fubri* (Mast.) Craib)和东北红豆杉(*Taxus cuspidate* S. et Z.)的叶片扁平, 且叶断面形状呈四棱形, 对颗粒物的吸附能力最强, 因此, 叶断面形状也可影响滞尘能力。

2.1.2 叶片微结构

叶表面的微观结构可影响叶片滞尘能力。因此, 很多学者对植物表面的结构与滞尘能力的关系

进行了研究,结果表明叶片表面微形态结构越紧密,深浅差别越大,对颗粒物的吸附能力越强^[17]。王蕾等^[18]研究表明,微形态结构滞尘能力由大到小依次为绒毛、沟槽、叶脉+小室、小室、条状突起;孙晓丹等^[19]通过电镜对叶表面微形态观察结果显示,具有蜡质结构、叶表面粗糙、气孔开口较大的植物如大叶黄杨(*Buxus megistophylla* Levl.)、金银木(*Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim)的滞尘能力更强;赵松婷等^[20]认为叶片具有表面蜡质结构、粗糙、多皱、多绒毛、分泌黏性油脂和汁液的园林植物,滞留颗粒物的能力较强;很多研究也得到类似的结论^[10,21-25]。但也有研究认为,叶表面滞尘能力与叶表面是否粗糙并无关系,而是多种因素相互作用影响叶片滞尘能力^[26]。此外,植物体表面可能存在极少量的电荷,与大气中PM_{2.5}携带电荷不同,但Beckett等^[27]研究发现,静电对颗粒物的吸引作用并不显著。此外,沉积的PM_{2.5}易在风速增大及其他外力作用下再悬浮回到大气中,植被冠层能对二次扬尘的颗粒物进行二次拦截,如遇降雨发生,可将其淋洗到地面^[28]。

2.2 植被个体差异

不同植被具有不同的形态特征,其对颗粒物的滞留能力也不同,近年来,针对不同植被对颗粒物的吸附作用进行了一些研究,发现不同植被对颗粒物吸附能力的差异明显^[9,10]。陆锡东等^[29]对比了宜州城区5种行道树的滞尘能力,认为不同植物的滞尘量可相差5倍以上;王蕾等^[18]对北京11种园林植物的大气颗粒物滞留量差异进行了比较,结果表明灌木冬青卫矛(*Euonymus japonicus* Thunb.)和藤本植物爬山虎(*Parthenocissus tricuspidata* (S. et Z.) Planch.)对颗粒物的滞留能力更强,高大树木中,白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)滞留颗粒物的能力强于国槐(*Sophora japonica* Linn.);郭鑫等^[30]通过对呼和浩特市几种常绿树种的滞尘能力发现,乔木滞尘能力大小依次为云杉(*Pinus asperata* Mast.)>杜松(*Juniperus rigida* S. et Z.)>圆柏(*Sabina chinensis* (L.) Ant)>油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)。Beckett等^[27]利用风洞模拟实验证实,针叶树比阔叶树更能有效捕捉颗粒物,针叶树中松树(*Pinus massoniana* Lamb)的捕获能力更强;Hwang等^[7]通过气室实验,证明5种乔木银杏(*Ginkgo biloba* L.)、日本赤松

(*Pinus densiflora* Sieb. et)、榉树(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)、美国梧桐(*Platanus occidentalis* L.)和红豆杉(*Taxus chinensis* (Pilger) Rehd.)中,针叶树对PM_{2.5}的吸附能力远大于阔叶树,主脉明显的美国梧桐和榉树的吸附效果优于银杏,叶片具有细密容貌结构的美国梧桐吸附效果优于榉树;Tiwary等^[31]采用电脑模拟,认为松树滞尘能力是阔叶树的两倍;Szönyi等^[32]认为,欧洲黑松(*Pinus nigra* Arn.)和金柏(*Sabina chinensis* (L.) Ant. cv. *Aurea*)由于叶片结构复杂细微,因此捕获颗粒物的效率更高。

