

DOI: 10.5846/stxb201904250853

包红光,王成,杜万光,郭二果,王晓磊,贺然.基于实地监测的城市林木调控 $PM_{2.5}$ 能力研究.生态学报,2020,40(14):4699-4709.

Bao H G, Wang C, Du W G, Guo E G, Wang X L, He R. $PM_{2.5}$ regulation capacity of urban trees in field monitoring studies: A review. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14):4699-4709.

基于实地监测的城市林木调控 $PM_{2.5}$ 能力研究

包红光^{1,2}, 王 成^{2,*}, 杜万光^{2,3}, 郭二果^{2,4}, 王晓磊^{2,5}, 贺 然⁶

1 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010018

2 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室 国家林业和草原局城市森林研究中心, 北京 100091

3 北京市园林绿化局, 北京 100013

4 呼和浩特市环境监测中心站, 呼和浩特 010030

5 东营市水务局, 东营 257091

6 北京植物园, 北京 100000

摘要:随着城市的不断扩张, $PM_{2.5}$ 污染凸显,引起广泛关注。研究表明,城市林木为城市环境提供了重要的生态保障,在调控、缓解、降低城市 $PM_{2.5}$ 污染危害等方面发挥极其重要的作用,通过筛选树种、优化配置结构、提高林木质量等方面进行城市林木前瞻性布局。然而,结合前期研究基础如何进一步深入研究并研究突破城市林木调控 $PM_{2.5}$ 污染机制与机理,实现调控 $PM_{2.5}$ 效应的最大化、最优化,依然是一个亟待解决的难题,这迫切需要在多尺度、多维度进行调控 $PM_{2.5}$ 效应研究,并在不同尺度、不同维度进一步进行结合、延伸。对基于实地监测的城市林木调控 $PM_{2.5}$ 能力研究现状相关文献进行归纳总结,并从林木单位叶面积与形态特征、配置结构特征、气象条件以及其他因素等方面归纳城市林木调控 $PM_{2.5}$ 机制,同时从城市林木调控 $PM_{2.5}$ 效应的时空变化特征、水平距离和垂直变化特征、内外变化特征等方面总结城市林木调控 $PM_{2.5}$ 时空特征。最终提出研究城市林木调控 $PM_{2.5}$ 效应目前存在的主要问题以及未来研究展望。

关键词:城市林木; $PM_{2.5}$;实地监测;调控;影响因素

$PM_{2.5}$ regulation capacity of urban trees in field monitoring studies: A review

BAO Hongguang^{1,2}, WANG Cheng^{2,*}, DU Wanguang^{2,3}, GUO Erguo^{2,4}, WANG Xiaolei^{2,5}, HE Ran⁶

1 Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration Urban Forest Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 Beijing Gardening and Greening Bureau, Beijing 100013, China

4 Hohhot Environment Monitoring Station, Hohhot 010030, China

5 Dongying Water Authority, Dongying 257091, China

6 Beijing Botanical Garden, Beijing 100000, China

Abstract: With the development of urbanization, $PM_{2.5}$ pollution is prominent, more and more attention has been focused on $PM_{2.5}$ pollution in the cities. The research showed that urban trees provides an important ecological guarantee for the urban environment, plays an extremely important role in regulating, alleviating and reducing the urban $PM_{2.5}$ pollution hazards, and carries out the forward layout of urban trees by selecting tree species, optimizing the configuration structure and improving the quality of forest trees. However, how to further study the mechanism of $PM_{2.5}$ pollution regulation by urban

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2019BS03018);林业公益性行业科研专项经费项目(201404301);内蒙古农业大学引进优秀博士第三层次(NDYB2016-19);内蒙古农业大学林学院双一流建设横向课题经费(203-170009)

收稿日期:2019-04-25; **网络出版日期:**2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wch8361@163.com

trees and realize the maximization and optimization of $PM_{2.5}$ effect is still a problem to be solved. It is urgent to conduct the study of $PM_{2.5}$ effect in multi-scale and multi-dimensional, and further combine and extend in different scales and dimensions. In this paper, based on the field monitoring of the $PM_{2.5}$ capacity of urban trees regulation, the relevant literature regarding the $PM_{2.5}$ mechanism of urban trees regulation was summarized in terms of the unit leaf area and morphological characteristics, configuration structure characteristics, meteorological conditions and other factors. At the same time, the temporal and spatial characteristics of urban trees regulation $PM_{2.5}$ were concluded in terms of the temporal change characteristics, horizontal distance and vertical change characteristics, internal and external change characteristics of the $PM_{2.5}$ effect of urban trees regulation. Finally, the paper puts forward the main problems and future research prospects of $PM_{2.5}$ effect of urban trees regulation.

Key Words: urban trees; $PM_{2.5}$; field monitoring; regulation; influencing factor

随着城市化进程加快,城市人口不断聚集,城市环境不断恶化,城市 $PM_{2.5}$ 污染引起人们的广泛关注。 $PM_{2.5}$ 粒径 $\leq 2.5 \mu m$, 具有沉降速度慢、滞留时间长、影响范围广、危害程度大等特点,给城市居民生活造成了诸多不利影响。许多城市因 $PM_{2.5}$ 污染所造成的健康和经济损失呈逐年上升趋势^[1],因 $PM_{2.5}$ 所引起的健康问题也屡见不鲜^[2-4]。城市林木为城市生态服务系统提供至关重要的保障,是城市绿色基础的基本组成^[5],是极好的天然过滤器,可以有效减少 $PM_{2.5}$ 污染,很多国家均把林木栽植作为首要的举措来改善空气质量^[6-7];其过滤功能,有助于大幅减少对人体健康造成的不利影响^[8]。目前,城市林木调控 $PM_{2.5}$ 污染效应主要通过实地监测进行研究,实地监测作为尺度外推的重要基础,监测数据能够直接、准确地表征城市林木 $PM_{2.5}$ 动态变化特征以及相关关系。本文基于实地监测的城市林木调控 $PM_{2.5}$ 效应的相关文献进行系统概述,从林木树种单位叶面积与形状特征、林木结构特征、时空变化特征、主要气象条件以及其他影响因素等方面进行归纳总结。

