

DOI: 10.20103/j.stxb.202210303079

房佳兴, 李少宁, 赵娜, 徐晓天, 鲁绍伟. 植物吸滞 $PM_{2.5}$ 研究进展——从宏观到微观. 生态学报, 2024, 44(6): 2632-2645.

Fang J X, Li S N, Zhao N, Xu X T, Lu S W. Research progress on $PM_{2.5}$ absorption by plants: from macro to micro. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2632-2645.

植物吸滞 $PM_{2.5}$ 研究进展 ——从宏观到微观

房佳兴^{1,2,3}, 李少宁^{1,2,3}, 赵 娜^{1,2}, 徐晓天^{1,2}, 鲁绍伟^{1,2,3,*}

1 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093

2 国家林业和草原局 北京燕山森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100093

3 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866

摘要: $PM_{2.5}$ 严重危害环境安全和人体健康, 虽然国内外大气 $PM_{2.5}$ 状况已有好转, 但雾霾天气仍然时有发生。植物能有效吸附和净化大气中 $PM_{2.5}$, 其净化作用受到生态学广泛关注。随着研究内容的深入, 该领域研究尺度由宏观尺度转向微观尺度, 研究对象由植被区转向植物个体, 研究方法由野外监测转向人工控制法。因此在区域尺度上对比了植被、非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度差异及不同树种单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸滞量, 以风洞、熏气法两种研究方法归纳了人工控制条件下植物净化 $PM_{2.5}$ 的研究成果, 在大气 $PM_{2.5}$ 浓度和气象因素两方面探讨了环境因素对植物净化 $PM_{2.5}$ 的影响机制。得出宏观研究方面很多城市缺乏植被区与非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据, 微观方面植物个体吸滞 $PM_{2.5}$ 机理研究不够深入, 缺乏植物吸滞 $PM_{2.5}$ 过程与机理的室内模拟外界环境的高精度对比试验, 更缺乏环境因素直接影响植物吸收、分配 $PM_{2.5}$ 过程的研究。未来应加强植被区、非植被区 $PM_{2.5}$ 动态特征研究, 完善某些地区环境监测站点布局, 可适当增加典型植被区对照的非植被区站点并提升站点设备可靠性; 加强植物性状与其净化 $PM_{2.5}$ 作用相关性的研究, 并通过一次性熏气法量化植物在一次污染事件中对 $PM_{2.5}$ 的实际净化作用, 解析植物各器官对吸收 $PM_{2.5}$ 的贡献率; 增加不同环境因素影响植物吸滞 $PM_{2.5}$ 能力与过程研究, 可利用人工控制试验结合模型提高研究可靠性, 揭示环境因素与植物各器官吸收、分配 $PM_{2.5}$ 之间的耦合规律。

关键词: 植物; $PM_{2.5}$; 吸滞作用; 人工控制条件; 环境因素

Research progress on $PM_{2.5}$ absorption by plants: from macro to micro

FANG Jiaying^{1,2,3}, LI Shaoning^{1,2,3}, ZHAO Na^{1,2}, XU Xiaotian^{1,2}, LU Shaowei^{1,2,3,*}

1 Institute of Forestry and Pomology, Beijing of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China

2 Beijing Yanshan Forest Ecosystem Research Station, National Forest and Grassland Administration, Beijing 100093, China

3 Forestry College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: The existence of $PM_{2.5}$ poses significant threats to environmental safety and human health. Although there has been improvement in the atmospheric $PM_{2.5}$ levels both domestically and internationally, occurrences of hazy weather still persist. The capability of plants to effectively adsorb and purify $PM_{2.5}$ in the atmosphere has garnered considerable attention in ecological studies. In recent years, research in this field has shifted its focus from macro scale to micro scale, transitioning from vegetation areas to individual plant bodies, and from field monitoring to artificial control methods. In light of these developments, this study aims to compare the disparities in $PM_{2.5}$ concentration between vegetated and non-vegetated regions on a regional scale. Moreover, it examines the $PM_{2.5}$ retention per unit leaf area among different tree species. Two research methods, namely the wind tunnel method and the fumigation method, are employed to investigate the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32071834, 32171844); 北京市农林科学院创新能力建设 (KJCX20230306)

收稿日期: 2022-10-30; **网络出版日期:** 2023-12-22

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

effects of environmental factors on plant-based PM_{2.5} purification, taking into account atmospheric PM_{2.5} concentration and meteorological factors. The findings reveal certain limitations in the current research landscape. Macro studies often lack comprehensive data on PM_{2.5} concentrations in vegetated and non-vegetated areas, while micro studies have yet to delve deep enough into the mechanisms underlying the absorption and retention of PM_{2.5} by individual plants. Additionally, there is a lack of high-precision indoor simulations that accurately replicate the external environmental conditions affecting the process and mechanisms of plant-based PM_{2.5} absorption and retention, as well as a dearth of research focusing on the direct influence of environmental factors on the absorption and distribution of PM_{2.5} by plants. In the future, it is crucial to strengthen the investigation of the dynamic characteristics of PM_{2.5} in vegetated and non-vegetated areas. This can be achieved through enhancing the distribution of environmental monitoring stations in specific regions, particularly by increasing the number of stations in non-vegetated areas, and improving the reliability of station equipment. Furthermore, there is a need to intensify research on the correlation between plant traits and their ability to purify PM_{2.5}, by quantifying the actual purification effects through one-time fumigation during pollution events and analyzing the contribution of different plant organs to PM_{2.5} absorption. Lastly, emphasis should be placed on studying the impact and processes of various environmental factors on the absorption and retention of PM_{2.5} in plants. Combining artificially controlled experiments with modeling techniques can significantly enhance the reliability of research outcomes and elucidate the interconnected relationship between environmental factors and the absorption and distribution of PM_{2.5} in different plant organs.

Key Words: plants; PM_{2.5}; absorption and stagnation; artificially controlled conditions; environmental factors

随着城市化进程加快,目前全世界约有 54% 的人口居住在城市,预计到 2050 年将上升至 70%^[1]。空气污染是城市地区主要环境问题,影响市民生命安全和生活质量^[2-5]。在典型城市环境中,市民会接触到约 200 种空气污染物^[6-7]。颗粒物(Particulate Matter)是城市环境中最具威胁性空气污染物之一^[8],PM_{2.5}是直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,与粗颗粒物相比,其对人体健康和空气质量影响更大,PM_{2.5}相关的过早死亡事件近几年频繁发生^[9-11]。因此,PM_{2.5}问题广受关注,PM_{2.5}指数已成为最具代表性空气污染指数^[12-13]。PM_{2.5}化学成分主要包括微量金属元素、生物物质(细菌、病菌、霉菌等)、有机碳和无机盐等^[14]。PM_{2.5}来源有自然源、人为源和二次颗粒物三类^[14-15]。自然源包括沙尘、植物花粉和细菌等^[16];人为源包括农业、工业和运输活动等^[17-19];二次颗粒物是大气中一些气态前体污染物通过大气化学反应生成二次颗粒物^[20-21]。

虽然国内外已采取诸多行动治理 PM_{2.5},但雾霾天气还时有发生^[22-24]。城市中增加植被是减缓空气污染的有效手段,大量研究表明森林植被通过减尘、滞尘、降尘和阻尘等多种途径对 PM_{2.5}有显著消减作用^[25-29]。植物净化 PM_{2.5}在全球已初见成效^[30-32],2003 年意大利威尼斯等 10 个城市森林去除颗粒物能力约为 8.60 g/m²^[33];1999—2013 年我国华北平原森林对 PM_{2.5}干沉降去除量约为 2.47×10⁷ t^[34]。基于植物对 PM_{2.5}净化作用,越来越多植物生物过滤器作为新型空气净化器在室内出现^[35],该领域相关研究也日益增多,植物吸滞作用受到生态学广泛关注^[36-38]。该领域前期研究大多数集中于宏观尺度,即通过监测植被区与非植被区大气 PM_{2.5}浓度来量化林木尺度对 PM_{2.5}的净化率。随着研究不断深入,越来越多研究聚焦于微观尺度上植物个体对 PM_{2.5}吸滞能力研究。研究方法也由野外监测法转为控制实验法。该领域控制实验大体分为两方面,一是通过人工控制条件针对植被吸滞 PM_{2.5}作用的过程进行研究,二是分析其吸滞过程与环境因素关系。以往有关植物净化 PM_{2.5}综述都只讨论了森林尺度降低 PM_{2.5}浓度、单木尺度叶表形态特征与植物吸滞 PM_{2.5}关系以及不同天气对植被区 PM_{2.5}浓度影响等^[39-42],没有从不同研究方法角度系统论述植物如何吸滞 PM_{2.5}及其机理。因此,本文从植物与人工控制条件下其对 PM_{2.5}吸滞作用、环境因素对其吸滞 PM_{2.5}能力影响机制三方面进行归纳和总结,旨在为植物净化 PM_{2.5}研究提供思路,为城市地区利用绿化植物去除 PM_{2.5}提供科学依据。