乔木因其茂硕的林冠层,较大的叶面积,比灌木和草本具有更有效的阻滞颗粒污染物的能力。且高大树木更易使周边空气形成气流,为颗粒物沉降提供有利条件^[33]。冯朝阳等^[34]结合叶面积指数评估自然植被总体的滞尘能力,得出常绿乔木的滞尘能力高于灌木、草地的结论。苏俊霞等^[35]的实验结果认为,不同植物的滞尘能力不同,一般乔木类最强、灌木次之、草本相对最低。但也有学者认为,灌木类对吸附颗粒物具有位置优势,滞尘能力与乔木类植物相当或略高于乔木^[13],如Dzierzanowski等^[6]采用过滤的方法研究了金钟连翘(*Forsythia intermedia* Zabel)、洋常春藤(*Hedera nepalensis* K. Koch var. *sinensis*)、金叶风箱果(*Physocarpus opulifolius* var. *luteus*)、日本绣线菊(*Spiraea japonica* L. f.)对PM_{2.5}的吸附能力,认为金钟连翘和日本绣线菊叶表面吸附颗粒物的能力强于另外2种植物。推测原因,可能在于乔木主要对外界的降尘、飘尘进行阻滞,灌木则是依靠本身的密集型去减少地面扬尘。因此,在今后的研究中,可根据区域筛选代表性植物,比较其阻滞吸收颗粒物的效果,定量分析其单位面积吸附颗粒物的滞留量,使其研究更加系统。

2.3 不同植被配置结构差异

单体植物能够滞留颗粒物,当大量植物聚集成群落时吸附颗粒物的能力更强。现阶段,对不同植物群落调控大气颗粒污染物的研究较少。一般来说,复合的多层植物配置结构较单一植物配置模式的滞尘效果更好。张新献等^[36]通过测定乔灌草、灌草、草坪3种结构类型对颗粒物的阻滞效果,结果显示,乔-灌-草结构的减尘效果最显著;孙淑萍等^[37]比较乔-灌型、乔-草型、灌-草型和乔-灌-草

型吸附颗粒物的效益发现, 乔-灌-草群落结构的吸附效果最好, 单一的草坪结构效果最差; 粟志峰等^[38]选择乔灌+花草型、密乔木型、稀疏乔木型的滞尘效果显示, 乔灌+花草型和稠密乔木型为首选; 王国玉等^[39]研究发现, 乔灌草+乔的复层混交模式对 $PM_{2.5}$ 的吸附效果优于乔灌草复层结构。Fowler 等^[33]比较了英国西米兰德地区森林和草地土壤中气溶胶及铅(Pb)的沉积量发现, 森林土壤中沉积的 Pb 浓度远高于草地, 森林内气溶胶的沉降速率为 9 mm/s, 远高于草地的 3.3 mm/s; Ouls-Dada 等^[40]研究发现, 森林内铀的沉降量是草地的 3 倍。这些研究都证实了多层群落模式对 $PM_{2.5}$ 的调控更为有效。

2.4 气候因素

植物可有效调节微环境, 利于湍流的形成, 加强其对颗粒物的吸附。研究表明, 植被对颗粒物的阻滞能力与环境中的颗粒物浓度有关, 气候因素可影响大气中颗粒物的浓度, 从而对植被的阻滞能力产生影响, 包括: 风速、降水、温度、湿度等^[8]。此外, 国外学者也得到类似结论, 如温度升高可加速 SO_2 氧化, 从而加速硫酸盐的形成, 硫酸盐气溶胶中半挥发性成分, 如硝酸盐和有机物成分则可向气相的转化, 降低大气中颗粒物浓度。Tai 等^[41]研究了常见气象因子对 $PM_{2.5}$ 及其不同组分的影响, 认为气温、相对湿度、降水、环流情况的日变化可解释 50% 以上的 $PM_{2.5}$ 的变化情况。但由于 $PM_{2.5}$ 组分的差异性, 对气象因子的响应趋势和程度也各不相同, 因此, 细化 $PM_{2.5}$ 及其组成成分与气象因素的关系, 才能进一步确定气象因素对 $PM_{2.5}$ 沉降的影响^[13]。

3 颗粒污染物对植被生长发育的影响

3.1 沉降物的再悬浮及影响

植被虽能将大气中的颗粒物滞留在植物体表面, 但在一定的气象条件下, 沉积的颗粒物又将再悬浮回到大气中。不同的植被对颗粒物的滞留能力具有显著差异, 例如, Witherspoon 等^[42]的研究表明, 橡树(*Quercus robur* L.)叶片的滞尘能力大于松树, 经 1 h 风力过程后, 橡树叶片颗粒物损失高达 90.5%, 松树仅为 10%。如遇降水情况, 植物表面的颗粒物可在雨水冲刷作用下进入土壤, 使空气尘变为土壤尘, 被植被吸收, 参与植被生长循

环, 植物进入下一个滞尘周期。非降水条件下, 部分极微小的颗粒通过气孔直接进入植物体内参与生长循环, 若沉积在叶片上的颗粒物过多, 则会引起植物的机械性烧伤、阻塞气孔、减弱叶片光合作用等问题, 从而影响植被的生长发育^[17]。因此, 进一步探明颗粒物的再排放与再悬浮问题, 是准确评估植被与 $PM_{2.5}$ 互作关系的关键。