1 单位叶面积与形态特征

研究表明,单位叶面积大小以及叶表面微形态结构对吸滞 $PM_{2.5}$ 能力有直接影响,园林常见树种、经济林树种与生态树种调控 $PM_{2.5}$ 能力方面,通过直接采样、空气气溶胶再发生器,电镜扫描、水洗称重法、X 射线能谱仪、原子力显微镜 (AFM) 等方法进行定量和叶表面微形态结构进行对比分析^[9-15]。结果发现,不同监测地点和研究对象得出的研究结果和相应结论不尽相同,总体来看,大叶黄杨 (*Buxus megistophylla* Levl.)、小叶黄杨 (*Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng subsp. *sinica* var. *parvifolia* M. Cheng)、银杏 (*Ginkgo biloba* L.)、板栗 (*Castanea mollissima*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、柳树 (*Salix babylonica*)、金叶女贞 (*Ligustrum × vicaryi* Hort)、国槐 (*Euonymus japonicus* Thunb.)、雪松 (*Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don) 等树种单位面积滞留能力较为突出,这可能是由于环境中 $PM_{2.5}$ 为影响叶片表面滞留颗粒物数量的主要原因,也有学者认为,不同树种叶片在萌芽阶段、叶片生长阶段、满叶期阶段吸滞 $PM_{2.5}$ 表现均有不同,叶片结构越复杂越有利于吸附 $PM_{2.5}$ ^[16-18]。不同叶面微形态结构能影响滞留 $PM_{2.5}$,且不同叶面微形态结构均有差异表现,例如,形态结构(蜡质、绒毛、沟槽、条状、纹理、分泌物、自由能)、因针叶树种生长密度、冠幅大小、沟槽宽度、叶量、叶面倾角、接触角均与调控 $PM_{2.5}$ 能力有关,所受时间、地点的影响较小,相关内容还需进一步详细研究,下一步应依据不同地区或植物科属进行系统分类,定量与定性研究时宏观与微观相结合,进一步研究林木树种叶面微结构特征的同时,对林木树种及林分年滞留量进行动态研究,同时进行相互比较验证^[19-23]。

2 城市林木结构特征

2.1 城市林木不同树种调控 $PM_{2.5}$ 能力

城市林木是城市生态系统中具有自净功能的主要组成部分^[24-25],通过手持采样仪器进行定位监测、干沉

降、采样及称重、风洞模拟实验等得出不同树种调控 PM_{2.5} 能力。研究发现,针叶树种因其单位叶面积大的原因,吸滞 PM_{2.5} 能力表现较好,落叶乔木其次,草地吸滞 PM_{2.5} 表现能力最差^[17]。Lin 等^[26] 发现松树 (*Pinus*) 和杜松 (*Juniperus rigida* S. et Z.) 对细颗粒物的清除效率表现较好,同时发现,空气流通越大清除效率越高,种植密度越大则清除效率越低,其分枝方向不影响树种本身清除效率。有学者对全球范围内常见城市林木学削减 PM_{2.5} 能力进行研究,发现削减能力不突出,但悬铃木 (*Platanus acerifolia* (Aiton) Wild.), 银白槭 (*Acer saccharinum* L.), 美国皂荚 (*Gleditsia triacanthos* L.) 削减 PM_{2.5} 的能力高于平均水平,针叶树种相比较阔叶树种因其叶面积指数,树冠密度等因素清除 PM_{2.5} 能力较好,这也与其他学者研究结果相同^[17,27-29];也有学者长期监测发现,针叶树种清除 PM_{2.5} 能力 1.32 倍于阔叶树种^[30]。

2.2 城市林木不同配置结构调控 PM_{2.5} 能力

城市林木不同配置结构影响 PM_{2.5}^[7,31-32]。吴志萍等^[33] 发现,多层复合结构且绿量较大、郁闭度和覆盖度较高的绿地内 PM_{2.5} 要高于单层结构绿地,这可能是由于聚集效应形成内环境而造成局部效应;郭二果等^[34],王成等^[35] 发现,黄栌林、侧柏林和混交林内 PM_{2.5} 年均值均能到国家环境质量二级标准。段文军等^[36] 发现,深圳市园山森林公园整体上具有降低局部区域内 PM_{2.5},但不同监测点略有不同,山麓林、河谷林内表现为聚集效应,山脊林内为削减效应。有学者表明^[37],纯林绿地或乔草配置绿地削减 PM_{2.5} 表现最好,其余配置结构表现不明显。王轶浩等^[38] 发现,针叶林削减 PM_{2.5} 的作用优于其他林分,以及对颗粒物有再分配的作用。Gao 等^[39]、Liu 等^[40] 发现,针叶混交林和阔叶林内 PM_{2.5} 相比较其他林分表现较低,主要是由于夏季混交林表现为多维度结构和构造,以及造成的森林小气候对 PM_{2.5} 产生一定的影响,其中针叶林表现较为突出,同时发现冠层密度和叶面积指数对 PM_{2.5} 影响较为显著。古琳等^[41] 发现,不同配置结构绿地 PM_{2.5} 均低于道路 PM_{2.5};Zhao 等^[42] 认为夏季乔灌木、灌木结构对 PM_{2.5} 的吸滞能力最强。Wagner 等^[43]、Salmond 等^[44] 发现,应优化街道峡谷内城市林木配置结构,减少因林木植源性污染造成的 PM_{2.5} 污染;Janhäll 等^[45] 表明,为有效治理 PM_{2.5} 污染应优先选择较低或者贴近地面的树种,同时应注意靠近污染源。有学者认为^[5,46],城市林木调控 PM_{2.5} 的功能与其配置结构类型无关,甚至没有表现出特定的相关性,主要取决于城市林木面积的大小、连续性,并进一步表明城市林木在消除 PM_{2.5} 方面的潜在效果取决于多种因素的相关性以及城市林木自身的不确定性。Nowak 等^[6] 通过对比研究加拿大 86 个城市森林表明,树木冠层可以有效改善 PM_{2.5},但会导致树木冠层以下 PM_{2.5} 会升高。Liu 等^[47] 发现,北京市奥林匹克森林公园人工林树木冠层在不同季节 PM_{2.5} 削减率高于湿地和湖水表面。

2.3 城市林木面积大小调控 PM_{2.5} 能力

除不同树种以及林木结构影响城市林木调控 PM_{2.5} 能力之外,城市林木面积大小也会影响调控 PM_{2.5}。Hao 等^[48] 发现,通过绿道提高社区、城市边缘与城市郊区绿道、绿地的空间连接,确保绿色斑块之间的可达性,可以有效分散、稀释、缓解和降解 PM_{2.5}。Wu 等^[49] 表明,绿地覆盖率越大削减 PM_{2.5} 效应越显著,同时发现,其绿地覆盖率削减效应影响大于绿地总周长的影响。曹宏亮等^[50] 发现,通过增加常绿针叶林面积,可以有效调控上海市 PM_{2.5},通过提高城市森林面积可以发挥更大的生态系统服务。张祥^[51] 发现,绿地率大于 75% 的绿地类型对于减少 PM_{2.5} 具有明显效果。何亮^[52] 认为,绿地面积对削减 PM_{2.5} 并无显著相关,但表现为正值,说明在一定程度上绿地面积越大,其对 PM_{2.5} 净化效益越好。朱柳燕^[53] 发现,南京市常绿阔叶林春季半径为 1—2 km 范围,秋季半径为 2—3 km 范围的绿地面积;广州市常绿林半径为 5—6 km 范围,北京市干旱森林春季、秋季半径为 1—6 km 范围,夏季半径为 3—4 km 范围时可以有效减轻 PM_{2.5}。总体来说,不同地区因林木自身应用特点的不同城市林木面积大小调控 PM_{2.5} 能力有所差异。