1 植物对 $PM_{2.5}$ 吸滞作用

植物对 $PM_{2.5}$ 吸滞作用是植物体表面和 $PM_{2.5}$ 在空气中做布朗运动发生相互作用的结果。过去国内外学者对该领域研究主要体现在宏观尺度(区域或林分尺度):通过测定不同区域中植被、非植被区 $PM_{2.5}$ 质量浓度,估算植被对 $PM_{2.5}$ 消减作用^[43—45]。大多数研究表明植物对 $PM_{2.5}$ 净化过程十分复杂,叶片、枝条、茎干吸附或者气孔、皮孔吸收均会发生作用^[46],并受多种因素影响。因此后期研究更多体现在微观尺度(单木或枝叶尺度):通过测定植物叶片表面单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量,评估不同植物吸滞能力差异。

1.1 宏观-植被区与非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度差异

宏观尺度研究是该领域研究起点,也是该领域基础研究。在区域或林分尺度,颗粒物通过湍流扩散等空气动力作用传输到植物附近,植物阻挡作用使局部风速降低,有助于颗粒物沉降,从而在林内外形成浓度差异。该过程受多种因素影响,包括大气 $PM_{2.5}$ 浓度水平、边界层湍流传输强度、污染物理化性质、气象因素以及森林结构特征等。城市森林结构会影响 $PM_{2.5}$ 浓度及其扩散:一般来说,绿量越多、郁闭度和盖度越大的片状林吸滞能力越强^[47],但当绿量达到一定值时,颗粒物浓度下降不明显^[48];当郁闭度过大、覆盖率过高时,林内 $PM_{2.5}$ 浓度会居高不下^[49],尤其在建筑物密集的道路峡谷,植被太过密集会阻碍 $PM_{2.5}$ 扩散^[50],因此合理的森林结构才有助于消减大气 $PM_{2.5}$ 浓度。除了城市森林公园,道路林带区也会降低交通环境下颗粒物浓度,其吸滞量与林带高度、宽度、密度、疏透度和郁闭度等特征以及与道路之间距离有关^[51—52]。

虽然宏观尺度研究较早,但随着对 $PM_{2.5}$ 浓度监测技术发展,目前仍有部分学者继续做宏观研究,其测量精度与准确性较之前大幅提升。表 1 展现了国内外几个城市中植被、非植被地区 $PM_{2.5}$ 浓度值。从区域尺度看,植被区空气质量要优于非植被区,如北京非植被区一年内 $PM_{2.5}$ 浓度比植被区高 14.12%^[55];武汉非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度分别是三个植被区 1.23、1.17 倍和 1.20 倍^[56];沈阳 5 对植被区 $PM_{2.5}$ 浓度平均比非植被区低 6.47%^[57]。从街道尺度看,有行道树植被区相比无行道树非植被区空气质量更洁净,如英国吉尔福德市斯托克路植被区 $PM_{2.5}$ 浓度比非植被区低 2%—9%^[53];土耳其伊斯坦布尔市巴罗斯街植被区 $PM_{2.5}$ 浓度比非植被区低 23%^[54]。对各城市植被区与其对应非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度值进行成对样本 T 检验,结果显示植被区 $PM_{2.5}$ 浓度显著低于非植被区 ($P < 0.01$) (图 1),说明植被对消减大气 $PM_{2.5}$ 浓度有明显效果。除了比较植被区与非植被区外,不同植物配置植被区之间 $PM_{2.5}$ 浓度也存在差异,如南京城市道路绿地中乔木 ($118.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 乔木+灌木+绿篱 ($98.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 乔木+绿篱 ($95.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 灌木+绿篱 ($80.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$)^[58],这是因为不同类型植物吸滞效果不同,因此不同组合的植物配置对 $PM_{2.5}$ 浓度消减效果也不同,因此合理布局植物配置对植被区净化大气 $PM_{2.5}$ 十分有利。

掌握不同地区植被区与非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度动态特征对于预测 $PM_{2.5}$ 浓度长期时空特征、研究 $PM_{2.5}$ 浓度历史水平、长期和短期暴露在 $PM_{2.5}$ 下人类的健康影响以及评估空气污染控制政策的有效性有很大作用^[59]。可是目前 $PM_{2.5}$ 监测站分布不均,一些植被区监测数据缺少非植被区对照比较,且一些站点冬季 $PM_{2.5}$ 浓度值缺失率非常高,甚至缺少植被区非生长季监测数据^[60—63]。因此应在缺少非植被区监测数据对比的植被区站点周边适当添加监测站点,以保证植被区与非植被区监测数据在一定时空下进行合理对比,也要加强站点检测

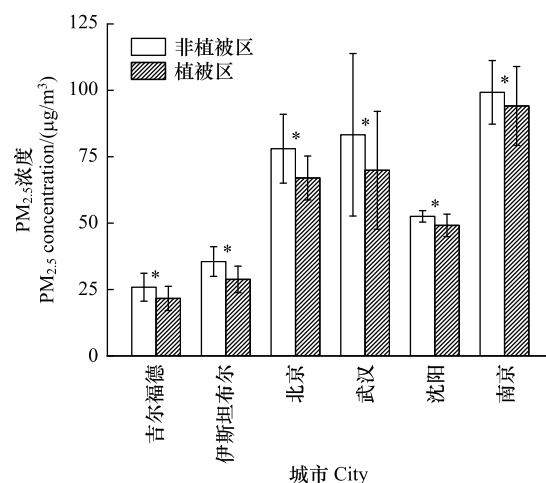


图 1 不同城市植被区与非植被区 $PM_{2.5}$ 浓度值比较^[53—58]

Fig.1 Comparison of $PM_{2.5}$ concentration values between vegetated and non-vegetated areas in different cities

设备的维护,保证设备在极端天气(桑拿天和严冬季)下正常运行,以免数据缺失。

表 1 不同城市植被区与非植被区 PM_{2.5}质量浓度
Table 1 PM_{2.5} mass concentration in different urban vegetation and non vegetation areas

城市 Cities 研究年份 Years of researches	测定地点 Experimental plots	PM _{2.5} 浓度 Mass concentration of PM _{2.5} /($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	
		平均值 Averages	范围 Range
吉尔福德 Guildford 2020 ^[53]	斯托克路(非植被区)	25.87	20.45—28.68
	斯托克路(植被区)	21.65	17.86—22.88
伊斯坦布尔 Istanbul2019 ^[54]	巴巴罗斯街(非植被区)	35.54	12.12—131.67
	巴巴罗斯街(植被区)	28.81	8.12—60.63
北京 Beijing 2016 ^[55]	延庆(非植被区)	64.87	47.23—84.26
	京西北八达岭(植被区)	60.38	41.44—80.48
	密云(非植被区)	68.78	51.48—89.14
	京东北密云水库(植被区)	57.62	32.27—79.88
	昌平(非植被区)	73.55	55.04—101.03
	昌平丁岭(植被区)	66.75	47.35—96.34
	海淀万柳(非植被区)	95.51	66.76—116.24
	海淀国家植物园(植被区)	72.97	51.81—98.09
	石景山(非植被区)	87.40	58.32—116.05
	门头沟龙泉(植被区)	77.29	53.63—110.36
武汉 Wuhan 2018 ^[56]	江汉南片区(非植被区)	62.34	47.64—67.49
	汉口花桥(植被区)	50.76	36.15—56.56
	青山钢花(植被区)	53.49	44.98—66.04
	江夏区(植被区)	52.05	37.99—62.16
沈阳 Shenyang 2018 ^[57]	东陵路(非植被区)	49.05	21.42—92.33
	森林路(植被区)	41.71	21.22—77.43
	大南街(非植被区)	53.17	29.38—97.28
	小河沿路(植被区)	51.88	23.14—97.22
	文化路(非植被区)	52.46	29.54—95.27
	十五纬路(植被区)	51.30	26.42—88.37
	南十东路(非植被区)	54.88	33.21—99.41
	南七西路(植被区)	51.04	30.13—87.44
	浑南东路(非植被区)	53.21	26.33—106.29
	天柱山路(植被区)	49.84	24.33—99.28
南京 Nanjing 2018 ^[58]	蒋王庙街(非植被区)	98.68	87.35—111.65
	蒋王庙街(植被区-乔木+灌木+绿篱)	94.66	81.86—107.56
	板仓街(非植被区)	86.49	63.46—100.01
	板仓街(植被区-灌木+绿篱)	77..86	59.35—96.32
	花园路(非植被区)	115.35	105.87—124.69
	花园路(植被区-乔木)	113.68	101.36—119.86
	和燕路(非植被区)	96.49	70.55—125.86
	和燕路(植被区-乔木+绿篱)	90.32	66.75—121.53