3.2 对植被生长发育的影响

颗粒污染物对植被的危害主要表现为失绿和坏死。失绿是指植物绿色部分的退化, 是植物对大气颗粒物最重要、最普遍的特征反应。研究表明, 叶片受到大气颗粒物污染的影响后, 叶绿素 C_a/C_b 值呈上升趋势, 叶绿素总含量下降, 在光合和呼吸作用过程中, 还可通过气孔等吸收包含重金属的颗粒物^[43,44]; Prusty 等^[21]研究发现, 颗粒物滞留量多的叶片中总叶绿素含量较低; Vinit-Dunand 等^[45]也证实, 植被吸收含铜颗粒物过多时, 叶片会出现黄化症状, C_a/C_b 比值及光合速率均下降; 李海梅等^[46]研究表明, 金叶女贞(*Ligustrum vicaryi* Hort)的 C_a/C_b 比值变化较大, 滞尘能力较弱, 火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li)的 C_a/C_b 比值升高幅度较小, 抗污染能力较强。坏死是由于植物长期受到外界胁迫而导致自身生理机能消失的现象。有研究表明, 颗粒污染物可影响植被的生理, 重金属和有毒物质通过气孔直接进入植物体内, 导致一些物种的损伤和死亡^[47]。植物叶片由于长期附着大量颗粒物, 可导致出芽、授粉、光的吸收/反射等生理过程破坏以及气孔堵塞。苏行等^[48]研究证实, 大气污染物可削弱植物的传能转能效率和非环式电子传递的量子效率, 增大光能用于非光化学反应的热耗散比例, 进而影响到叶片的光合能力。也有研究指出, 大气颗粒物污染可引起一些间接影响, 如植物易染病或改变其遗传结构。

4 森林植被对 $PM_{2.5}$ 调控作用的研究重点和趋势

目前, 全国大部分地区的大气环境污染形势严峻, 尤其是 $PM_{2.5}$ 的污染已成为亟待解决的问题, 通过对颗粒物的时空分布及不同下垫面大气颗粒物分布的研究, 已证明森林植被对大气颗粒物的沉降和消减有积极作用。目前针对植物滞尘效应的研究主要集中在总悬浮颗粒物(TSP)和粗颗粒物

(PM_{10})上, 而森林植被净化 $PM_{2.5}$ 的研究较少, 其颗粒物时空分布的研究数据是零散、间断、缺乏系统性和连续性的。此外, 植被对 $PM_{2.5}$ 阻滞、吸附研究多集中在对植被的负面影响上。然而, 还有很多领域值得研究, 如植被吸附 $PM_{2.5}$ 能力的测定、植被滞尘量、滞尘机理、高吸附植物的筛选等。未来的研究中, 应分区域筛选具有较强吸附 $PM_{2.5}$ 能力的本土植物, 综合不同植被对 $PM_{2.5}$ 的阻滞吸收能力及植物的抗性确定不同区域的先锋植被, 综合评价不同植被配置结构吸附 $PM_{2.5}$ 的效应。总之, 综合植被的滞尘量、抗逆性和优化空间配置将是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Pope III CA, Ezzati M, Dockery DW. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States [J]. *N Engl J Med*, 2009, 360: 376–386.
- [2] Goudarzi G, Mohammad S, Fatemeh K. Particulate matter and bacteria characteristics of the Middle East Dust (MED) storms over Ahvaz, Iran [J]. *Aerobiologia*, 2014, 30(4): 345–356.
- [3] Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. *Urban For For Urban Gree*, 2006, 4(3–4): 115–123.
- [4] Yang J, McBride J, Zhou JX, Sun ZY. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction [J]. *Environ Pollut*, 1998, 99(3): 347–360.
- [5] Escobedo FJ, Nowak DJ. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest [J]. *Landscape Urban Plan*, 2009, 90: 102–110.
- [6] Dzieranowski K, Popek R, Gawrońska H, Saebø A, Gawroński SW. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species [J]. *Int J Phytoremediat*, 2011, 13: 1037–1046.
- [7] Hwang H, Yook S, Ahn K. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves [J]. *Atmos Environ*, 2011, 45: 6987–6994.
- [8] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 张慧兰. 细颗粒物($PM_{2.5}$)与植被关系的综述 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2203–2210.
- Zhao CX, Wang YJ, Wang YQ, Zhang HL. Interactions between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and vegetation: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2203–2210.
- [9] Popek R, Gawrońska H, Wrochna M, Gawroński SW, Saebø A. Particulate matter on foliage of 13 woody species: Deposition on surfaces and photostabilisation in waxes a 3-year study [J]. *Int J Phytoremediat*, 2013, 15: 245–256.
- [10] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces [J]. *Sci Total Environ*, 2012, 5(427–428): 347–354.
- [11] Song Y, Maher BA, Li F, Wang X, Sun X. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution [J]. *Atmos Environ*, 2015, 105(1): 53–60.
- [12] McDonald AG, Bealey WJ, Fowler D, Dragosits U, Skiba U, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and deposition of PM_{10} in two UK conurbations [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41(38): 8455–8467.
- [13] 吕伶俐, 李洪远, 杨佳楠. 植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 524–533.
- Lü LY, Li HY, Yang JN. The temporal-spatial variation characteristics and influencing factors of absorbing air particulate matters by plants: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(2): 524–533.
- [14] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃. 7种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2361–2367.
- Liu L, Fang YM, Wang SC, Xie Y, Yang DD. Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven trees species [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2361–2367.
- [15] 熊治廷. 环境生物学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [16] 陈玮, 何兴元, 张粤, 孙雨, 王文菲, 宁祝华. 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.
- Chen W, He XY, Zhang Y, Sun Y, Wang WF, Ning ZH. Dust absorption effect of urban conifers in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 14(12): 2113–2116.
- [17] Tomašević M, Vukmirović Z, Rajšić S, Tasić M, Stevanović B. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area [J]. *Chemosphere*, 2005, 61(6): 753–760.
- [18] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 高尚玉. 北京市春季天气状况对针叶树叶面颗粒物附着密度的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 998–1002.
- Wang L, Ha S, Liu LY, Gao SY. Effects of weather condition in spring on particulates density on conifers leaves in Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 998–1002.
- [19] 孙晓丹, 李海梅, 郭霄, 孙丽. 10种灌木树种滞留大气颗粒物的能力 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 1047–1054.
- Sun XD, Li HM, Guo X, Sun L. Atmospheric particulates-