3 影响 PM_{2.5} 主要气象条件及其他因素

城市绿地调控 PM_{2.5} 能力除了受叶表面积、林木结构、林木面积大小影响之外,气象条件、其他污染气体、

不同天气对城市林木调控 $PM_{2.5}$ 也具有一定影响。目前,有学者用气候模型、气象数据的存档以及实地监测研究 $PM_{2.5}$ 与气象因素之间的相关性^[54-56]。下面主要对降水(降雨、降雪)、温度、湿度、风速等气象因素,臭氧(O_3)、 NO_x 、 SO_2 ,不同天气条件影响调控 $PM_{2.5}$ 能力方面进行概述。

3.1 降水(降雨、降雪)

降雨能够洗脱植物叶表面滞留的颗粒物,使叶表面具有反复滞留颗粒物的能力,不同降雨量对 $PM_{2.5}$ 去除效果不同。郭二果等^[34]发现,降雨能使大气颗粒物,尤其为粗颗粒物浓度降低,但 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物浓度增加,可能是由于降雨首先冲刷减少粗颗粒物,所以小粒径所占比例会增加所导致。曹宏亮^[50]等发现,降水量和降雨时数增加时,上海市城市森林 $PM_{2.5}$ 下降,城市森林削减 $PM_{2.5}$ 总量会下降。陈波等^[57]对降雨前后对城市森林内 $PM_{2.5}$ 对比发现,雨前和雨中 $PM_{2.5}$ 波动较大,监测期间累计降雨量达 70 mm,雨后 1 d $PM_{2.5}$ 下降 (89.36 ± 4.78)% 左右,说明降雨对森林植被区域降低 $PM_{2.5}$ 作用更明显些。Przybysz 等^[58]通过模拟实验表明,20 mm 模拟降雨量对樟子松(*P. sylvestris*) $PM_{2.5}$ 等细颗粒物的冲刷量在 21%—30%,但大部分细颗粒物均留在树木枝条上。有部分学者研究结果与上述结果有所不同,5 d 总降雨量为 34 mm,对林内 $PM_{2.5}$ 变化影响不大,变化趋势一致;但在降雨量分别为 1 mm,27 mm 时,林内 $PM_{2.5}$ 无明显变化,但在 27 mm 雨后 2 h 林内 $PM_{2.5}$ 降幅最大,达 76.1%^[59]。刘辰明等^[15]研究不同树种在不同降雨条件对 $PM_{2.5}$ 冲刷率时发现,14 mm 降雨条件下大叶黄杨(*Buxus megistophylla* Levl.) $PM_{2.5}$ 冲刷接近 30%,栾树(*Koelreuteria paniculata*)、杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)对 $PM_{2.5}$ 没有冲刷作用,说明在特定降雨条件下对部分树种叶表面去除 $PM_{2.5}$ 能力有限,这可能与叶表面结构有一定关系,需进一步研究在降雨条件下不同林木树种调控 $PM_{2.5}$ 能力。总体来讲,降雨对 $PM_{2.5}$ 的影响具有不确定性,其作用也无统一结论,同时发现降雪影响城市林木调控 $PM_{2.5}$ 能力的研究较少,应加强研究降雪对于城市林木调控 $PM_{2.5}$ 的影响。

3.2 风速

城市林木可以阻碍风流,同时可以减少湍流动力学能量^[60]。有学者发现^[35,61-62], $PM_{2.5}$ 随着风速的增大而增加,且粒径越小,关系系数越大,这可能是由于风吹动树叶等摩擦机械作用产生气溶胶有关。陈波等^[20]研究发现风速在 0.4—5 m/s 之间时,植物园内 $PM_{2.5}$ 变化浮动不大,5.1 m/s 时植物园内 $PM_{2.5}$ 下降一倍左右,7.6 m/s 时植物园内 $PM_{2.5}$ 下降一倍以上, $PM_{2.5}$ 与空气相对湿度呈较好的一致性, $PM_{2.5}$ 与近地层逆温层的出现相对应,风速减小的同时逆温层加厚时 $PM_{2.5}$ 会持续积累,质量浓度升高。有学者发现,风速在 8 m/s 时与 $PM_{2.5}$ 呈正相关,大于 8 m/s 时与 $PM_{2.5}$ 呈负相关^[63]。将燕^[59]认为,当风速为 4 m/s 时,林内 $PM_{2.5}$ 下降 21.4%,风后 1 h 林内 $PM_{2.5}$ 下降 72.7%,风后 1 h 下降幅度达到最大。Jean 等^[64]在街道峡谷环境下通过 CFD(计算流体力学)模型模拟研究发现,风速为 4.6 m/s 时相比较风速为 1 m/s 城市林木滞留 $PM_{2.5}$ 效应更加显著,风速为 1 m/s 时 $PM_{2.5}$ 会增加 8%,这可能是由于当时风速下不会发生湍流分散作用而产生。总体来讲,不同学者对于风速与 $PM_{2.5}$ 的关系有不同的界定。

3.3 温度

太阳辐射与温度高低有直接的关系,大气及地面的累积温度升高,局部温度差异增大,空气流动性增强,使得 $PM_{2.5}$ 降低,同时随着日照时数的增加,加强大气的扩散能力,有利于大气中的 $PM_{2.5}$ 迁移和扩散^[65-67]。翟广宇等^[68]发现,日均气温在 -3—0℃ 之间时与 $PM_{2.5}$ 之间的线性关系较强,在日均气温 14—16℃ 时与 $PM_{2.5}$ 之间的相关性又有所增加,说明太阳辐射加速了水溶性离子形成的过程,从而使得 $PM_{2.5}$ 增加。

3.4 湿度

一般情况下 $PM_{2.5}$ 与相对湿度呈正相关,因不同季节相对湿度的变化 $PM_{2.5}$ 也有一定的变化,相对湿度越大加重 $PM_{2.5}$ 积聚污染^[41,66],同时也通过影响水溶性离子的成核和凝聚的过程影响 $PM_{2.5}$ ^[65,69]。有学者表明^[62],相对湿度达到一定程度后 $PM_{2.5}$ 呈一定阈值,阈值还需界定。研究发现,在一年大部分月份里 $PM_{2.5}$ 与相对湿度呈显著负相关,只有少数几个月份呈正相关,当相对湿度足够高时,颗粒物变得太重而不能留在空