1.2 微观-不同树种净化 PM_{2.5}能力差异

随着该领域研究技术发展和研究内容深入,越来越多研究集中在微观尺度,微观尺度研究是在宏观尺度研究基础上探索植物净化 PM_{2.5}内在机理。在单木和枝叶尺度上,植物叶片、枝条和茎干均会吸滞 PM_{2.5}。当 PM_{2.5}撞击到叶片表面时,叶片表面的微观性状(粗糙度、湿润性等)可使其对 PM_{2.5}截取和固定。当 PM_{2.5}被固定后,一部分会被气孔吸收到植物体内,其无机成分也会被分配到植物各器官^[64—66],因此植物净化 PM_{2.5}是一个复杂过程。相同环境下叶片 PM_{2.5}吸滞能力受到自身表面微观特性影响,因此不同植物叶片对 PM_{2.5}吸滞能

力存在差异,单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸滞量是评价植物吸滞 $PM_{2.5}$ 能力强弱的标准。国内外学者对不同叶片性状以及不同习性植物 $PM_{2.5}$ 吸滞能力进行了研究。按照植物不同叶表微观性状来看,叶片凹槽、褶皱、小室、条状突起、绒毛和表面蜡质等性状均直接影响叶片吸滞能力^[67];Wang 等对展叶期榆树 (*Ulmus pumila*)、垂柳 (*Salix babylonica*) 和银杏 (*Ginkgo biloba*) 叶表面颗粒物积累研究发现,榆树叶表薄蜡膜最能有效地吸滞 $PM_{2.5}$,垂柳叶表凸起的蜡质小块也能较好地吸滞 $PM_{2.5}$,银杏叶表致密的蜡管吸滞效果弱于前两者^[62];Shao 等研究杭州 8 种植物发现绒毛多的植物更利于吸滞 $PM_{2.5}$ ^[68];如 Mariën 等研究越南 49 种植物,其中文定果 (*Muntingia calabura*) 因其叶片亲水性强特点吸滞能力是越南黄檀 (*Dalbergia tonkinensis*) 的 16.17 倍^[69];Sgrigna 等发现不同叶表微观性状 (绒毛密度、气孔密度、凹槽深度等) 组合是增强叶片 $PM_{2.5}$ 吸滞能力的关键因素^[70]。经研究,污染程度越严重地区其植物叶片表面较洁净地区越粗糙,且其单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸滞量越高^[71]。原因是不同 $PM_{2.5}$ 浓度环境下,叶片表面性状会发生适应性变化,其吸滞能力也随之改变^[48]。此外,叶片分泌物也有利于其吸滞 $PM_{2.5}$ ^[72],如陈宝梁等发现苹果树叶表蜡质成分对酚类物质有吸附作用^[73];总之,叶表特征越复杂的叶片越有利于吸滞 $PM_{2.5}$ 。

按照植物不同生活型来看,一些研究认为乔木比其他植物能吸附更多 $PM_{2.5}$:如王会霞等选取北京 23 种植物,发现榆树 (阔叶乔木) 单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸滞量高于其他阔叶灌木^[74];是怡芸分析 8 种南京绿化树种吸滞能力,得出雪松 (*Cedrus deodara*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和圆柏 (*Juniperus chinensis*) 等针叶乔木吸滞能力高于其他阔叶乔木和灌木的结论^[75]。也有研究认为灌木 $PM_{2.5}$ 吸滞能力高于乔木:如 Sæbø 等研究挪威 48 种植物,其中矮赤松 (*Pinus mugo*) 等针叶灌木吸滞能力高于乔木^[76];Sgrigna 等研究特尔尼市 12 种植物,发现櫻桃李 (*Prunus cerasifera*) 和荷花木兰 (*Magnolia grandiflora*) 两种阔叶灌木高于刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 和北非雪松 (*Cedrus atlantica*) 等乔木^[70];该学者还发现荷花木兰在意大利 12 种植物中同样展示出灌木植物较强吸滞能力^[70]。此外,还有研究认为藤本和竹类植物同样具有较高吸滞能力:如 Przybysz 等研究城市较小空间植物吸滞颗粒物能力,发现常春藤 (*Hedera nepalensis* var. *sinensis*) 在墙壁上可以起到“粒子沉淀”的作用^[77],吸附效果高于乔木,因此常春藤是较小空间净化 $PM_{2.5}$ 很好的选择;Sæbø 等发现地锦 (*Parthenocissus tricuspidata*) 在波兰 48 种植物中吸滞能力名列前茅^[76],再次证明藤本植物不可忽略;郑铭浩发现孝顺竹 (*Bambusa multiplex*) 吸滞能力在重庆 82 种植物中排在中间^[78],说明竹类植物对 $PM_{2.5}$ 也具有较好的净化作用。图 2 和图 3 对国内外不同城市不同树种 $PM_{2.5}$ 吸滞能力进行排序。

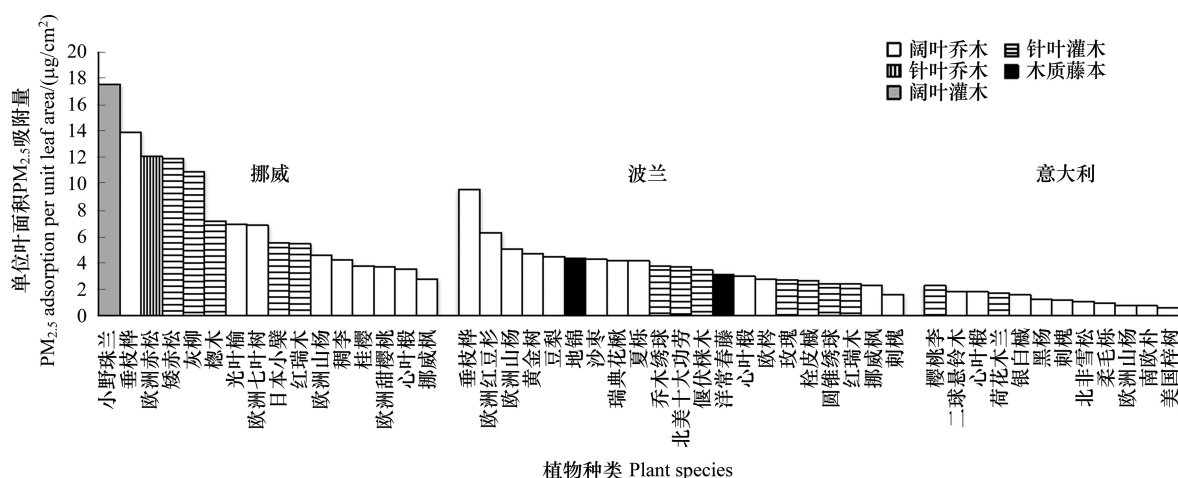
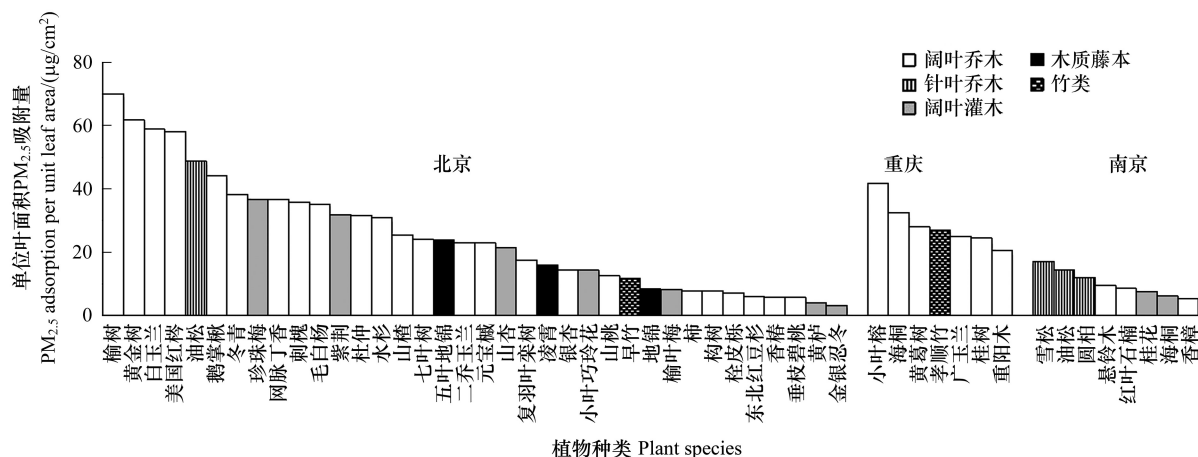


