DOI: 10.5846/stxb201912302832

范舒欣,李逸伦,李坤,张梦园,郝培尧,董丽.城市绿地植物群落特征对亚微米颗粒物的影响.生态学报,2021,41(1):213-223. Fan S X, Li Y L, Li K, Zhang M Y, Hao P Y, Dong L.Impacts of Plant Community Characteristics on Submicron Particles. Acta Ecologica Sinica, 2021,41 (1):213-223.

城市绿地植物群落特征对亚微米颗粒物的影响

范舒欣,李逸伦,李 坤,张梦园,郝培尧,董 丽

北京林业大学园林学院,城乡生态环境北京实验室,国家花卉工程技术研究中心,北京 100083

摘要:植物群落是构成城市绿地的基本单元之一,也是绿地发挥空气颗粒物调节功能的基础。亚微米级颗粒物,即PM₁颗粒物 对大气能见度、环境质量与人体健康等均存在严重的负面危害。为探究城市绿地植物群落对亚微米颗粒物水平的调节机制,本 研究基于实地测量,针对不同类型植物群落内 PM₁颗粒物水平的差异,以及群落冠层结构对 PM₁浓度的影响开展定量研究。结 果表明,植物群落对亚微米颗粒物具有一定的减滞效果。8 种常见群落类型中,针阔-乔草型群落减滞 PM₁颗粒物的能力最优, 阔叶-乔灌草群落次之,针叶-灌草型群落最弱,但不同类型植物群落内部的 PM₁浓度差异并不显著。植物群落的冠层结构同 PM₁颗粒物间存在明显的非线性响应关系,部分冠层指标存在关键的拐点阈值。当冠层郁闭度大于 75%,疏透度小于 55% 左右 时,植物群落减滞 PM₁颗粒物的效果最佳。

关键词:城市绿地;植物群落;构成类型;冠层结构;亚微米颗粒物

Impacts of Plant Community Characteristics on Submicron Particles

FAN Shuxin, LI Yilun, LI Kun, ZHANG Mengyuan, HAO Peiyao, DONG Li*

College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing 100083, China

Abstract: Plant communities are basic components of urban green spaces, which play potent role in regulating air particle levels. Submicron particles have serious negative effects on air visibility, environmental quality and human health. Understanding the regulation mechanism of plant communities on submicron particles may better facilitate the mitigation of submicron particles (PM_1) pollution through the construction of urban green spaces. Based on field investigations, differences in the daily PM_1 level among eight plant community types were quantitatively analyzed, and correlations between daily PM_1 and various canopy parameters, including canopy density (CD), canopy porosity (CP), leaf area index (LAI) and sky view factor (SVF) were further established to detect critical thresholds. Results shows that plant community has a certain effect on reducing submicron particles, but there is no significant difference in daily PM_1 level among different community types in summer. Among the eight plant community types, mixed trees and grasses type may most effectively reduce PM_1 , followed by broad-leafed trees, shrubs and grasses type, while conifer shrubs and grasses type has the weakest effect. The responses of daily PM_1 to various canopy characteristics are complicated, featuring non-linear relationships with critical thresholds. Plant communities with CD greater than 75% and CP less than 55% have outstanding effects on reducing submicron particles.

Key Words: urban green space; plant community; community composition; canopy structure; submicron particles

收稿日期:2019-12-30; 修订日期:2020-06-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dongli@ bjfu.edu.cn

基金项目:北京林业大学科技创新计划项目(BLX201811);中国博士后科学基金项目(2018M641221);北京市科技计划项目(D171100007117001);北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项(风景园林学)(2019XKJS0320)

随着城市化与工业化的迅猛发展,人类活动日益增多,交通运输和城市建设排放的废气与粉尘等极大地 增加了大气环境中的颗粒物含量^[1-3]。近年来,大气颗粒物污染已成为制约许多城市健康发展的突出环境压 力之一^[4]。以北京为例,2018年北京全年138d空气质量未达标,占全年38%,重污染日15d。大气颗粒物仍 是北京的首要空气污染物^[5]。空气中颗粒物含量过高,会造成雾霾天气,降低大气能见度^[6-7]。甚至引发光 化学烟雾,加剧局地热岛效应,进而引发一系列环境问题^[8-9]。许多流行病学研究发现,长期暴露于空气颗粒 物污染环境可能罹患心、肺血管和呼吸道疾病^[10-12]。因此,从可持续发展的角度,探寻长久可行、经济有效的 空气颗粒物污染治理手段已成为全球性热点问题。