中,进而生干沉降,使 PM_{2.5}下降^[70]。

3.5 臭氧(O₃)、NO_x、SO₂

高浓度 SO₂促进植物挥发性气体(VOCs)的排放^[71-72],挥发性气体(VOCs)对近地大气对流层臭氧光化学合成有显著影响,植物排放的挥发性气体(VOCs)将会导致大气对流层中臭氧(O₃)浓度上升,说明挥发性气体(VOCs)的排放与臭氧呈显著相关。城市林木产生的挥发性气体(VOCs)为臭氧前体物^[73],挥发性气体(VOCs)与 NO_x反应形成臭氧以及其他污染物^[74],同时发现挥发性气体(VOCs)为二次气溶胶的重要前体物,二次气溶胶是 PM_{2.5}的重要组成部分^[75-76]。如何准确量化挥发性气体(VOCs)向二次气溶胶的转化过程以及影响城市林木的生产力将是未来的重要研究工作,虽然 PM_{2.5}与臭氧没有直接的关系,但间接相关^[77]。总体来讲,臭氧(O₃)、NO_x、SO₂等气体复合效应对城市林木调控 PM_{2.5}有一定的影响。

3.6 不同天气状况

城市林木调控 PM_{2.5}受不同天气条件的影响。陈博等^[78]发现,晴朗天气景观生态林内 PM_{2.5}处于较低水平,雾霾天气下景观生态林内 PM_{2.5}具有增加效应,并且效果更佳明显,雾滴对 PM_{2.5}具有一定的清除作用。赵松婷等^[79]对北京市小公园绿地内 PM_{2.5}进行监测,发现无污染、轻度污染(PM_{2.5} ≤ 150)、中度污染(115 < PM_{2.5} ≤ 150)天气条件下,公园绿地对 PM_{2.5}有一定的滞留作用,重度污染及以上(PM_{2.5} > 150)天气条件下,公园绿地对 PM_{2.5}滞留作用受到一定的制约,说明公园绿地调控 PM_{2.5}能力受不同天气条件的影响。丛岭等^[80]证实,林地空气质量优、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染时对 PM_{2.5}阻滞率分别为 289.7%, 19.9%, 65.6%, 97.2%, 14.99%, 说明在不同空气质量等级背景条件下林地阻滞 PM_{2.5}效果有所差异。有学者认为^[35,57,61],多云和雾霾天气使城市森林内 PM_{2.5}显著增加,尤其为高温高湿“桑拿天”,能使郁闭度较大城市森林内细颗粒物垂直扩散受到影响,其 PM_{2.5}所占比例显著增加。

4 城市林木调控 PM_{2.5}时空特征

4.1 城市林木调控 PM_{2.5}时间变化特征

4.1.1 季节、月份变化规律

城市林木在不同季节、不同月份生长势有所不同,因此城市林木调控 PM_{2.5}能力季节变化、月份变化有所差异。陈波等^[14]发现,柳树(*Salix babylonica*)、五角枫(*Acer mono*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、杨树(*Populus spp*)对 PM_{2.5}吸附量秋季高于夏季,可能是由于秋季各树种湿润性大于夏季所致。Chen 等^[30]发现,北京市一年内 PM_{2.5}最高的均为海淀万柳(非植被区),而最低的为海淀北京植物园内,海淀万柳(非植被区)PM_{2.5}要高于北京植物园 83.33%,可能是由于植被区的吸滞 PM_{2.5}作用而引起。王成等^[35]发现,北京西山不同游憩林内 PM_{2.5}变化规律总体上呈现冬季最高,夏季、秋季次之,春季最低变化规律。Gao 等^[39]发现,六种不同城市绿地内 PM_{2.5}秋季较比其他季节要高,夏季 PM_{2.5}显著低于其他季节,尤其为 8 月、10 月。古琳等^[41]对香樟林(*Cinnamomum camphora*)、湿地松林(*Pinus elliotii*)、栓皮栎林(*Quercus variabilis*)内 PM_{2.5}变化研究发现,季节变化特征为春季>冬季>秋季>夏季。Hua 等^[81]研究北京市道路防护林内 PM_{2.5}季节、月份变化规律,发现季节变化为冬季>秋季>夏季,夏季 PM_{2.5}显著低于其他季节,尤其在八月和十月,可能是由于夏季植被生理活动旺盛导致。史宇等^[82]发现,北京市林地 PM_{2.5}季节变化为冬季>春季>秋季>夏季,林地覆盖率较高的区域对 PM_{2.5}有一定的削减作用,同时发现下垫面为林地的区域 PM_{2.5}在各个季节均表现为较低值,说明林地覆盖率与 PM_{2.5}呈负相关,至于林地覆盖面积与 PM_{2.5}之间的关系,需进一步研究。李少宁等^[83]发现北京市大兴区南海子公园植被区冬季 PM_{2.5}明显高于其他季节,最低值出现在夏季 6 月、8 月。汪结明等^[84]发现,长沙市不同类型园林绿地 PM_{2.5}月份表现为 10 月最低,8 月最高,季节变化为夏季>冬季>春季>秋季,这可能是由于夏季高温高湿气候持续时间较长导致不同类型园林绿地 PM_{2.5}较为突出。陈波等^[85]、鲁绍伟等^[86]发现北京市植物园、西山典型游憩林内 PM_{2.5}季节变化均为冬季>春季>秋季>夏季,可能是由于冬季大气层更为稳定,降水

少,不利于湿沉降发生所导致。苏维等^[87]发现南昌市林地斑块林冠层春季、夏季、秋季削减 $PM_{2.5}$ 差异不显著,但均高于冬季削减率,可能是由于城市森林斑块总叶面积的大小影响削减 $PM_{2.5}$ 程度,总叶面积大,林地斑块滞留 $PM_{2.5}$ 越多,净化效果越明显。总体来说,一般情况下冬季城市林木内 $PM_{2.5}$ 最高,夏季 $PM_{2.5}$ 最低,但也有夏季最高等情况出现,除 $PM_{2.5}$ 受到季节等因素之外,林地覆盖面积、林木冠层面积均在不同季节影响 $PM_{2.5}$ 的原因。

4.1.2 日变化规律

Gao 等^[39]对六种不同绿地内 $PM_{2.5}$ 日变化规律进行监测研究发现,在黎明和黄昏 $PM_{2.5}$ 较高,中午时候出现较低值,相比较黄昏,黎明时较比黄昏低,晚间和黄昏均出现较高数值的 $PM_{2.5}$,这可能是由于空气中较高的湿度引起的。郭含文等^[88]发现,绿地率不同对 $PM_{2.5}$ 有一定的影响,绿地率越高其 $PM_{2.5}$ 日变化幅度很小;王轶浩等^[38]研究重庆城郊森林 $PM_{2.5}$ 时发现,下午 $PM_{2.5}$ 低于上午,12:00 时出现峰值,19:00 时出现最低值;段文军等^[36]发现,深圳市园山风景区内夏季 $PM_{2.5}$ 日均值达到一类环境功能区要求,说明风景区有较为稳定的内环境。陈上杰等^[89]发现,北京市五环路道路绿化带内外 $PM_{2.5}$ 变化基本一致,峰值出现在 8:00 时、18:00 时,谷值出现在 16:00 时,同时发现单位三维绿量与 $PM_{2.5}$ 显著正相关。监测时段内受到不同时间段车流量、人流量以及气象因素的影响,城市林木内 $PM_{2.5}$ 出现峰值、最低值的时段有所不同,除车流量、人流量、气象因素之外,监测点的位置、绿地率、单位面积三维绿量均对 $PM_{2.5}$ 日变化有一定的影响。除此之外,峰值、谷值的不同还与当时的人流量、车流量等情况也有很大的关系,需进一步深入研究。