图 2 国外不同树种对 $PM_{2.5}$ 吸滞能力比较

Fig.2 Comparison of $PM_{2.5}$ adsorption ability of different plant species in foreign countries

虽然目前已有大量研究聚焦于不同植物单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量^[79]、单位叶面积 $PM_{2.5}$ 元素沉积

图3 国内不同植物对 PM_{2.5} 吸滞能力比较Fig.3 Comparison of PM_{2.5} adsorption ability of different plant species in China

量^[80—82]、植物叶片微表面特征^[83—84]和叶片质量磁化率与其吸附 PM_{2.5} 量关系^[85]等,但对于植物直接吸收 PM_{2.5} 相关研究还不够深入。因为植物在吸收污染物同时也在进行生理活动,所以其生理过程(光合、呼吸过程等)也必定会受到其吸收污染物的影响^[86—89],但具体如何影响还不得而知;而且植物实际一次性可以吸收多少颗粒物到体内等问题仍需研究。因此,深入研究植物通过叶枝干吸附和吸收作用分别对 PM_{2.5} 浓度下降产生贡献率以及其生理过程对 PM_{2.5} 的响应,成为该领域亟待解决的问题。

2 基于人工控制条件研究植物对 PM_{2.5} 吸滞作用

之前关于植物对 PM_{2.5} 吸滞作用研究的方法大多采用野外原位试验,随着该领域大多数的研究由宏观转为微观,研究方法也由野外原位试验转为控制试验。因为野外试验环境条件因时因地变化,存在很多不确定因素,难以区分不同环境因子对植物吸滞 PM_{2.5} 影响大小,所以如何在人为可控环境条件下研究植物吸滞颗粒物是该领域未来重要研究方向。风洞法和熏气法是基于人工控制条件研究植物吸滞 PM_{2.5} 重要的研究方法。

2.1 风洞法研究植物对 PM_{2.5} 吸滞作用

风洞法是让植物在风洞中吸滞 PM_{2.5} 的一种研究手段。如图4,风洞设备中,颗粒物通过轴流式风机被送入风洞以模拟空气中 PM_{2.5} 均匀分布,PM_{2.5} 浓度由空气粉尘检测仪测量获得。风洞法是目前公认研究植物净化 PM_{2.5} 较好的方法,国内外学者利用风洞法已取得诸多研究成果。如 Raesaenen 等用 NaCl 粒子模拟 PM_{2.5} 发现,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)对 PM_{2.5} 颗粒捕获率(0.21%)显著高于毛桦(*Betula pubescens*)、椴树(*Tilia tuan*)和垂枝桦(*Betula pendula*) (分别为0.083%、0.047%和0.043%),这一结果证实针叶树比阔叶植物更能有效捕捉颗粒物的早期结论^[90];Raesaenen 还发现降低土壤水分可用性会提高欧洲云杉(*Picea abies*)对 PM_{2.5} 捕获率,且不同叶龄叶片 PM_{2.5} 捕获效率也不同^[91];Ji 等利用香烟燃烧产生颗粒物吹入风洞中,发现柏木(*Cupressus funebris*)将 PM_{2.5} 去除率比对照(无树)提高了约20%,并且树木不同高度处 PM_{2.5} 去除率也不一样,底部(0.000—0.085 m)PM_{2.5} 去除率最高^[92];Xie 等研究不同风速影响植物吸滞 PM_{2.5} 得出结论,植物叶片滞留 PM_{2.5} 数量随时间变化是一个复杂动态过程,且

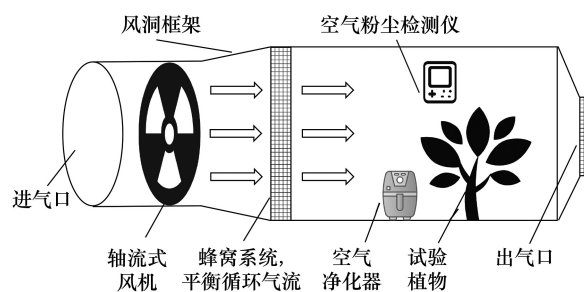


图4 常用风洞法装置图

Fig.4 Common wind tunnel method device diagram

树冠结构简单的植物在较低风速下(0.0—1.0 m/s)吸滞能力强,树冠结构复杂的植物在较高风速下(3.5—8.0 m/s)吸滞能力强^[93];Lai 等利用激光扫描结合风洞法研究树木风荷载发现,树冠水平比、向风侧投影和孔隙率等树冠特征对估计风荷载有重要意义^[94],这些特征可为选择城市滞尘树木提供参考;Qin 等利用风洞独特结构模拟行道树影响街道峡谷 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散,得出树高、树冠直径和树冠体积是降低街道峡谷 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要因素,而叶面积指数和树冠基高影响较小的结论^[95];Shen 等利用风洞法从空气动力学角度研究植物叶片特性与其吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 关系发现,较高的叶面积密度会增高叶片阻力系数,使其更容易吸附 $\text{PM}_{2.5}$ ^[96]。

风洞法由于其独特结构导致其受周围环境影响较小,因此除了应用于树木吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 常规研究外,更多应用于模拟可控气流环境下试验,如模拟接街道峡谷气流场和湍流特征等^[50]。尽管利用风洞法已取得很多重要研究成果,但其测量植物叶片 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降速率仍然存在一些缺点,如试验结果误差较大、试验设备成本较高和试验地点占地面积较大等。

2.2 熏气法研究植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸滞作用

与传统风洞法相比,熏气法是一种更便宜、占地面积更小及更容易确定颗粒物沉降速率的方法,并且熏气法更注重植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 过程研究,表 2 分别列举了熏气法和风洞法优缺点。得益于熏气法明显优点,其在许多植物净化大气污染物研究中得到了有效应用,包括植物-大气边界研究^[97]、半挥发性有机化合物^[98]和芳烃研究^[99]。熏气法可以创造一个可控制环境条件的空间,并且箱内 $\text{PM}_{2.5}$ 分散更接近实际沉降环境^[92]。如图 5,熏气设备由气溶胶发生器和密封箱组成。熏气法分为持续熏气法和一次性熏气法,持续熏气法是试验过程中箱内始终保持熏气,试验结束停止熏气;一次性熏气法是当箱内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到设定值时停止熏气。