近年来,大量研究证实,植物可以通过自身的阻挡、吸收与滞纳等作用影响空气中颗粒物的水平与分布^[13-14]。个体植物经过组合形成群落,充足的枝叶能够滞纳与吸收更多不同粒径的颗粒物,复杂的群落冠层也可改变气流运动的速度与方向,促进颗粒物的沉降或扩散衰减^[15-16]。城市绿地中,植物群落是能够有效发挥颗粒物减滞功能的基本单位。不同植物群落具有各异的构成类型与层次结构。目前,多数学者认为,相对于单型群落,混交群落减滞颗粒物的效果更佳^[17-19]。以乔木为主的复层群落的调节效果明显强于其他类型^[20-21]。此外,有研究发现,植物群落的郁闭度、叶面积指数越大,减滞颗粒物的效果越好^[22-23]。但某些情况下,稠密植被会抑制近地面的空气交换,反而不利于颗粒物的扩散衰减^[24]。因此,随着定量研究的不断深入,逐渐有研究开始探讨群落冠层对空气颗粒物的影响是否存在阈值^[25-26]。但目前,相关领域并没有足够的成果积累,可用于指导城市绿地植物群落营建的关键阈值尚不明确。

不仅如此,空气中的颗粒物,按其空气动力学等效直径的大小,一般被分为可吸入颗粒物(PM₁₀,粒径<10.0μm)、细颗粒物(PM_{2.5},粒径<2.5μm)和亚微米颗粒物(PM₁,粒径<1.0μm)等。粒径较大的颗粒物容易 受到障碍物的直接拦截或重力作用发生沉积。小粒径颗粒物则更依赖于布朗运动撞击和向外扩散来实现浓度衰减^[27-28]。近年来,大气颗粒物研究主要集中在 PM₁₀和 PM_{2.5}上。随着环境监测技术的不断发展,亚微米 级颗粒物正日益引起人们的关注。研究表明,空气颗粒物大部分的二次化学转化都发生在 1μm 以下的粒径 段内,且 0.1—1μm 粒子浓度较高时,其强亲水性和产生的消光效应是导致大气能见度快速下降的主要原 因^[29-30]。同时,由于亚微米颗粒物比表面积更大,极易吸附病原体和有毒有害物质进入人体造成危害^[31]。目前,有关亚微米颗粒物的研究尚在起步阶段,一般集中在其化学组成与形成机制方面。针对绿地调节亚微米 级颗粒物的研究几乎空白,鲜有报道。

考虑到上述问题,为定量解析高度异质化的城市环境中,绿地植物群落对亚微米颗粒物(PM₁)的调节机制及其影响因子,本研究基于实地测量,重点探究以下几个问题:(1)不同植物群落类型内部 PM₁颗粒物的水 平特征;(2)PM₁颗粒物浓度对群落冠层结构特征的响应,以及是否存在关键阈值?研究结果将为未来基于改善城市空气污染的城市绿地规划设计提供理论指导。

1 研究方法

1.1 研究区概况

北京(39°56′N, 116°20′E)位于华北平原西北部,四季分明,春秋短暂,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,属 暖温带半湿润大陆性季风气候。以 2018年北京市气象统计数据为例,全年平均气温为 11.9℃,年平均降雨量 为 575.5mm^[32],雨量集中在夏季。夏季时主要风向为东北与东南风,冬季相反。2018年全年,PM_{2.5}平均浓度 51µg/m³,PM₁₀年平均浓度值 78µg /m³,分别超过国家标准 46%和 11%^[3]。

城市居住区拥有高度异质化的内部环境和复杂的下垫面格局,是城市环境的"缩影",因而十分适合开展局地与小尺度研究。基于前期实地踏查,本研究选定北京朝阳区望京花园(WJHY:40°0'N,116°28'E),秀园(XY:39°59'N,116°24'E)、水碓子(SDZ:39°55'N,116°28'E)与和平家园(HPJY:39°57'N,116°25'E)4个居住区作为研究样地,开展实地监测。4个居住区样地均匀分布在朝阳区西北部,彼此间平均相距 6.58km,周围无大型绿地,处在相似的城市背景气象条件下。所选各居住区样地均被周边城市街道围合,内部地势平坦,绿地

表1 4个样本居住区基本信息

Table 1 Informations of 4 sampling residential areas							
居住区 Residential Area	建成时间 Build time	总面积 Total area/m ²	绿地面积 Vegetation area/m ²	绿地覆盖率 Vegetation coverage/%			
望京花园	2002	239167.20	113197.80	47.33			
秀园	2003	135437.57	58915.34	43.50			
水碓子	1993	129022.85	64214.67	49.77			
和平家园	1985	499524.66	292521.60	58.56			