4.2 城市林木调控 $PM_{2.5}$ 空间变化特征

4.2.1 城市林木调控 $PM_{2.5}$ 水平变化特征

城市林木调控 $PM_{2.5}$ 不仅受林木树种、配置结构以及面积大小的影响还与林木边界的距离等因素有关。Chen 等^[90]发现,白杨林(*Populus tomentosa*)内 $PM_{2.5}$ 距路缘 40 m 处达到最高值,之后开始下降,说明毛白杨林(*Populus tomentosa*)距路缘 40 m 以上能有效阻滞 $PM_{2.5}$ 污染。李素莉等^[91]发现,道路防护林距道路不同水平观测点 $PM_{2.5}$ 有升有降,并没表现出特定的规律,说明道路防护林对道路来源 $PM_{2.5}$ 扩散具有一定影响。陈上杰等^[89]发现,道路防护林不同宽度处 $PM_{2.5}$ 阻滞作用比较复杂,但距道路 50 m 外 $PM_{2.5}$ 下降到一定程度并趋于稳定。包红光^[92]则证实,城市公园绿地环城高速路、城市主干道 165 m,距城市次干道 60 m 以上宽度处 $PM_{2.5}$ 表现为下降趋势,并持续下降,这与 Viippola 等^[93]研究结果不尽相同,因 $PM_{2.5}$ 有较长时间停留等特点,不会随道路距离的增加而增加,反而会造成较高的内环境。Tiway 等^[94]发现,宽度为 2.2 m 的山楂树篱可以有效减少 $PM_{2.5}$ 浓度,树篱高度为 1.6 m 时会达到最佳滞留 $PM_{2.5}$ 效果。有学者对城市水平梯度景观格局调控 $PM_{2.5}$ 能力研究发现,北京市五环道路绿地以外 $PM_{2.5}$ 单位面积削减量、削减总量以及去除率均高于五环以内城市道路绿地^[95]。总体来讲,城市林木在不同立地环境条件下所能阻滞 $PM_{2.5}$ 有效半径有所不同。

城市林木调控 $PM_{2.5}$ 水平调控效益还与天气状况及污染程度相关。王晓磊等^[96]发现,在晴天、多云、雨后阴天等不同天气条件下,城市街头绿地距路缘 55—85 m、40—85 m、55 m 处对 $PM_{2.5}$ 净化效益较好;同时李新宇等^[97]发现,道路绿地在无污染或者轻度污染条件下距路缘 6 m、16 m、26 m、36 m 处均能表现出对 $PM_{2.5}$ 不同程度的削减作用,中度污染或者重度污染条件下各个观测点削减作用不明显,甚至会出现无作用的观测点。

4.2.2 城市林木调控 $PM_{2.5}$ 垂直变化特征

Jin 等^[46]发现,由樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)、法国梧桐(*Platanus orientalis* Linn.)组成的道路绿地在 0.3 m、1.5 m、4 m、8 m、12 m 垂直高度处在不同季节调控 $PM_{2.5}$ 能力为递减趋势,说明道路绿地林冠层部分 $PM_{2.5}$ 削减能力较好。鲁绍伟等^[98]对不同海拔高度油松林吸附 $PM_{2.5}$ 研究发现,低海拔的植物吸附多于高海拔,这可能是由于不同海拔高度叶表面形态特征有关。相对于 $PM_{2.5}$ 水平变化规律,垂直变化规律的研究相对较少,以后可以重点研究城市林木内 $PM_{2.5}$ 垂直变化规律。杨貌等^[99]研究道路不同绿地配置不同模式 $PM_{2.5}$ 削减作用时发现,垂直向下 1.5—3 m 高度方向上对 $PM_{2.5}$ 有明显的削减作用,植被郁闭度、疏透度以及配

置类型是影响垂直削减作用的主要因素。Abhijith 等^[60]表明,在街道峡谷环境中,较高的林木会导致空气质量恶化,而较低的林木会改善空气质量状况。Sun 等^[18]对监测鹫峰国家森林公园 PM_{2.5}发现,仅在侧柏林内 15 m 时浓度高于 9 m 时的浓度。

4.2.3 城市林木内外调控 PM_{2.5} 变化特征

不同学者对城市林木内外 PM_{2.5} 变化研究状况均有所不同。Chen 等^[30]发现,白蜡纯林、胡杨纯林内 PM_{2.5} 高于纯林外,可能是由于纯林空间结构影响小气候的同时细颗粒物被林带内叶子和树枝拦截并通过干沉降和湿沉降到达地面,故而林内 PM_{2.5} 高于林外。Jin 等^[46]发现,城市林木冠层密度和叶面积指数分别为 50%—60%、1.5—2.0 时调控 PM_{2.5} 效益达到最佳。Liu 等^[40]发现纯林内 PM_{2.5} 因积聚效应均比空白对照要高,除此之外,呼吸作用和一系列化学反应会使 PM_{2.5} 悬浮于叶片上,同时植物的呼吸作用和较高的相对湿度更有利于 PM_{2.5} 沉积,使纯林内 PM_{2.5} 积聚升高。陈上杰^[89]等认为,大多数监测时段混交林内 PM_{2.5} 较高,并发现不同林带出现的状况有所不同;但也有学者持不同观点,李新宇等^[100]认为公园绿地内 PM_{2.5} 要比公园外裸露地低 20%。总体来讲,城市林内外 PM_{2.5} 差异的情况是由于不同植被叶片、配置结构、郁闭度、疏透度以及当时的气象因素等情况所导致。

5 存在问题与研究展望

实地监测能够直观、准确地表征城市林木调控 PM_{2.5} 的影响,但研究过程中仍有以下不足。基于城市林木调控 PM_{2.5} 研究大多集中在叶片微结构,树种以及林分尺度上^[9-15,16-23]。不管从单位叶面积以及形态结构特征上,其监测结果均证明城市林木不同树种对调控 PM_{2.5} 具有明显作用,因不同树种单位叶面积以及微形态特征存在较大差异^[9-15,16-18],仅考虑以上因素不足以指导城市林木调控 PM_{2.5} 的树种选择,并且对于树种的选择较为随机^[17,26-29]。下一步应系统有效的进行地区、树种分类,有利于从单叶调控 PM_{2.5} 能力尺度上推至单木再到林分进行对比分析行,同时从城市与区域等不同尺度上提出切实、可操作的城市林木种植规划方案,充分发挥城市林木生态环境效益。