一次性熏气法提供一个新思路,即 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降速率可通过 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度衰减方程获得,通过箱内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化曲线分析植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 过程。近年来持续熏气法在该领域研究成果较多,如 Yang 等用 Na_2SO_4 模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 发现,重度($1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和轻度($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)污染下 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 可以被加杨叶片(*Populus × canadensis*)吸收并同化,并且重度污染有利于加杨叶片氮同化^[100];曹学慧等用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 发现,加杨能吸收含 Pb^{2+} 颗粒物,其中叶片 Pb^{2+} 含量最高,茎和根中 Pb^{2+} 含量较少^[65];刘庆倩等利用 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 和 NH_4NO_3 模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 试验,发现加杨能够有效吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- ,轻度污染下($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)细根对 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收能力最强,重度污染($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)下叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收能力最强^[64]。虽然目前一次性熏气法应用较少,但取得的研究成果影响很大,如 Ryu 等通过烧香模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 试验发现,熏气结束 180 min 后绿萝(*Epipremnum aureum*)在光照条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 去除率相比黑暗条件提高 21.4%,并且熏气箱内湿度增加主要归因于试验期间内植物蒸腾作用,不影响植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ ^[101];包鹏威等将室外污染气体打入熏气箱中发现,包括白皮松(*Pinus bungeana*)和大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)在内 8 种植物在静风条件下 1 m^3 空间中 $\text{PM}_{2.5}$ 吸滞时间极限为 12—14 h,并且 8 种植物 $\text{PM}_{2.5}$ 净化率为 3%—15%,吸滞能力表现为乔木大于灌木、针叶大于阔叶^[102]。

目前针对 $\text{PM}_{2.5}$ 熏气研究大多数采用持续熏气法,持续熏气虽然能够模拟植物在更接近实际环境中吸滞 $\text{PM}_{2.5}$,但考虑植物在理想状态下反馈,因此并不能反映出污染过程中植物对污染物实际净化量是多少。一次性熏气可以计算出植物单位体积空气 $\text{PM}_{2.5}$ 净化率,更好量化植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 净化效果。因此,合理运用一次性熏气法,可以阐明植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸收与分配机理,加深对于可控条件下植物在污染过程中所起作用的认识,有助于评估各树种在自然环境中对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的反应程度。

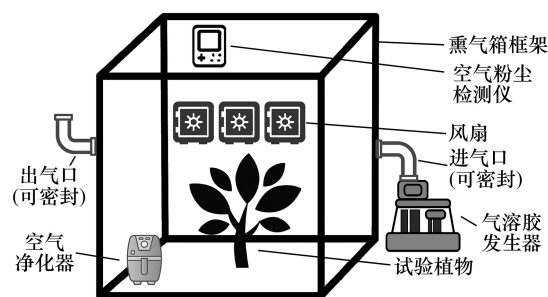


图 5 常用熏气法装置图

Fig. 5 Common fumigation gas method device diagram

表 2 人工控制条件下不同方法研究树木吸滞 PM_{2.5}优缺点比较

Table 2 Comparison of the advantages and disadvantages of different methods for studying PM_{2.5} absorption by trees under artificial control conditions

方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
风洞法 Wind tunnel method	直接法,风洞产生的气流相对稳定,速度分布相对均匀,气流平均方向沿风洞轴线的偏差小,受环境因素影响较小。	成本较高,需要场地较大,测试结果误差较大,不能控制环境因子。
熏气法 Fumigation method	持续熏气法 间接法,测试结果更精准,误差较小,成本较低,需要场地较小,PM _{2.5} 沉降环境更真实,且可模拟不同环境条件下树木对 PM _{2.5} 的吸滞。	不能获取植物一次性吸滞颗粒物量。
	一次性熏气法 除了以上优点,一次性熏气法可以获取植物在一次污染事件中 PM _{2.5} 阻滞量、吸收量、吸滞时间极限、吸滞速率以及单位空间 PM _{2.5} 净化率。	对箱体密封性要求很高。

3 环境因素对植物吸滞 PM_{2.5}影响

植物自身对空气质量净化效果复杂且难以量化,因为植物所处复杂环境中,各种环境因子复杂多变,城市环境更为复杂。除了植物自身性质特征(树冠结构、叶片形态特征等),环境因素也显著影响植物对 PM_{2.5}沉积和截留过程,环境因素包括大气 PM_{2.5}浓度和气象因素(温度、相对湿度、风速和降雨)^[80,103—104]。该领域与环境因素相关的宏观尺度研究大多选择晴朗无风天气,其他天气开展研究较少^[105],微观尺度研究几乎没有。因此,随着该领域宏观尺度与微观尺度研究深入,揭示植物吸滞 PM_{2.5}过程对外界环境因素的响应至关重要^[106]。

3.1 大气 PM_{2.5}浓度对植物吸滞 PM_{2.5}影响

有学者发现,不同污染程度下树木单位叶面积 PM_{2.5}吸附量差异较大,PM_{2.5}浓度越高区域的植物会吸滞更多 PM_{2.5}^[107]。如北京污染程度高的公园中植物其单位叶面积吸滞量((1.29±0.24) μg/cm²)要高于污染程度低的公园中植物((1.14±0.36) μg/cm²)^[108]。污染严重地区的植物叶片除了具有较高 PM_{2.5}吸滞量,还积累较高微量元素,而相对清洁地区植物则累积较少^[77]。这是因为植物叶片表面特征会随着环境 PM_{2.5}浓度发生适应性变化,其吸滞能力也随之改变,如曹学慧等对加杨吸滞 PM_{2.5}中 Pb²⁺研究发现,随着 PM_{2.5}浓度增加,叶片表皮细胞、栅栏细胞和海绵细胞中颗粒物数量增加,轻度污染(75—115 μg/m³)下叶片含铅颗粒物最多为4个/mm²,重度污染(150—250 μg/m³)下最多为20个/mm²^[65]。不同 PM_{2.5}浓度下同一植物同化 PM_{2.5}化学离子能力也会变化,如 Yang 等对加杨吸收和同化 PM_{2.5}中 SO₄²⁻研究发现,轻度污染(100 μg/m³)下其吸收 PM_{2.5}能力较弱,但 SO₄²⁻同化酶的活性较高;重度污染(300 μg/m³)下其吸收 PM_{2.5}能力较强,但 SO₄²⁻同化酶的活性较低,说明重度污染打破加杨同化 SO₄²⁻的阈值点,使其吸收的 SO₄²⁻不能很快被同化^[100]。不同 PM_{2.5}浓度下植物各组织器官对 PM_{2.5}吸收能力也存在差异,如刘庆倩等在研究加杨吸收和分配 PM_{2.5}无机成分 NH₄⁺和 NO₃⁻发现,轻度污染(100 μg/m³)下细根对 NH₄⁺和 NO₃⁻吸收量最高,树皮、叶柄、叶片次之,髓最低;重度污染(200 μg/m³)下叶片对 NH₄⁺和 NO₃⁻吸收量最高,细根、叶柄、树皮次之,髓最低;各组织器官中 NH₄⁺和 NO₃⁻含量均表现为重度污染大于轻度污染^[64]。

目前该方面研究大多是关于不同 PM_{2.5}浓度下植物单位叶面积 PM_{2.5}吸附值和植物各器官对 PM_{2.5}某些成分吸收值的研究,但是不同污染程度下植物对 PM_{2.5}的吸收与分配究竟是吸收多少外界 PM_{2.5}所导致目前尚无定论,因此加深该领域研究对不同污染程度下精准量化植物吸收 PM_{2.5}值十分重要。

3.2 气象因素对大气 PM_{2.5}浓度影响

自然生态系统中,大气中 PM_{2.5}浓度主要受气象因素影响^[109],森林中 PM_{2.5}沉降主要受气象因素和植被特征影响。温度、相对湿度、降水(包括降雪)和风速(包括风向)等都是重要的影响因子^[110]。高温无风低湿环

境最不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的沉降,森林生态系统有效避免了该条件形成^[110],其高耸树高和茂密枝叶组成的林冠层与多层次结构绿色植被使该地区具有较低温度、风速及较高相对湿度,利于大气 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降^[111]。

温度升高,大气垂直方向对流作用随之增强,有利于大气污染物扩散。温度上升会增强植物光合作用,光合作用强的植物净化污染物能力相对较强^[112]。也有研究得出温度越高,污染物浓度可能越高的结论^[113]。原因是温度升高增强地面辐合运动导致污染物聚集,并且平流逆温和辐射逆温复合交织阻碍污染物水平和垂直扩散^[114]。