覆盖率在 50% 左右, 能够覆盖不同的群落特征梯度。4个样本居住区的基本信息见表 1。

1.2 群落样地选择

群落构成类型试验开展于望京花园、秀园与水碓子居住区。在前期实地踏查中分别于3个样本居住区的 绿地内选定10m×10m的群落样方各8个,共计24个。所选群落样方覆盖针阔-乔灌草、阔叶-乔灌草、针叶-乔 灌草、针阔-乔草、阔叶-乔草、针叶-乔草、阔叶-灌草与针叶-灌草8种北京城市绿地中常见的群落类型。各群 落样方内不同生活型的植物混交且比例适中,所有植物均生长良好。各群落样方中心距周边建筑的距离均大 于10m,以避免其对测量结果的干扰。样本群落信息见表2。

群落编号 No.	构成类型 Composition types	平均株高 Average height/m	平均冠幅 Average crown diameter/m	平均胸径/地径 Average DBH/GD	阔叶树数量占比 Percent of broad- leaved species/%	乔木数量占比 Percent of tree species/%
A1	针阔乔灌草	6.21	4.30	11.25	75	62.5
A2	阔叶乔灌草	5.40	3.95	16.00	100	50
A3	针叶乔灌草	8.84	3.26	10.18	0	57.1
A4	针阔乔草	9.29	4.46	14.53	66.7	100
A5	阔叶乔草	2.93	2.22	15.35	100	100
A6	针叶乔草	4.79	3.91	8.73	0	100
A7	阔叶灌草	1.63	2.48	13.44	100	0
A8	针叶灌草	0.73	1.47	5.02	0	0
B1	针阔乔灌草	4.06	3.92	18.70	77.8	44.4
B2	阔叶乔灌草	3.86	5.77	8.78	100	41.7
В3	针叶乔灌草	7.19	3.45	8.75	0	37.5
B4	针阔乔草	5.32	3.03	17.69	83.3	100
В5	阔叶乔草	7.39	3.30	8.13	100	100
B6	针叶乔草	5.43	2.84	12.11	0	100
В7	阔叶灌草	1.58	1.15	16.81	100	0
B8	针叶灌草	0.58	2.08	5.25	0	0
C1	针阔乔灌草	5.32	3.19	12.87	71.4	57.1
C2	阔叶乔灌草	7.91	4.54	14.36	100	62.5
C3	针叶乔灌草	6.27	2.63	19.67	0	42.9
C4	针阔乔草	8.33	4.22	20.04	60	100
C5	阔叶乔草	4.45	3.53	15.93	100	100
C6	针叶乔草	5.32	3.08	14.04	0	100
C7	阔叶灌草	1.93	2.46	7.60	100	0
C8	针叶灌草	0.61	1.35	4.37	0	0

表 2 类型试验样本群落基本信息 Table 2 Details of the sampling community

编号 A 代表样本群落来自望京花园住区; B 代表样本群落来自秀园住区; C 代表样本群落来自水碓子住区; 平均株高、冠幅、胸径/地径、阔叶树数量占比与乔木数量占比仅针对乔、灌木进行统计

群落冠层结构试验开展于和平家园居住区。前期实地踏查中,于样本居住区绿地内选定 15m×15m,冠层 结构具有一定的变化梯度的群落样方9个。所选群落样方全部为乔灌草复层结构,内部不同生活型的植物混 交且比例适中,所有植物均生长良好。各群落样方中心距周边建筑的距离均大于 10m,以避免其对测量结果 的干扰。样本群落的基本信息详见表 3。4个样本居住区和 33 个群落样方的位置如图 1 所示。

Table 3 Details of the sampling community							
群落编号 No.	构成类型 Composition types	平均株高 Average height/m	平均冠幅 Average crown diameter/m	平均胸径/地径 Average DBH/GD/cm	阔叶树数量占比 Percent of broad-l eaved species/%	乔木数量占比 Percent of tree species/%	
D1	针阔乔灌草	9.10	4.50	19.50	76.9%	53.8%	
D2	阔叶乔灌草	5.63	4.53	11.47	100%	50.0%	
D3	阔叶乔灌草	4.67	4.01	9.13	100%	58.3%	
D4	针阔乔灌草	11.15	6.34	18.53	73.7%	63.1%	
D5	针阔乔灌草	8.92	6.48	19.49	77.8%	77.8%	
D6	针阔乔灌草	6.40	4.77	14.39	83.3%	66.7%	
D7	阔叶乔灌草	11.74	4.70	29.89	100%	72.7%	
D8	针阔乔灌草	8.57	5.69	28.74	64.3%	64.3%	
D9	针阔乔灌草	6.97	3.21	15.55	84.6%	69.2%	

表 3 冠层试验样本群落基本信息

编号 D 代表样本群落来自和平家园住区;平均株高、冠幅、胸径/地径、阔叶树数量占比与乔木数量占比仅针对乔、灌木进行统计



图 1 4个样本居住区和 33个群落样方的位置分布示意图 Fig.1 Locations of 4 sampling residential areas and 33 plant community sites

http://www.ecologica.cn

1.3 亚微米颗粒物水平测定

空气颗粒物水平的测定统一在晴朗无风无重霾(风速≤2m/s、避开中度及以上污染天气)且基础天气条件(气温、湿度与空气质量)相近的连续观测日进行。每个观测日的观测时间统一为8:00—18:00,每2h测定一轮,共6个标准时刻。采用双程路线移动监测法,以此来降低移动监测过程中,时间变化对测定结果的潜在 干扰。