- retaining capacity of ten shrubs species [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2): 1047–1054.
- [20] 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.
- Zhao ST, Li XY, Li YM. The Characteristics of deposition of airborne particulate matters with different size on certain plants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 271–276.
- [21] Prusty BAK, Mishra PC, Azeez PA. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2005, 60(2): 228–235.
- [22] Jamil S, Abhilash PC, Singh A, Singh N, Behl HM. Fly ash trapping and metal accumulating capacity of plants: implication for green belt around thermal power plants[J]. *Landscape Urban Plan*, 2009, 92: 136–147.
- [23] Freer-Smith PH, Holloway S, Goodman A. The uptake of particulate by an urban woodland: site description and particulate composition[J]. *Environ Pollut*, 1997, 95(1): 27–35.
- [24] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wet ability[J]. *New Phytol*, 1998, 13: 91–98.
- [25] Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylo G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. *Environ Pollut*, 1998, 99(3): 347–360.
- [26] Fernández Espinosa AJ, Rossini Oliva S. The composition and relationships between trace element levels in inhalable atmospheric particles (PM₁₀) and in leaves of *Nerium leander* L. and *Lantana camara* L. [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(10): 1665–1672.
- [27] Beckett KP, Freer-Smith P, Taylor G. Effective tree species local air-quality management[J]. *Journal of Arboriculture*, 2000, 26(1): 12–19.
- [28] Sharma SC, Roy RK. Greenbelt—an effective means of mitigating industrial pollution[J]. *Ind J Environ Prot*, 1997, 17(10): 724–727.
- [29] 陆锡东, 李萍娇, 贺庆梅, 牟广福, 苏盛. 宜州城区5种行道树叶表面特征及滞尘效果比较[J]. 河池学院学报, 2014, 34(5): 37–43.
- Lu XD, Li PJ, He QM, Mu GF, Su S. Comparison of the leaf surfaces features and dust retention effect of five common lane trees in Yizhou city[J]. *Journal of Hechi University*, 2014, 34(5): 37–43.
- [30] 郭鑫, 张秋良, 唐力, 胡晋茹. 呼和浩特市几种常绿树种滞尘能力的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 62–65.
- Guo X, Zhang QL, Tang L, Hu JR. Study on the dust catching property of the several evergreen conifers in Huhhot[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 62–65.
- [31] Tiwary A, Sinnett D, Peachey C, Chalabi Z, Vardoulakis S, et al. An integrated tool to assess the role of new planting in PM₁₀ capture and human health benefits: a case study in London[J]. *Environ Pollut*, 2009, 157(10): 2645–2653.
- [32] Szönyi M, Sagnotti L, Hirt AM. A refined biomonitoring study of airborne particulate matter pollution in Rome, with magnetic measurements on *Quercus ilex* tree leaves[J]. *Geophys J Int*, 2008, 173: 127–141.
- [33] Fowler D, Skiba U, Nemitz E, Choudhary F, Branford D. Measuring aerosol and heavy metal deposition on urban woodland and grass using inventories of ²¹⁰Pb and metal concentrations in soil[J]. *Water Air Soil Poll*, 2004, 4: 483–499.
- [34] 冯朝阳, 高吉喜, 田美荣, 林栋, 吕世海, 刘尚华. 京西门头沟区自然植被滞尘能力及效益的研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 155–159.
- Feng CY, Gao JX, Tian MR, Lin D, Lü SH, Liu SH. Research on dust absorption ability and efficiency of natural vegetation in Mentougou district, Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(5): 155–159.
- [35] 苏俊霞, 靳绍军, 闫金广, 张钦弟, 高瑞如, 卢英梅. 山西师范大学校园主要绿化植物滞尘能力的研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 20(2): 86–88.
- Su JX, Jin SJ, Yan JG, Zhang QD, Gao RR, Lu YM. Study on the dust catching property of the campus plants in Shanxi university[J]. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 20(2): 86–88.
- [36] 张新献, 古润泽, 陈自新, 李延明, 韩丽莉, 李辉. 北京城市居民区绿地的滞尘效益[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 14–19.
- Zhang XX, Gu RZ, Chen ZX, Li YM, Han LL, Li H. Dust removal by green areas in the residential quarters of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 19(4): 14–19.
- [37] 孙淑萍, 古润泽, 张晶. 北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物(PM₁₀) [J]. 中国园林, 2004, 20(3): 77–79.
- Sun SP, Gu RZ, Zhang J. Inhalable particulate matter (PM₁₀) related to different green cover percentage and greenbelt types in Beijing[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2004, 20(3): 77–79.
- [38] 粟志峰, 刘艳, 彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境检测, 2002, 16(3): 162–163.
- Li ZF, Liu Y, Peng QF. Study on dust detention function of the different greenland[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2002, 16(3): 162–163.