相对湿度增加会提高大气污染浓度^[115]。因为相对湿度大的条件会使大气形成雾罩,对污染物扩散有抑制作用^[116];而且潮湿环境会促进气态污染物向颗粒态的转化,进而增加颗粒物浓度^[117]。但当相对湿度足够大时,林内外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随林内外相对湿度增高而降低^[112]。这是由于过高的相对湿度使颗粒物由干沉降转化成湿沉降,颗粒物受潮导致质量增重,加快其沉降速度。

风速越大,林内外污染气体浓度越低^[115]。因为较大风速提高大气运动强度,增强平流输送能力与流动性,加快大气污染物扩散^[118];而且大气污染物在受风吹扩散的同时,不停地与周围空气混合,进而稀释大气污染物浓度^[119]。除了风速,风向也是影响城市森林 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要因素之一,风速和风向对 $\text{PM}_{2.5}$ 衰减的影响甚至大于人为活动^[120]。

较大降水量会减小林内外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度^[121]。这是由于降水对大气污染物起到冲刷作用:降水过程中,颗粒物部分溶解在水中,浓度被稀释^[122]。降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响在任何区域无滞后性,降水前期和中期有较大波动,降水后期波动较小,雨后森林植被区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低效果更明显,雨后 1 d (24 h) 林内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值达到最低值^[123]。也有研究发现降水对 PM_{10} 及更大的颗粒物冲刷效果显著, $\text{PM}_{2.5}$ 及更小的颗粒物受降水冲刷效果不大^[124]。

目前该方面研究主要集中在宏观上不同气象因素对城市森林环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度动态变化的研究,关于微观上环境因素影响植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 能力的研究较少,尤其是关于不同环境因素下植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸收与分配机理的研究更为缺乏。环境因素难以控制,且气候箱价格高昂,导致该方面研究匮乏。虽然一些学者利用模型研究环境因素与植物净化颗粒物的关系^[125],但模型忽略了不同种类植物自身的特性,因此不能准确反映植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 作用过程。综上所述,有必要继续开展人工控制条件下环境因素与植物净化 $\text{PM}_{2.5}$ 关系研究,其可更好解释植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 机理。

4 结论与展望

植物净化 $\text{PM}_{2.5}$ 是改善城市环境 and 经济有效且可持续的治理手段,虽然国内外学者对不同树种吸滞能力强弱已有一定区分,但针对不同污染源、污染程度及气候条件地区确定合适目标树种这一举措仍未实现。只有弄清植吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 的内因与外因才能更好“适地适树”,高效发挥植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 净化作用。因此系统研究植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 过程与机理十分重要。目前该领域从宏观与微观两个尺度研究植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 作用、利用两种人工条件实验方法研究植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 和环境因素影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的研究已取得一定进展,但仍存在一些问题:

- (1) 很多城市缺乏植被区与非植被区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测数据;
- (2) 研究植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 过程与机理的室内模拟外界环境的高精度对比试验也相对匮乏;
- (3) 严重缺乏环境因素直接影响植物吸收、分配 $\text{PM}_{2.5}$ 过程的研究。

在今后植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 相关研究中应着重以下几个方面:

- (1) 加强植被区、非植被区 $\text{PM}_{2.5}$ 动态特征研究,完善某些地区环境监测站点布局,可适当增加典型植被区对照的非植被区站点并提升站点设备可靠性;
- (2) 加强植物性状与其净化 $\text{PM}_{2.5}$ 作用相关性的研究,并通过一次性熏气法量化植物在一次污染事件中对 $\text{PM}_{2.5}$ 的实际净化作用,解析植物各器官对吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率;
- (3) 增加不同环境因素影响植物吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 能力与过程研究,可利用人工控制试验结合模型提高研究可

靠性,揭示环境因素与植物各器官吸收、分配 PM_{2.5}之间的耦合规律。

参考文献 (References):

- [1] Nations U, Affairs S, Division. World urbanization prospects: The 2014 revision – highlights. New York: United Nations, 2014.
- [2] Manning W J. Urban environment: recognizing that pollution and social factors can create barriers to development of more healthy and liveable cities. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 1.
- [3] Hutsemékers V, Mouton L, Westenbohm H, Collart F, Vanderpoorten. Disentangling climate change from air pollution effects on epiphytic bryophytes. *Global Change Biology*, 2023.
- [4] Kazemiparkouhi F, Honda T, Eum K D, Wang B, Manjourides J, Suh H. The impact of Long-Term PM_{2.5} constituents and their sources on specific causes of death in a US Medicare cohort. *Environment International*, 2022, 159: 106988.
- [5] Wang Q, Wang J, He M Z, Kinney P L, Li T. A county-level estimate of PM_{2.5} related chronic mortality risk in China based on multi-model exposure data. *Environment international*, 2018, 110: 105-112.
- [6] Sicard P, Lesne O, Alexandre N, Mangin A, Collomp R. Air quality trends and potential health effects – Development of an aggregate risk index. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(5): 1145-1153.
- [7] Khaniabadi Y O, Fanelli R, De Marco A, Daryanoosh S M, Kloog I, Hopke P K, Conti G O, Ferrante M, Mohammadi M J, Babaei A A, Basiri H, Goudarzi G. Hospital admissions in Iran for cardiovascular and respiratory diseases attributed to the Middle Eastern Dust storms. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(20): 16860-16868.
- [8] Guerreiro C B B, Foltescu V, de Leeuw F. Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment*, 2014, 98: 376-384.
- [9] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 2015, 525(7569): 367-371.
- [10] Maji K J, Dikshit A K, Arora M, Deshpande A. Estimating premature mortality attributable to PM_{2.5} exposure and benefit of air pollution control policies in China for 2020. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 683-693.
- [11] Saini P, Sharma M. Cause and Age-specific premature mortality attributable to PM_{2.5} Exposure: An analysis for Million-Plus Indian cities. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 135230.
- [12] Gao J. Study on the influence of the variation of PM_{2.5} index of gaseous pollutants on human health in Gansu Plateau in recent years. *Earth and Environmental Science*, 2021, 692(3): 032084.
- [13] Wu X, Zhang C, Zhu J, Zhang X. Research on PM_{2.5} Concentration Prediction Based on the CE-AGA-LSTM Model. *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 7009.
- [14] 李晓晓, 蒋靖坤, 王东滨, 葛茂发, 郝吉明. 大气超细颗粒物来源及其化学组分研究进展. *环境化学*, 2021, 40(10): 2947-2959.
- [15] Behera S N, Sharma M. Transformation of atmospheric ammonia and acid gases into components of PM_{2.5}: an environmental chamber study. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(4): 1187-1197.
- [16] Karagulian F, Belis C A, Dora C, Prüss-Ustün A, Bonjour S, Adair-Rohani H, Amann M. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric environment*, 2015, 120: 475-483.
- [17] Li H, Wang D, Cui L, Gao Y, Huo J, Wang X, Zhang Z, Tan Y, Huang Y, Cao J, Chow J C, Lee S, Fu Q. Characteristics of atmospheric PM_{2.5} composition during the implementation of stringent pollution control measures in Shanghai for the 2016 G20 summit. *Science of the total environment*, 2019, 648: 1121-1129.
- [18] Sun P, Farley R N, Li L, Srivastava D, Niedeck C P, Li J, Wang N, Cappa C D, Pusede S, Yu Z, Croteau P, Zhang Q. PM_{2.5} composition and sources in the San Joaquin Valley of California: A long-term study using ToF-ACSM with the capture vaporizer. *Environmental Pollution*, 2022, 292: 118254.
- [19] Singh N, Murari V, Kumar M, Barman S C, Tirthankar B. Fine particulates over South Asia: Review and meta-analysis of PM_{2.5} source apportionment through receptor model. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 121-136.
- [20] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, Ho K F, Cao J, Han Y, Daellenbach K R, Slowik J G, Platt S M, Canonaco F, Zotter P, Wolf R, Pieber S M, Bruns E A, Crippa, M, Ciarelli G, Piazzalunga A, Schwikowski M, Abbazade G, Schnelle-Kreis J, Zimmermann R, An Z, Szidat, S, Baltensperger, U, Haddad, I E, Prévôt A S H. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [21] Peng J, Hu M, Shang D, Wu Z, Du Z, Tan T, Wang Y, Zhang F, Zhang R. Explosive secondary aerosol formation during severe haze in the North China Plain. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(4): 2189-2207.
- [22] Mukherjee A, Agrawal M. A global perspective of fine particulate matter pollution and its health effects. *Reviews of Environmental Contamination*