群落的构成类型实验开展于 2015 年 8 月 9—11 日和 14—16 日(夏季),共进行两组 6d。每 3 个连续实验 日被视为一个完整的监测期。第一组实验日测定时始终以正序路线完成所有测定,第二组为倒序。各时段同 一测点的往返数据进行算数平均后代表该时段观测值。群落的冠层结构实验开展于 2015 年 7 月 1—2 日, 7—8 日,11—12 日(夏季),共进行三组 6d 的测量。每两个连续实验日被视为一个完整的监测期,第一天始 终以正序路线完成所有测定,第二天则为倒序。各时段同一测点的往返数据进行算数平均后代表该时段观测 值。PM₁浓度的测定借助 Dustmate 手持式空气颗粒物监测仪。于测点位置每间隔 1min 记录一组 PM₁浓度, 重复读取 6 次,均值代表各点 PM₁ 浓度的该时刻水平。本研究中,所有测点位置统一设置在各群落样方的中 心位置处,观测高度始终距地面 1.2m。移动监测过程中,每个测点的停留时间约为 6—7min,测点间快速移动 时间约 1min,每轮每个测点的监测时间均被严格同步记录。

1.4 群落类型与冠层特征测定

群落样方的构成类型通过实地调查群落构成树种与层次结构获得。每个群落内部如图 2 所示位置设置测量点,在各测量点距地 1.5m 高度处假设仪器以测定各群落冠层参数。测定统一于均匀的阴天(无强烈的太阳直射)开展。测点均值代表被测群落的郁闭度(CD)、疏透度(CP)、叶面积指数(LAI)及天空可视因子(SVF)。

CD 测定,利用单反相机垂直向上(天空)拍照,照片导入 Photoshop 软件处理,郁闭度即为各群落冠层横断面在水平方向所占的像素比例。

CP 测定,利用单反相机垂直向中心方向拍照,照片导入 Photoshop 软件处理,疏透度即为群落冠层纵断面透光空隙在垂直方向所占的像素比例。

LAI 测定,借助 LAI-2200 冠层分析仪直接测定,必要时探头上加装带有一定角度的遮光镜盖,避免障碍物干扰。

SVF 测点,使用携带鱼眼镜头的全画幅单反相机垂直向上(天空)拍照,鱼眼照片经 Photoshop 软件初步 处理后,导入 Rayman 软件计算天空可视因子,示例见图 3。

表4 样本群落冠层结构参数 Canopy structure parameters of the sampling community Table 4 群落编号 郁闭度 疏透度 叶面积指数 天空可视因子 Canopy porosity/% Canopy porosity/% Leaf area index Sky view factor/% No. D1 44.879 70.864 1.322 0.476 D257.311 57.192 1.506 0.324 D3 67.264 63.336 1.714 0.412 2.356 0.238 D4 71.369 57.968 D5 75.840 54.686 2.268 0.249 77.589 51.036 2.540 0.185 D6 D7 82.392 53.866 2.932 0.147 D8 89.585 43.706 3.294 0.112 D9 92.280 42.213 2.968 0.095

基于以上,9个选定样本群落冠层结构参数的测定结果如表4所示:

编号 D 代表样本群落来自和平家园住区;平均株高、冠幅与胸径/地径仅针对乔、灌木进行统计

1.5 数据分析

在每个观测日,6个时刻观测值的算数平均数代表 日平均水平。本研究使用单因素方差分析与 Duncan 多 重比较检验不同构成类型群落间日均 PM₁水平的差异, 借助 Person 双变量相关分析解析不同冠层结构指标与 日均 PM₁浓度间的相互关系,两者间的响应关系可视化 借助非线性曲线拟合完成。所有统计分析均采用 SPSS 22.0 软件,*P*<0.05 视为具有统计学意义;非线性拟合借 助 Origin 9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 不同类型植物群落的 PM₁浓度

如图 4 所示, 针阔-乔草型群落的日均 PM₁浓度最低, 为(5.82±0.51) µg/m³, 其次为阔叶-乔灌草型(6.13±0.58) µg/m³和阔叶-乔草型(6.31±0.56) µg/m³, 针叶-灌草型的日均 PM₁浓度最高(7.16±0.34) µg/m³, 高出最低值 1.34 µg/m³。8 种类型群落的日均 PM₁水平以针阔-乔草<阔叶-乔灌草<阔叶-乔草<针阔-乔灌草<针叶-乔灌草<针叶-乔灌草<针叶-乔灌草<针叶-漆草的顺序依次递增。方差分析结果显示, 不同群落类型间不存在具有统计意义的显著差异(P=0.092)。