- [39] 王国玉, 白伟岚, 李新宇, 赵松婷. 北京地区消减PM_{2.5}等颗粒物污染的绿地设计技术探析 [J]. 应用生态学报, 2014, 21(12): 3077–3082.
- Wang GY, Bai WL, Li XY, Zhao ST. Research of green-belt design technology on PM_{2.5} pollution reduction in Beijing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 16(3): 162–163.
- [40] Ould-Dada Z, Copplestone D, Toal M, Shaw G. Effect of forest edges on deposition of radioactive aerosols [J]. *Atmos Environ*, 2002, 36(36–37): 5595–5606.
- [41] Tai APK, Mickley LJ, Jacob DJ. Correlation between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: implication for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change [J]. *Atmos Environ*, 2010, 44(32): 3976–3984.
- [42] Witherspoon JP, Taylor FG Jr. Retention of a fallout stimulant containing ¹³⁴Cs by pine and oak trees [J]. *Health Phys*, 1969, 17(6): 825–829.
- [43] Uzu G, Sobanska S, Sarret G, Muñoz M, Dumat C. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 1036–1042.
- [44] Schönherr J, Luber M. Cuticular penetration of potassium salts: effects of humidity, anions, and temperature [J]. *Plant Soil*, 2001, 236: 117–122.
- [45] Vnit-Dunand F, Epron D, Alaoui-Sosse B, Badot PM. Effects of copper on growth and on photosynthesis mature and expanding leaves in cucumber plants [J]. *Plant Sci*, 2002, 163(1): 53–58.
- [46] 李海梅, 刘霞. 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1659–1662.
- Li HM, Liu X. Relationships between leaf epidermal morphology and dust retaining capability of main garden trees in Chengyang district of Qingdao city [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1659–1662.
- [47] Fernández Espinosa AJ, Rossini Oliva S. The composition and relationships between trace element levels in inhalable atmospheric particles (PM₁₀) and in leaves of *Nerium oleander* L. and *Lantana camara* L. [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(10): 1665–1672.
- [48] 苏行, 胡迪琴, 林植芳, 林桂珠, 孔国辉, 彭长连. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 599–604.
- Su X, Hu DQ, Lin ZF, Lin GZ, Kong GH, Peng CL. Effect of air pollution on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants in Guangzhou [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2002, 26(5): 599–604.

(责任编辑: 周媛)