- and Toxicology, 2018, 244: 5-51.
- [23] Perez P, Menares C, Ramirez C. PM_{2.5} forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas. *Urban Climate*, 2020, 32: 100608.
- [24] Wang S, Zhou C, Wang Z, Feng K, Hubacek K. The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1800-1809.
- [25] 刘畅, 胡尚春, 唐立娜. 寒地校园植物群落对大气细颗粒物浓度的消减作用. *生态学报*, 2021, 41(15): 6227-6233.
- [26] Tallis M, Taylor G, Sinnott D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138.
- [27] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [28] Zhai C, Bao G, Zhang D, Sha Y. Urban Forest Locations and Patch Characteristics Regulate PM_{2.5} Mitigation Capacity. *Forests*, 2022, 13(9): 1408.
- [29] Lin Y, Yang X, Li Y, Yao S. The effect of forest on PM_{2.5} concentrations: A spatial panel approach. *Forest Policy and Economics*, 2020, 118: 102261.
- [30] Badach J, Dymnicka M, Baranowski A. Urban vegetation in air quality management: a review and policy framework. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1258.
- [31] Lee A, Jeong S, Joo J, Park C R, Kim J, Kim S. Potential role of urban forest in removing PM_{2.5}: A case study in Seoul by deep learning with satellite data. *Urban Climate*, 2021, 36: 100795.
- [32] Li K, Li C, Hu Y, Xiong Z, Wang Y. Quantitative estimation of the PM_{2.5} removal capacity and influencing factors of urban green infrastructure. *Science of The Total Environment*, 2023, 867: 161476.
- [33] Manes F, Marando F, Capotorti G, Blasi C, Salvatori E, Fusaro L, Ciancarella L, Mircea M, Marchetti M, Chirici G, Munafò M. Regulating Ecosystem Services of forests in ten Italian Metropolitan Cities: air quality improvement by PM₁₀ and O₃ removal. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 425-440.
- [34] Du J, Zhang X D, Huang T, Gao H, Mo J Y, Mao X X, Ma J M. Removal of PM_{2.5} and secondary inorganic aerosols in the North China Plain by dry deposition. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2312-2322.
- [35] Irga P J, Paull N J, Abdo P, Torpy F R. An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system. *Building and Environment*, 2017, 115: 281-290.
- [36] Wang L, Gong H L, Liao W B, Wang Z. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 420-434.
- [37] Xiong T Q, Jiang W, Gao W D. Current status and prediction of major atmospheric emissions from coal-fired power plants in Shandong Province, China. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 46-52.
- [38] Yin S, Wang X F, Xiao Y, Tani H, Zhong G S, Sun Z Y. Study on spatial distribution of crop residue burning and PM_{2.5} change in China. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 204-221.
- [39] 王华, 鲁绍伟, 李少宁, 潘青华, 张玉平. 可吸入颗粒物和细颗粒物基本特征、监测方法及森林调控功能. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 869-877.
- [40] 王磊, 黄利斌, 万欣, 张亚楠, 王火. 城市森林对大气颗粒物(尤其 PM_{2.5}) 调控作用研究进展. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(5): 148-154.
- [41] 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. *植物科学学报*, 2017, 35(5): 790-796.
- [42] Xu X D, Xia J J, Gao Y, Zheng W. Additional focus on particulate matter wash-off events from leaves is required: a review of studies of urban plants used to reduce airborne particulate matter pollution. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126559.
- [43] Nguyen T, Yu X, Zhang Z, Liu M, Liu X. 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.
- [44] 邵锋. 园林树木对 PM_{2.5} 等大气颗粒物浓度和成分的影响及滞尘效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [45] Chen L, Liu C, Zou R, Yang M, Zhang Z. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 198-208.
- [46] Kim J J, Park J, Jung S Y, Lee S J. Effect of trichome structure of *Tillandsia usneoides* on deposition of particulate matter under flow conditions. *Journal of hazardous materials*, 2020, 393: 122401.
- [47] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展. *生态学报*, 2014, 34(8): 1910-1921.
- [48] 刘立民, 刘明. 绿量——城市绿化评估的新概念. *中国园林*, 2000, 16(5): 32-34.
- [49] 郭二果. 北京西山典型游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.

- [50] 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.
- [51] 齐飞艳. 道路大气颗粒物的分布特征及绿化带的滞留作用[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [52] Wang L, Liu L Y, Gao S Y, Hasi E, Wang Z. Physicochemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surfaces of urban plants in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 921-926.
- [53] Abhijith K V, Kumar P. Quantifying particulate matter reduction and their deposition on the leaves of green infrastructure. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114884.
- [54] Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1176-1185.
- [55] Chen B, Li S N, Yang X B, Lu S W, Wang B, Niu X. Characteristics of atmospheric PM_{2.5} in stands and non-forest cover sites across urban-rural areas in Beijing, China. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(2): 867-883.
- [56] 戴菲. 城市街区植物绿量及对 PM_{2.5} 的调节效应——以武汉市为例. 中国风景园林学会 2018 年会论文集. 贵阳, 2018: 340-345.
- [57] 赵新新. 城市森林植被吸附 PM_{2.5} 功能研究——以沈阳市区为例[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [58] 张鑫. 南京城市道路绿地对 PM_{2.5} 扩散影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [59] Ma Z W, Dey S, Christopher S, Liu R Y, Bi J, Balyan P, Liu Y. A review of statistical methods used for developing large-scale and long-term PM_{2.5} models from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 269: 112827.
- [60] Meng X, Liu C, Zhang L N, Wang W D, Stowell J, Kan H D, Liu Y. Estimating PM_{2.5} concentrations in Northeastern China with full spatiotemporal coverage, 2005-2016. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112203.
- [61] Ma Z W, Hu X F, Sayer A M, Levy R, Zhang Q, Xue Y G, Tong S L, Bi J, Huang L, Liu Y. Satellite-based spatiotemporal trends in PM_{2.5} concentrations: China, 2004-2013. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(2): 184-192.
- [62] Ma Z W, Liu R Y, Liu Y, Bi J. Effects of air pollution control policies on PM_{2.5} pollution improvement in China from 2005 to 2017: a satellite-based perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(10): 6861-6877.
- [63] Dey S, Purohit B, Balyan P, Dixit K, Bali K, Kumar A, Imam F, Chowdhury S, Ganguly D, Gargava P, Shukla V K. A satellite-based high-resolution (1-km) ambient PM_{2.5} database for India over two decades (2000 - 2019): applications for air quality management. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3872.
- [64] 刘庆倩, 石婕, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 夏新莉, 郭惠红. 应用¹⁵N 示踪研究欧美杨对 PM_{2.5} 无机成分 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收与分配. *生态学报*, 2015, 35(19): 6541-6548.
- [65] 曹学慧, 安海龙, 刘庆倩, 刘超, 郭惠红, 尹伟伦, 夏新莉. 欧美杨对 PM_{2.5} 中重金属铅的吸附、吸收及适应性变化. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3382-3390.
- [66] Takahashi M, Morikawa H. Nitrate, but not nitrite, derived from nitrogen dioxide accumulates in Arabidopsis leaves following exposure to ¹⁵N-labeled nitrogen dioxide. *Plant Signaling & Behavior*, 2019, 14(2): 1559579.
- [67] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249-253.
- [68] Shao F, Wang L H, Sun F B, Li G, Yu L, Wang Y J, Zeng X R, Yan H, Dong L, Bao Z Y. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939-951.
- [69] Mariën B, Mariën J, Nguyen X H, Nguyen T C, Nguyen V S, Samson R. Particulate matter accumulation capacity of plants in Hanoi, Vietnam. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1079-1088.
- [70] Sgrigna G, Baldacchini C, Dreveck S, Cheng Z, Calfapietra C. Relationships between air particulate matter capture efficiency and leaf traits in twelve tree species from an Italian urban-industrial environment. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137310.
- [71] Lu S W, Yang X B, Li S N, Chen B, Jiang Y, Wang D, Xu L. Effects of plant leaf surface and different pollution levels on PM_{2.5} adsorption capacity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 34: 64-70.
- [72] Corbesier L, Prinsen E, Jacquard A, Lejeune P, Van Onckelen H, Périlleux C, Bernier G. Cytokinin levels in leaves, leaf exudate and shoot apical meristem of Arabidopsis thaliana during floral transition. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(392): 2511-2517.
- [73] 陈宝梁, 周丹丹, 李云桂, 朱利中. 植物角质层的蜡质组分对甲苯酚的吸附作用. *环境科学*, 2008, 29(6): 1671-1675.
- [74] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [75] 是怡芸. 南京常见绿化树种滞留 PM_{2.5} 等大气颗粒物的效应研究. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [76] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin H M, Gawronska H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 347-354.
- [77] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, Gawronski 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.