层次结构方面(图 5),日均 PM₁浓度的最低值出现 在乔草型群落,为(6.25±0.40)µg/m³,其次为乔灌草型 (6.42±0.28)µg/m³,灌草型最高(7.08±0.08)µg/m³。 尽管 8 种群落类型间无显著差异,但在复层结构方面, 大类间存在显著差异(P=0.027)。生活型构成方面,针 阔混交型群落(6.45±0.63)µg/m³与阔叶混交型群落 (6.48±0.46)µg/m³的日均 PM₁水平基本持平,而针叶 混交型群落高于前两者,为(6.82±0.29)µg/m³。三者 之间相差不大,差异不显著。



图 2 群落样方冠层郁闭度、叶面积指数与天空可视因子测点布 置示意图

Fig.2 Schematic diagram of measuring point of Canopy density (CD), Leaf area index (LAI) and Sky view factor (SVF) in sample community



图 3 夏季群落样方天空可视因子示例 Fig.3 Example of SVF of one sample community in summer

2.2 PM₁浓度对群落冠层结构变化的响应

表 5 和表 6 分别显示了各群落样方的日均 PM₁浓度,以及各冠层结构指标与日均 PM₁浓度之间的 Person 相关系数。

表 5 样本群洛日半均 PM ₁ 浓度									
	Table	5 Daily av	erage PM ₁	level in the	sampling co	ommunity			
群落编号 No.	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
PM_1 浓度 level/($\mu g/m^3$)	13.027	12.583	11.519	11.869	11.718	11.200	12.170	12.135	12.378
绝县 医 化基诺素 恶毒素 医白细亚 家园住屋 一亚 物批查 祭师 医胸外 网络小母子 新大 进行统计									

号D代表样本群落来自和平家园住区。平均株高、冠幅与胸径/地径仅针对乔、灌木进行统计

群落内日均 PM₁浓度同郁闭度之间不存在显著的相关关系(*P*>0.05)。基于非线性拟合趋势线(图 6 与表 7, 拟合收敛, *R*²=0.801)显示, 造成这种无明显相关的原因在于 PM₁浓度随着郁闭度的增加先呈现明显的下降趋势, 说明植被冠层对于 PM₁浓度的减滞有着明显的积极作用。但当群落郁闭度超过一定范围(75%左







1: 针阔乔灌草; 2: 阔叶乔灌草; 3: 针叶乔灌草; 4: 针阔乔草; 5: 阔叶乔草; 6: 针叶乔草; 7: 阔叶灌草; 8: 针叶灌草



图 5 复层结构与构成类型的日平均 PM₁浓度水平比较

Fig.5 Comparison of daily average PM₁ concentrations in multilayer structure and composition types

右)仍继续增加时,过高的群落郁闭度容易导致小粒径颗粒物在冠下积累,反而呈现随之增加的态势。75%为 郁闭度调节 PM,浓度的关键阈值,群落减滞 PM,的强度随此范围内郁闭度的增加而迅速提升。

Table 6 Correlation coefficients between community canopy structures and daily average PM ₁ level									
		郁闭度 Canopy porosity/%		疏透度 Canopy porosity/%		叶面积指数 Leaf area index		天空可视因子	
群洛编号 N								Sky view factor/%	
No.		cc	sig.	cc	sig.	cc	sig.	сс	sig.
PM ₁ 浓度 level/(µg/	m ³)	-0.419	0.261	0.246	0.524	-0.289	0.451	0.264	0.492

表 6 群落冠层结构特征与日平均 PM_1 浓度之间的 Person 相关性

cc代表相关系数;sig.代表显著性,*与**表示显著水平

PM₁日均水平同群落疏透度之间的相关关系未达到显著水平(*P*>0.05)。由拟合趋势线(图 6 与表 7,拟 合收敛, *R*² = 0.403)可以看出, 疏透度因子与冠下 PM₁日均水平之间的拟合强度弱于郁闭度。随着群落疏透

度的增加,PM₁浓度呈现先降低后升高的整体趋势,关键拐点出现在 55% 左右。这说明,在安全阈值范围内 (低于 55%)群落疏透度的增加有利于对 PM₁的吸滞,但当植物群落在水平方向的疏透度超过 55%时,则不利 于对亚微米颗粒物的减滞。