城市林木调控 PM_{2.5} 机制方面研究成果较多,但调控机理问题研究较少,具体表现为数据有限并且较难相互比较和验证,叶片微结构和生理机制及机理对调控 PM_{2.5} 的作用还需大量研究和数据积累。城市林木调控 PM_{2.5} 的研究大多涉及日变化及季节变化^[30,35-36,38-39,41,81-86,88-89,91],而对于连续几天、不同天气条件下,或者连续几年的持续性研究较少^[101]。多数研究通过选择晴朗无风的条件进行观测,以排除其他或者特殊气象因素的影响,并且主要以在林木种类、林木结构或林木面积大小对调控 PM_{2.5} 能力为主,很少涉及特殊天气,例如,不同降水量、降水前后、不同等级污染、不同等级风速等气象因素作为观测变量的研究。下一步应在气象因素变量多样化的基础上,研究城市林木调控 PM_{2.5} 时间变化特征。

城市林木调控 PM_{2.5} 的距离衰减效应主要集中在水平方向上^[90-97]。通过定量评估 PM_{2.5} 二维空间变化,其结果主要为提高城市林木在不同水平方向、垂直方向调控 PM_{2.5} 提供有效依据,但不同空间尺度的城市林木与 PM_{2.5} 之间的关系仍然不明确,更很少同时涉及水平方向以及垂直方向结合的三维空间上。近年来,随着数值模拟方法得到广泛应用以及计算机运用能力的不断提高^[64,102-103],计算机模拟方法逐渐流行,涌现出大量模拟软件,模拟与实地监测相结合为城市林木调控 PM_{2.5} 三维研究提供机遇。下一步应深入探究城市林木调控 PM_{2.5} 效应的三维特征,将有利于更好地挖掘其三维空间变化的影响机制,从而更好地指导城市林木的种植规划与空间优化,进而实现城市林木调控 PM_{2.5} 效益的最大化、最优化^[104-105]。

参考文献 (References):

- [1] 饶莉,陈锐凯,钱宽,邓力,安永兵,刘思瑶,郝汉舟. 武汉市 PM_{2.5} 的健康损失评价. 中国农学通报, 2016, 32(11): 161-166.
- [2] Zhang A, Qi Q W, Jiang L L, Zhou F, Wang J F. Population exposure to PM_{2.5} in the urban area of Beijing. PLoS One, 2013, 8(5): e63486.
- [3] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM_{2.5} in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. Particuology, 2014, 13: 1-

- 26.
- [4] Lu F, Xu D Q, Cheng Y B, Dong S X, Guo C, Jiang X, Zheng X Y. Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in the Chinese population. *Environmental Research*, 2015, 136: 196-204.
- [5] Botalico F, Chirici G, Giannetti F, De Marco A, Nocentini S, Paoletti E, Salbitano F, Sanesi G, Serenelli C, Travaglini D. Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 8: 243-251.
- [6] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 2014, 193: 119-129.
- [7] Wu J S, Xie W D, Li W F, Li J C. Effects of urban landscape pattern on PM_{2.5} pollution—a Beijing case study. *PLoS One*, 2015, 10 (11): e0142449.
- [8] Carrus G, Scopelliti M, Laforteza R, Colangelo G, Ferrini F, Salbitano F, Agrimi M, Portoghesi L, Semenzato P, Sanesi G. Go greener, feel better? The positive effects of biodiversity on the well-being of individuals visiting urban and peri-urban green areas. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 134: 221-228.
- [9] 谢滨泽, 王会霞, 杨佳, 王彦辉, 石辉. 北京常见阔叶绿化植物滞留 PM_{2.5} 能力与叶面微结构的关系. *西北植物学报*, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [10] 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. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 271-276.
- [11] 王兵, 张维康, 牛香, 王晓燕. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究. *环境科学*, 2015, 36(2): 408-414.
- [12] 罗佳, 田育新, 周小玲, 曾掌权, 陈建华, 韩云娟, 陈艺. 几种生态树种滞留 PM_{2.5} 等颗粒污染物能力研究. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 41-44, 49-49.
- [13] 罗佳, 田育新, 李锡泉, 周小玲, 曾掌权, 陈建华, 韩云娟. 湖南主要经济林树种滞留 PM_{2.5} 等颗粒污染物能力研究. *经济林研究*, 2017, 35(1): 15-19.
- [14] 陈波, 蒋燕, 鲁绍伟, 李少宁, 陈鹏飞, 刘海龙, 赵东波. 北京西山不同树种夏秋季 PM_{2.5} 吸附量与润湿性关系. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(2): 113-119.
- [15] 刘辰明, 张志强, 陈立欣, 邹瑞, 张璐, 高源, 李冬梅. 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2353-2361.
- [16] 石婕, 刘庆倩, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 郭惠红, 夏新莉. 不同污染程度下毛白杨叶表面 PM_{2.5} 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究. *生态学报*, 2015, 35(22): 7522-7530.
- [17] Nguyen T, Yu X X, Zhang Z M, Liu M M, Liu X H. Relationship between types of urban forest and PM_{2.5} capture at three growth stages of leaves. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27: 33-41.
- [18] Sun F B, Yin Z, Lun X X, Zhao Y, Li R N, Shi F T, Yu X X. Deposition velocity of PM_{2.5} in the winter and spring above deciduous and coniferous forests in Beijing, China. *PLoS One*, 2014, 9(5): e97723.
- [19] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 石辉, 王彦辉. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 384-392.
- [20] 陈波, 刘海龙, 赵东波, 陈鹏飞, 鲁绍伟, 李少宁. 北京西山绿化树种秋季滞纳 PM_{2.5} 能力及其与叶表面 AFM 特征的关系. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 777-784.
- [21] 李少宁, 鲁绍伟, 刘斌, 鲁笑颖, 陈军丽, 李辉. 北京主要绿化树种叶表面微形态与 PM_{2.5} 吸附能力. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(8): 98-107.
- [22] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. *生态学报*, 2015, 35(6): 1696-1705.
- [23] Chiam Z, Song X P, Lai H R, Tan H T W. Particulate matter mitigation via plants: understanding complex relationships with leaf traits. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 398-408.
- [24] Zalewski M. Ecohydrology, biotechnology and engineering for cost efficiency in reaching the sustainability of biogeosphere. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2014, 14(1): 14-20.
- [25] Li F, Liu X S, Zhang X L, Zhao D, Liu H X, Zhou C B, Wang R S. Urban ecological infrastructure: an integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163 Suppl 1: S12-S18.
- [26] Lin M Y, Khlystov A. Investigation of ultrafine particle deposition to vegetation branches in a wind tunnel. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 46(4): 465-472.
- [27] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslina H M, Gawronskab H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428: 347-354.
- [28] Beckett K P, Freer Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air quality management. *Arboricultural Journal*, 2000, 26(1): 12-19.
- [29] Yang J, Chang Y M, Yan P B. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM_{2.5} pollution. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(2): 267-277.