- [78] 郑铭浩. 重庆主城区常见树种及植物群落对空气颗粒物的调控作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [79] He C, Qiu K, Alahmad A, Pott R. Particulate matter capturing capacity of roadside evergreen vegetation during the winter season. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126510.
- [80] Mori J, Sæbø A, Hanslin H M, Teani A, Ferrini F, Fini A, Burchi G. Deposition of traffic-related air pollutants on leaves of six evergreen shrub species during a Mediterranean summer season. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 264-273.
- [81] Mori J, Hanslin H M, Burchi G, Sæbø A. Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(1): 170-177.
- [82] Shi J N, Zhang G, An H L, Yin W L, Xia X L. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(5): 836-842.
- [83] Zhang X, Lyu J, Han Y, Sun N, Sun W, Li J, Liu C, Yin S. Effects of the leaf functional traits of coniferous and broadleaved trees in subtropical monsoon regions on PM_{2.5} dry deposition velocities. *Environmental pollution*, 2020, 265: 114845.
- [84] Chen B, Li S, Yang X, Lu S, Wang B, Niu X. Characteristics of atmospheric PM_{2.5} in stands and non-forest cover sites across urban-rural areas in Beijing, China. *Urban ecosystems*, 2016, 19: 867-883.
- [85] 彭舜磊, 李鹏, 李世春, 李松田. 煤炭型城市绿化树种叶片磁性及对 PM_{2.5} 的指示作用. *环境科学与技术*, 2017, 40(9): 38-42.
- [86] 胡彦波. 银中杨对二氧化氮/外源氮(硫)化物的形态生理响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [87] 陈卓梅. 二氧化氮胁迫下樟树的生理生化响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [88] Vallano D, Selmants P C, Zavaleta E S. Simulated nitrogen deposition enhances the performance of an exotic grass relative to native serpentine grassland competitors. *Plant Ecology*, 2012, 213: 1015-1026.
- [89] 潘文, 张卫强, 张方秋, 甘先华, 王明怀, 李明帅, 林雯, 彭资. 红花荷等植物对 SO₂ 和 NO₂ 的抗性. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1851-1858.
- [90] Räsänen J V, Yli-Pirilä P, Holopainen T, Joutsensaari J, Pasanen P, Kivimäenpää M. Soil drought increases atmospheric fine particle capture efficiency of Norway spruce. *Boreal Environment Research*, 2012, 17(1): 21-30.
- [91] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, Ndam C, Pasanen P, Rinnan Å, Kivimäenpää M. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 64-70.
- [92] Ji W J, Zhao B. A wind tunnel study on the effect of trees on PM_{2.5} distribution around buildings. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 346: 36-41.
- [93] Xie C K, Kan L Y, Guo J K, Jin S J, Li Z G, Chen D, Li X, Che S Q. A dynamic processes study of PM retention by trees under different wind conditions. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 315-322.
- [94] Lai C, Xiao B, Feng J L, Wang L Y, Zhang Y J, Sun Y J, Chen X X, Guo W. Crown feature effect evaluation on wind load for evergreen species based on laser scanning and wind tunnel experiments. *Scientific Reports*, 2022, 12: 21475.
- [95] Qin H Q, Hong B, Huang B Z, Cui X, Zhang T. How dynamic growth of avenue trees affects particulate matter dispersion: CFD simulations in street canyons. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102331.
- [96] Shen J W, Cui P Y, Huang Y D, Luo Y, Guan J. New insights into quantifying deposition and aerodynamic characteristics of PM_{2.5} removal by different tree leaves. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2022, 15(8): 1341-1356.
- [97] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [98] Chandramouli B, Jang M, Kamens R. Gas-particle partitioning of semivolatile organic compounds (SOCs) on mixtures of aerosols in a smog chamber. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(18): 4113.
- [99] Li K W, Chen L H, White S J, Yu H, Wu X C, Gao X, Azzi M, Cen K F. Smog chamber study of the role of NH₃ in new particle formation from photo-oxidation of aromatic hydrocarbons. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 927-937.
- [100] Yang Q, Wang H, Wang J X, Lu M M, Liu C, Xia X L, Yin W L, Guo H H. PM_{2.5}-bound SO₄²⁻ absorption and assimilation of poplar and its physiological responses to PM_{2.5} pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153: 311-319.
- [101] Ryu J, Kim J J, Byeon H, Go T, Lee S J. Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 253-259.
- [102] 包鹏威, 牛健植, 陈上杰. 室内模拟分析 8 种常绿景观植被对 PM₁₀、PM_{2.5} 的阻滞作用. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 160-164, 171.
- [103] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal*, 2000, 24(2/3): 209-230.
- [104] 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

- [105] 包红光. 城市公园绿地内空气颗粒物浓度时空变化规律——以海淀公园为例. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [106] 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.
- [107] Sgrigna G, Sæbø A, Gawronski S, Popek R, Calfapietra C. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy. *Environmental Pollution*, 2015, 197: 187-194.
- [108] 王慧, 刘庆倩, 安海龙, 刘超, 郭惠红, 夏新莉, 尹伟伦. 城市环境中毛白杨和油松叶片表面颗粒污染物的观察. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 28-35.
- [109] Yin Z, Zhang Y. Climate anomalies contributed to the rebound of PM_{2.5} in winter 2018 under intensified regional air pollution preventions. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138514.
- [110] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 张会兰. 细颗粒物 (PM_{2.5}) 与植被关系的研究综述. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] 孙扬, 王跃思, 李昕, 安俊琳, 辛金元, 胡波. 北京地区一次持续重污染过程 O₃、NO_x、CO 的垂直分布分析. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1616-1622.
- [114] 王希波, 马安青, 安兴琴, 陈尚, 王其翔. 兰州市主要大气污染物浓度季节变化时空特征分析. 中国环境监测, 2007, 23(4): 61-65.
- [115] 王迪. 北京市城市森林氮氧化物 (NO_x) 浓度时空动态变化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [116] 徐衡, 罗俊玲, 张掌权. 集中供暖区大气 PM_{2.5} 季节动态及其影响因素——以陕西省宝鸡市为例. 宝鸡文理学院学报: 自然科学版, 2013, 33(4): 40-43, 57.
- [117] 杨孝文, 周颖, 程水源, 王刚, 王晓琦. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析. 中国环境科学, 2016, 36(3): 679-686.
- [118] 周岳. 西安市东郊春季氮氧化物和二氧化硫浓度时空变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [119] Malek E, Davis T, Martin R S, Silva P J. Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA. *Atmospheric Research*, 2006, 79(2): 108-122.
- [120] Yun G L, Zuo S D, Dai S Q, Song X D, Xu C D, Liao Y L, Zhao P Q, Chang W Y, Chen Q, Li Y Y, Tang J F, Man W, Ren Y. Individual and interactive influences of anthropogenic and ecological factors on forest PM_{2.5} concentrations at an urban scale. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 521.
- [121] Chao C Y, Wong K K, Cheng E C. Size distribution of indoor particulate matter in 60 homes in Hong Kong. *Indoor and Built Environment*, 2002, 11(1): 18-26.
- [122] 吴志萍, 王成, 许积年, 胡立香. 六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(12): 2153-2157.
- [123] 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.
- [124] 沈恒华, 黄世鸿, 李如祥. TSP 的来源与气象因素对 TSP 测试的影响. 环境监测管理与技术, 1996, 8(4): 15-18, 24.
- [125] Zhang R, Ma K M. The impact of climate factors on airborne particulate matter removal by plants. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127559.