由表 6,群落内日均 PM₁浓度与叶面积指数和天空可视因子间均不存在显著相关关系(*P*>0.05)。同时, 如图 6 所示,日均 PM₁浓度与群落叶面积指数之间的拟合曲线呈"U"型趋势,群落叶面积指数增加,群落内 PM₁浓度先降低后升高,拐点出现在 2.30 左右。日均 PM₁浓度与天空可视因子之间的拟合曲线呈"√"型趋 势,天空可视因子增大,日均 PM₁浓度先降低后升高,上升段的占比明显大于下降段,谷值出现在 0.18 左右。 但由于两组非线性拟合在达到最大迭代数后都仍未能收敛(表 7,*R*²分别为 0.598 和 0.361),故该曲线仅可作 为趋势参考。推测当群落叶面积指数过高、天空可视因子过低时可能影响 PM₁的扩散衰减,但当情况反之时, 其内部 PM₁浓度也会相应的较高。



图 6 PM₁浓度同群落冠层特征参数的非线性拟合关系



表 7	群落冠层结构特征与日均 PM	浓度之间的非线性拟合

Table 7	Nonlinear fitting	between communit	y canopy structur	es and daily	average PM	level

		0 1	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合收敛 Fitting convergence
郁闭度与 PM ₁ 浓度 Canopy density and PM ₁	$y = 13.2089+(-58.10618/(28.54632 \times \text{sqrt}(pi/2))) \times \exp(-2 \times ((x - 74.91193)/28.54632)^2)$	0.801	收敛
疏透度与 PM ₁ 浓度 Canopy porosity and PM ₁	$y = 21143.02672 + (-21131.22863) \times \exp(-0.5 \times ((x - 53.70063)/1696.90609)^2)$	0.403	收敛
叶面积指数与 PM ₁ 浓度 LAI and PM ₁	$y = 71.22972 + (-785.7837/(10.51559 \times \text{sqrt}(pi/2))) \times \exp(-2 \times ((x8-2.38617)/10.51559)^2)$	0.598	未收敛
天空可视因子与 PM ₁ 浓度 SVF and PM ₁	$y = 13.46035 + (-0.83978)/(\operatorname{sqrt}(2 \times pi) \times 0.7251 \times x) \times \exp(-(\ln(x + 0.33774))^2/(2 \times 0.7251^2))$	0.361	未收敛

3 讨论

植物群落对空气颗粒物的调节是直接与间接作用相互复合的。一方面,亚微米级的细小气溶胶颗粒可以 被植物叶片上的气孔、皮孔、粘液等结构直接吸收清除^[13,33]。另一方面,大量研究表明,空气温、湿度、风速等 与颗粒物因子彼此间存在着复杂的相互作用关系。特别是小粒径颗粒物,其扩散与积聚对于微气候因子的响 应尤为敏感^[34]。群落冠层结构对冠下微气候与空气流动的影响明显,进而会间接影响冠下空气颗粒物的水 平与分布。

首先,不同构成类型的群落,因内部构成树种的差异,使其对亚微米颗粒物的直接调节效果本身既是不同 的。有研究发现,针叶树更小更多的叶子和更复杂紧密的枝冠结构对空气颗粒物的拦截与吸收效果显著。甚 至,松属植物某些针叶树种分泌的黏性汁液^[35],可使被黏附的颗粒物很难再次进入到空气中^[36,18]。但也有 研究发现一些针叶树释放的有机挥发物可以转化为二次有机气溶胶,进而形成 PM_{2.5}、PM₁等细小颗粒物^[37]。 这可能是造成针阔混交型群落对 PM₁颗粒物的减滞效果与阔叶型混交群落基本持平,而又优于针叶型混交群 落的主要原因。从生活型的角度来看,乔木是承担空气颗粒物净化作用的主体^[38,39]。拥有乔木层的群落总 体枝叶量更大,能够提供更多的气孔和皮孔吸滞 PM₁颗粒物。因此,在本研究中,乔草型群落对 PM₁颗粒物的 减滞效果优于乔灌草型群落。而灌草型的减滞效果总是最弱。其次,不同构成类型的群落具有不同的冠层特 征,还会影响其对 PM₁颗粒物的间接调节效果。当群落内部叶量过于稀少时,不利于其对 PM₁颗粒物的拦截 和吸收,但当群落的层次结构过于致密时又可能会阻碍 PM₁颗粒物随着空气流动的向外扩散。因此,既具有 充足叶量,又能保持内部气流通透的针阔-乔草型群落调节效果最好。这与 Litschke 和 Kuttler^[13]的研究发现 基本一致。