- [30] Chen B, Lu S W, Zhao Y G, Li S N, Yang X B, Wang B, Zhang H J. Pollution Remediation by Urban Forests: PM_{2.5} Reduction in Beijing, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(5): 1873-1881.
- [31] Ji W J, Zhao B. Numerical study of the effects of trees on outdoor particle concentration distributions. *Building Simulation*, 2014, 7(4): 417-427.
- [32] Zhang Y W, Gu Z L, Lee S C, Fu T M, Ho K F. Numerical simulation and *in situ* investigation of fine particle dispersion in an actual deep street canyon in Hong Kong. *Indoor and Built Environment*, 2011, 20(2): 206-216.
- [33] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 杨伟伟. 6种城市绿地空气 PM_{2.5} 浓度变化规律的研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35(4): 494-498.
- [34] 郭二果, 王成, 鄯光发, 蔡煜. 北方地区典型天气对城市森林内大气颗粒物的影响. *中国环境科学*, 2013, 33(7): 1185-1198.
- [35] 王成, 郭二果, 鄯光发. 北京西山典型城市森林内 PM_{2.5} 动态变化规律. *生态学报*, 2014, 34(19): 5650-5658.
- [36] 段文军, 王成, 张昶, 宋阳, 郝泽周, 徐心慧, 金一博, 王子研. 夏季3种生境森林内空气颗粒物变化特征. *北京林业大学学报*, 2017, 39(5): 73-81.
- [37] 李新宇, 赵松婷, 郭佳, 李延明. 公园绿地植物配置对大气 PM_{2.5} 浓度的消减作用及影响因子. *中国园林*, 2016, 32(8): 10-13.
- [38] 王轶浩, 凯旋, 薛兰兰, 谢双喜. 重庆城郊森林植被调控大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的时空效应. *生态环境学报*, 2016, 25(10): 1678-1683.
- [39] Gao G J, Sun F B, Thao N T T, Lun X X, Yu X X. Different concentrations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ of several urban forest types in different seasons. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(6): 2387-2395.
- [40] Liu X H, Yu X X, Zhang Z M. PM_{2.5} concentration differences between various forest types and its correlation with forest structure. *Atmosphere*, 2015, 6(11): 1801-1815.
- [41] 古琳, 王成, 王晓磊, 王艳英, 王茜. 无锡惠山三种城市游憩林内细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度变化特征. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2485-2493.
- [42] Zhao M, Liu Q R, Xu F, Cheng C N. Effects of greenbelt plant configuration on atmospheric PM_{2.5} in Beijing. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(2): 176-183.
- [43] Wagner P, Kuttler W. Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere—A case study in Essen, Germany. *Science of the Total Environment*, 2014, 475: 104-115.
- [44] Salmond J A, Williams D E, Laing G, Kingham S, Dirks K, Longley I, Henshaw G S. The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of the Total Environment*, 2013, 443: 287-298.
- [45] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 130-137.
- [46] Jin S J, Guo J K, Wheeler S, Kan L Y, Che S Q. Evaluation of impacts of trees on PM_{2.5} dispersion in urban streets. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 277-287.
- [47] Liu J K, Zhu L J, Wang H H, Yang Y L, Liu J T, Qiu D D, Ma W, Zhang Z M, Liu J L. Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 178-187.
- [48] Hao L J, Xiao Z T, Yang Q S. Study on planning and construction of community greenway for PM_{2.5} reduction. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2015, 8(1): 99-105.
- [49] Wu H T, Yang C, Chen J, Yang S, Lu T, Lin X T. Effects of Green space landscape patterns on particulate matter in Zhejiang Province, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(5): 923-933.
- [50] 曹宏亮, 殷杉, 章旭毅, 熊峰, 朱鹏华, 刘春江. 基于 UFORE 模型的上海城市森林对大气 PM_{2.5} 的削减量估算. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2016, 34(5): 76-83.
- [51] 张祥. 基于生态单元制图的宝鸡市不同植被结构绿地滞尘效应及影响因子研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [52] 何亮. 城市不同功能类型绿地的降温增湿和空气净化效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [53] 朱柳燕. 城市景观结构对城市 PM_{2.5} 时空变异的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [54] Fang M, Chan C K, Yao X H. Managing air quality in a rapidly developing nation: China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 79-86.
- [55] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(32): 3976-3984.
- [56] Xu W Y, Zhao C S, Ran L, Deng Z Z, Liu P F, Ma N, Lin W L, Xu X B, Yan P, He X, Yu J, Liang W D, Chen L L. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(9): 4353-4369.
- [57] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 PM_{2.5} 浓度变化. *生态学报*, 2016, 36(5): 1391-1399.
- [58] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, Gawroński S W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 360-369.
- [59] 蒋燕, 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林 PM_{2.5} 质量浓度特征及影响因素分析. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 447-457.
- [60] Abhijith K V, Kumar P, Gallagher J, McNabola A, Baldauf R, Pilla F, Broderick B, Di Sabatino S, Pulvirenti B. Air pollution abatement

- performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments - A review. *Atmospheric Environment*, 2017, 162: 71-86.
- [61] 郭二果, 王成, 鄯光发, 房城, 孙志伟, 周志海. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化. *生态学报*, 2009, 29(6): 3253-3263.
- [62] 古琳, 王成, 王艳英, 王晓磊, 王茜. 夏季持续高温天气下无锡惠山游憩林内空气颗粒物变化特征. *林业科学*, 2013, 49(10): 66-73.
- [63] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 995-1003.
- [64] Jeanjean A P R, Monks P S, Leigh R J. Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric Environment*, 2016, 147: 1-10.
- [65] 刘旭辉, 余新晓, 张振明, 刘萌萌, 阮氏青草. 林带内 PM₁₀、PM_{2.5} 污染特征及其与气象条件的关系. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1715-1721.
- [66] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 赵冰清. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系. *环境科学*, 2014, 35(2): 418-427.
- [67] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 姜群鸥. 2013—2014 年北京地区 PM_{2.5} 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 103-111.
- [68] 翟广宇, 王式功, 董继元, 尚可政. 兰州市不同粒径大气颗粒物污染特征及气象因子的影响分析. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 70-75.
- [69] Cheng Y, He K B, Du Z Y, Zheng M, Duan F K, Ma Y L. Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing. *Environmental Pollution*, 2015, 197: 68-75.
- [70] Wang J H, Ogawa S. Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9089-9101.
- [71] Richter C M, Wild A. Phenolic compounds in needles of Norway spruce trees in relation to novel forest decline I. Studies on trees from a site in the Northern Black Forest. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1992, 188(5): 305-320.
- [72] 李德文, 史奕, 何兴元. 大气二氧化碳和臭氧浓度升高对植物挥发性有机化合物排放影响的研究进展. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2454-2458.
- [73] McKeen S A, Hsie E Y, Liu S C. A study of the dependence of rural ozone on ozone precursors in the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96(D8): 15377-15394.
- [74] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1): 53-68.
- [75] 罗达通, 高健, 王淑兰, 王红丽, 王倩, 陈长虹. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 987-994.
- [76] 陈文泰, 邵敏, 袁斌, 王鸣, 陆思华. 大气中挥发性有机物 (VOCs) 对二次有机气溶胶 (SOA) 生成贡献的参数化估算. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 163-172.
- [77] Ainsworth E A, Yendrek C R, Sitch S, Collins W J, Emberson L D. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63: 637-661.
- [78] 陈博, 王小平, 刘晶岚, 陈峻崎, 朱建刚, 李春义. 不同天气下景观生态林内外大气颗粒物质量浓度变化特征. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1171-1181.
- [79] 赵松婷, 李新宇, 李延明, 于秋雅. 公园绿地及周边环境 PM_{2.5} 浓度特征及影响因素. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(2): 187-192.
- [80] 丛岭, 翟杰休, 马文梅, 刘佳凯, 王宇, 武亚楠, 张振明. 林地和湿地大气颗粒物阻滞效果研究. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 1017-1025.
- [81] Hua S Z, Cai X, Sun F B, Yu X X. Effect of roadside forest belts on particles including TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ under different seasons in Beijing, China. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2016, 15(4): 1389-1394.
- [82] 史宇, 林兰钰, 罗海江, 张殷俊, 陈远航, 于洋. 基于 GIS 的北京市林地覆被与 PM_{2.5} 分布关联性分析. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 1960-1966.
- [83] 李少宁, 孔令伟, 刘斌, 陈波, 鲁绍伟. 城市森林植被区空气 PM_{2.5} 质量浓度时空变化. *环境科学与技术*, 2016, 39(7): 164-173.
- [84] 汪结明, 王良桂, 朱柯铨杰, 李瑞雪, 韩改改. 不同园林绿地类型内空气 PM_{2.5} 浓度的动态变化及其滞尘效应分析. *环境工程*, 2016, 34(7): 120-124.
- [85] 陈波, 蒋燕, 赵云阁, 鲁绍伟, 李少宁, 张洪江. 北京西山典型游憩林内 PM_{2.5} 质量浓度及水溶性离子特征分析. *环境工程学报*, 2017, 11(3): 1713-1721.
- [86] 鲁绍伟, 李少宁, 陈波, 刘海龙, 赵东波, 陈鹏飞. 北京西山不同海拔油松林 PM_{2.5} 浓度及叶片吸附量变化规律. *生态学报*, 2017, 37

- (19): 6588-6596.
- [87] 苏维, 刘苑秋, 赖胜男, 古新仁, 刘青, 龚鹏. 林冠特征对城市森林斑块消减空气 PM_{2.5} 质量浓度的影响. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2902-2908.
- [88] 郭含文, 丁国栋, 赵媛媛, 高广磊, 陈明秀, 王海勇, 赖文豪. 城市不同绿地 PM_{2.5} 质量浓度日变化规律. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 99-103.
- [89] 陈上杰, 牛健植, 韩旖旎, 李娇. 道路绿化带内大气 PM_{2.5} 质量浓度变化特征. 水土保持学报, 2015, 29(2): 100-105.
- [90] Chen J G, Yu X X, Sun F B, Lun X X, Fu Y L, Jia G D, Zhang Z M, Liu X H, Mo L, Bi H X. The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) at shelterbelt site in Beijing. Atmosphere, 2015, 6(5): 650-676.
- [91] 李素莉, 杨军, 马履一, 贾黎明, 李荣桓, 秦永胜. 北京市交通干道防护林带内 PM_{2.5} 浓度变化特征. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 245-252.
- [92] 包红光, 王成, 郟光发, 杜万光, 孙丽. 夏季海淀公园内 PM_{2.5} 浓度水平梯度分布规律. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3678-3684.
- [93] Viippola V, Whitlow T H, Zhao W L, Yli-Pelkonen V, Mikola J, Pouyat R, Setälä H. The effects of trees on air pollutant levels in peri-urban near-road environments. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 30: 62-71.
- [94] Tiwary A, Reff A, Colls J J. Collection of ambient particulate matter by porous vegetation barriers: sampling and characterization methods. Journal of Aerosol Science, 2008, 39(1): 40-47.
- [95] 肖玉, 王硕, 李娜, 谢高地, 鲁春霞, 张彪, 张昌顺. 北京城市绿地对大气 PM_{2.5} 的削减作用. 资源科学, 2015, 37(6): 1149-1155.
- [96] 王晓磊, 王成, 古琳, 王茜, 王艳英. 春季不同天气城市街头绿地内 PM_{2.5} 质量浓度分布特征研究. 生态环境学报, 2014, 23(6): 972-978.
- [97] 李新宇, 赵松婷, 李延明, 郭佳, 李薇. 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. 生态环境学报, 2014, 23(4): 615-621.
- [98] 鲁绍伟, 蒋燕, 陈波, 李少宁. 北京城市植被区 PM_{2.5} 浓度时空变化及影响因素分析. 环境科学与技术, 2017, 40(1): 180-187.
- [99] 杨貌, 张志强, 陈立欣, 刘辰明, 邹瑞. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用. 生态学报, 2016, 36(7): 2076-2083.
- [100] 李新宇, 赵松婷, 李延明. 北京北小河公园绿地 PM_{2.5} 浓度变化规律. 园林, 2013, (6): 20-23.
- [101] 包红光. 城市公园绿地内空气颗粒物浓度时空变化规律[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [102] Park S J, Kim J J, Kim M J, Park R J, Cheong H B. Characteristics of flow and reactive pollutant dispersion in urban street canyons. Atmospheric Environment, 2015, 108: 20-31.
- [103] Zhong J, Cai X M, Bloss W J. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon: using large-eddy simulation. Environmental Pollution, 2015, 200: 42-52.
- [104] Eeftens M, Beelen R, de Hoogh K, Bellander T, Cesaroni G, Cirach M, Declercq C, Dédélé A, Dons E, de Nazelle A, Dimakopoulou K, Eriksen K, Falq G, Fischer P, Galassi C, Gražulevičienė R, Heinrich J, Hoffmann B, Jerrett M, Keidel D, Korek M, Lanki T, Lindley S, Madsen C, Mölter A, Nádor G, Nieuwenhuijsen M, Nonnemacher M, Pedeli X, Raaschou-Nielsen O, Patelarou E, Quass U, Ranzi A, Schindler C, Stempfelet M, Stephanou E, Sugiri D, Tsai M Y, Yli-Tuomi T, Varró M J, Vienneau D, von Klot S, Wolf K, Brunekreef B, Hoek G. Development of land use regression models for PM_{2.5}, PM_{2.5} absorbance, PM₁₀ and PM_{coarse} in 20 European study areas; Results of the ESCAPE project. Environmental Science & Technology, 2012, 46(20): 11195-11205.
- [105] Weber N, Haase D, Franck U. Assessing modelled outdoor traffic-induced noise and air pollution around urban structures using the concept of landscape metrics. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 105-116.