本研究中,冠层结构由群落郁闭度、疏透度、叶面积指数与天空可视因子表征。郁闭度与天空可视因子反 映群落冠层在垂直方向的致密度,影响群落内部与上层空气的垂直交换;疏透度反映冠层在水平方向的孔隙 度,影响着群落同其周围的水平空气交换;叶面积指数则反映群落整体叶面数量水平,决定了一个群落可以提 供多少叶片拦截颗粒物。本研究中,PM₁浓度对群落郁闭度、疏透度、叶面积指数与天空可视因子之间的双变 量相关分析均未达到显著水平。但通过非线性回归拟合发现,PM₁浓度对群落冠层结构的响应较为复杂,整 体呈现为存在临界拐点的非线性关系。这可能是由于亚微米级颗粒物通常依靠扩散稀释而衰减,植物群落冠 层对其的调节作用主要依托于间接作用^[40]。本研究中所有实验日均为静风或微风天气,当群落冠层过于稀 疏时,无法提供足够的叶片拦截吸收 PM₁颗粒物。但当冠层结构过于致密时,不仅会阻碍亚微米颗粒物随空 气湍流向大气上层或水平扩散。还可能由于低温、高湿的冠下条件,减弱亚微米粒子的布朗运动,使其吸湿凝 聚而浓度增高^[15,41]。Janhall^[16]曾提到,植被屏障需要充分的致密,以提供一个大的沉积表面面积,但应保证 其多孔性允许空气渗透和颗粒物的向上扩散。这一观点与本研究所得结果较为一致。但值得注意的是,本研 究所尝试的非线性拟合中,仅群落郁闭度与疏透度因子的拟合达到收敛,叶面积指数与天空可视因子的拟合 曲线尽管也呈现出了拐点趋势,但其拟合在达到最大迭代数后仍未能收敛。这可能与本研究样本数量有限, 未能提供更多数据代入运算有关。故而针对这两个冠层结构参数,目前证据暂时无法给出可供参考的关键阈 值,未来仍需要扩大样本量,开展更为深入的研究。

目前,仅有极少数学者报道了群落冠层结构影响大粒径空气颗粒物水平的关键阈值。例如,陈小平等^[42] 对城市交通干道隔离绿化带的研究发现当疏透度在 10%—20%,郁闭度在 75%—90%时,绿化带对 TSP 的净 化效率较高。殷杉等^[26]则认为植物群落净化 TSP 的最佳郁闭度和疏透度分别为 0.70—0.85 和 0.25—0.33。 但针对细颗粒物,乃至亚微米颗粒物,相关研究几乎空白。本研究中,郁闭度达到 75%,疏透度在 55%左右的 植物群落对 PM₁颗粒物的减滞效率最为优秀。但很显然,目前无论针对何种粒径级别,关于冠层结构关键阈 值的探讨,仍迫切需要更多的研究数据予以支撑和验证。

4 结论

在本研究中,城市绿地植物群落对亚微米颗粒物具有一定的减滞效果。8种常见群落类型中,针阔-乔草 型群落减滞 PM₁颗粒物的能力最优,阔叶-乔灌草群落次之,针叶-灌草型群落最弱。但不同类型植物群落内 部的 PM₁浓度差异并不显著。植物群落的冠层结构同亚微米颗粒物间存在着明显的非线性响应关系,部分指 标存在关键的拐点阈值。郁闭度大于 75%,疏透度小于 55%的植物群落,其减滞 PM₁颗粒物的效果最佳。合 理的群落构成与冠层结构配置能在一定程度上提高绿地对于亚微米颗粒物的调节作用,从而帮助缓解城市空 气污染,改善城市环境质量。

致谢:感谢北京林业大学园林学院李晓鹏、吴凡、曹钰、郭加、韩晶等在试验采样工作中给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] King K L, Johnson S, Kheirbek I, Lu J W T, Matte T. Differences in magnitude and spatial distribution of urban forest pollution deposition rates, air pollution emissions, and ambient neighborhood air quality in New York City. Landscape and Urban Planning, 2014, 128: 14-22.
- [2] Peng J, Chen S, Lü H L, Liu Y X, Wu J S. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 109-121.
- [3] 韩立建. 城市化与 PM2.5 时空格局演变及其影响因素的研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1011-1021.
- [4] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities. Environmental Pollution, 2014, 194: 163-170.
- [5] 北京市生态环境局. 2018 年北京市 PM_{2.5}年平均浓度 51 微克/立方米空气质量持续改善. (2019-01-04) [2020-03-10]. http://www. beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/t1574107.htm.
- [6] 沈铁迪, 王体健, 陈璞珑, 蒋自强. 南京城区夏秋季能见度与 PM25化学成分的关系. 中国环境科学, 2015, 35(3): 652-658.
- [7] Li Y G, Huang H X H, Griffith S M, Wu C, LauA K H, Yu J Z. Quantifying the relationship between visibility degradation and PM_{2.5} constituents at a suburban site in Hong Kong: differentiating contributions from hydrophilic and hydrophobic organic compounds. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1571-1581.
- [8] 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.
- [9] 贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 雷宇, 赵晴, Tanaka S, Okuda T. 北京大气颗粒物污染的区域性本质. 环境科学学报, 2009, 29(3): 482-487.
- [10] Delfino R J, Sioutas C, Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(8):934-946.
- [11] Pascal M, Falq G, Wagner V, Chatignoux E, Corso M, Blanchard M, Host S, Pascal L, Larrieu S. Short-term impacts of particulate matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on mortality in nine French cities. Atmospheric Environment, 2014, 95: 175-184.
- [12] 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.
- [13] Litschke T, Kuttler W. On the reduction of urban particle concentration by vegetation-a review. Meteorologische Zeitschrift, 2008, 17(3): 229-240.
- [14] Paoletti E, Bardelli T, Giovannini G, Pecchioli L. Air quality impact of an urban park over time. Procedia Environmental Sciences, 2011, 4: 10-16.
- [15] Cavanagh J A E, Zawarreza P, Wilson J G. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. Urban Forestry & Urban Greening, 2009, 8(1): 21-30.
- [16] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution-Deposition and dispersion. Atmospheric Environment, 2015, 105: 130-137.
- [17] 刘娇妹,李树华,吴菲,刘剑,张志国.纯林、混交林型园林绿地的生态效益. 生态学报, 2007, 27(2): 674-684.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Fowler D, Skiba U, Nemitz E, Choubedar F, Branford D, Donovan R, Rowland P. Measuring aerosol and heavy metal deposition on urban

woodland and grass using inventories of ²¹⁰Pb and metal concentrations in soil. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2004, 4(2/3): 483-499.

- [21] Skelhorn C, Lindley S, Levermore G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: a fine scale assessment in Manchester, UK. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 129-140.
- [22] Hardin P J, Jensen R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a terre haute case study. Urban Forestry & Urban Greening, 2007, 6(2): 63-72.
- [23] 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.
- [24] Setälä H, Viippola V, Rantalainen A L, Pennanen A, Yli-Pelkonen V. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? Environmental Pollution, 2013, 183: 104-112.
- [25] 唐泽,任志彬,郑海峰,何兴元.城市森林群落结构特征的降温效应.应用生态学报,2017,28(9):2823-2830.
- [26] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 申哲民, 邹晓东, 吴旦, 王文华. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益. 生态学报, 2007, 27(11): 4590-4595.
- [27] Beckett K P, Freersmith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. Environmental Pollution, 1998, 99(3): 347-360.
- [28] Freer-Smith P H, Beckett K P, Taylor G. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides × trichocarpa 'Beaupré', Pinus nigra and × Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. Environmental Pollution, 2005, 133(1): 157-167.
- [29] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 何新星. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布. 环境科学, 2007, 28(1): 14-19.
- [30] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. Angewandte Chemie International Edition, 2005, 44 (46): 7520-7540.
- [31] Dockery D W. Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(S4): 483-486.
- [32] 北京市气象局. 2018 年北京天气情况回顾. (2019-01-08) [2020-03-10]. http://k.sina.com.cn/article_2611704935_9bab746702700ei3i. html.
- [33] 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.
- [34] Dimitriou K, Kassomenos P. Local and regional sources of fine and coarse particulate matter based on traffic and background monitoring. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3/4): 413-433.
- [35] 崔琳,王力刚,张玉柱,毕广有.防护林对 PM2.5等颗粒物的阻滞吸附作用研究进展.防护林科技,2017,(10):89-90.
- [36] Tallis M, Taylor G, Sinnett 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.
- [37] Hallquist M, Wenger J C, Baltensperger U, Rudich Y, Simpson D, Claeys M, Dommen J, Donahue N M, George C, Goldstein A H, Hamilton J F, Herrmann H, Hoffmann T, Iinuma Y, Jang M, Jenkin M E, Jimenez J L, Kiendler-Scharr A, Maenhaut W, McFiggans G, Mentel T F, Monod A, Prévôt A S H, Seinfeld J H, Surratt J D, Szmigielski R, Wildt J. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(14): 5155-5236.
- [38] Popek R, Gawrońska H, Wrochna M, Gawronski S, Sæbø A. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes--a 3-year study. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 245-256.
- [39] 范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 白伟岚, 皮定均, 李雄, 董丽. 北京市 26 种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力. 植物生态学报, 2015, 39(7): 736-745.
- [40] 孙欢欢, 倪长健, 崔蕾, 周智敏, 周如雨. 成都市大气颗粒物污染特征及与气象因子的关联性分析. 环境污染与防治, 2016, 38(5): 55-60.
- [41] Qin Z, Li Z D, Cheng F Y, Chen J F, Liang B. Influence of canopy structural characteristics on cooling and humidifying effects of *Populus tomentosa* community on calm sunny summer days. Landscape and Urban Planning, 2014, 127: 75-82.
- [42] 陈小平,肖慧玲,周志翔,张梦,刘子琪,龚晓萍.城市道路典型绿带结构对总悬浮颗粒物的净化效应.长江流域资源与环境,2014,23 (11):1620-1626.