

DOI: 10.5846/stxb201907311617

顾康康, 钱兆, 方云皓, 孙圳, 温红. 基于 ENVI-met 的城市道路绿地植物配置对 PM_{2.5} 的影响研究. 生态学报, 2020, 40(13): 4340-4350.

Gu K K, Qian Z, Fang Y H, Sun Z, Wen H. Influence of vegetation arrangement on PM_{2.5} in urban roadside based on ENVI-met. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4340-4350.

基于 ENVI-met 的城市道路绿地植物配置对 PM_{2.5} 的影响研究

顾康康^{1,2,*}, 钱兆¹, 方云皓¹, 孙圳¹, 温红¹

¹ 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 合肥 230022

² 安徽省城镇化发展研究中心, 合肥 230022

摘要: 随着城市化的快速发展, 大气污染尤其细颗粒物 (PM_{2.5}) 已成为制约城市环境的重要因素, 相关研究表明, 在众多的 PM_{2.5} 来源中道路交通是在其中的重要来源之一, 而道路绿地植物群落能够消减来自道路的 PM_{2.5}。运用场地观测和 ENVI-met 模拟相结合的方法探讨城市道路绿地植物群落对 PM_{2.5} 的影响, 分析仅有乔木 (i)、乔木+树篱 (ii)、乔木+树篱+灌木 (iii) 3 种模式下的植物群落配置对 PM_{2.5} 的影响, 揭示绿地植物群落的长度、宽度、高度和 LAI 对 PM_{2.5} 的影响。结果表明: (1) 场地观测中的道路绿地植物群落的 3 种配置模式对 PM_{2.5} 的消减率分别是 iii (14.2%) > ii (12.9%) > i (9.2%)。 (2) 绿地中植物的种类、绿地宽度、绿地植物的叶面指数等要素对消减作用起正面作用, 高度和长度起负面作用。 (3) 绿地的长度的一定量的减少可以在绿地后方形成一个宽度约为绿地长度 80% 的、随着与绿地的距离的增加而宽度递减的较绿地长度更长环境 PM_{2.5} 浓度更低的低谷区, 但其他没有绿地的空间的 PM_{2.5} 浓度会加重。 (4) 绿地高度的增加会迫使 PM_{2.5} 向更高的空间运动。

关键词: PM_{2.5}; 道路绿地; 植物群落; ENVI-met; 合肥

Influence of vegetation arrangement on PM_{2.5} in urban roadside based on ENVI-met

GU Kangkang^{1,2,*}, QIAN Zhao¹, FANG Yunhao¹, SUN Zhen¹, WEN Hong¹

¹ School of Architecture & Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China

² Research Center of Urbanization Development in Anhui Province, Hefei 230022, China

Abstract: With the rapid development of urbanization, air pollution, especially fine particulate matter (PM_{2.5}), has become an important factor restricting urban environment. Relevant studies have shown that road traffic is one of the important sources of PM_{2.5} among many sources, and plant communities in road greenbelt could reduce PM_{2.5}. In this study, a combination of site observation and ENVI-met simulation was used to investigate the influence of plant communities in urban road greenbelt on PM_{2.5}. We also analyzed the influence of plant community configuration on PM_{2.5} in three modes including tree (i), tree+hedge (ii), and tree+hedge+shrub (iii), so as to reveal the influence of length, width, height and LAI on PM_{2.5}. The results showed that (1) in field observation, the reduction rate of PM_{2.5} in the three configuration modes of plant community of road greenbelt was iii (14.2%) > ii (12.9%) > i (9.2%). (2) The increase of plant species, greenbelt width, and leaf area index played a positive role in PM_{2.5} reduction, while the increase of height and length played a negative role. (3) A certain amount of reduction in the length of the green space formed a region behind the green space

基金项目: 2018 年度安徽省教育厅高校自然科学基金项目 (KJ2018ZD047); 2018 年度安徽省教育厅高校自然科学基金项目 (KJ2018A0504); 2019 年度安徽省自然科学基金项目 (1908085ME140)

收稿日期: 2019-07-31; **修订日期:** 2020-03-31

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

that had a lower PM_{2.5} concentration than the longer length environment. The width of this area was about 80% of the length of the green space and decreased as the distance from the green space increased. However, the PM_{2.5} concentration of other spaces without green space would increase. (4) The increase in green space height would force PM_{2.5} to higher space.

Key Words: PM_{2.5}; road greenbelt; plant communities; ENVI-met; Hefei

随着我国城镇化的快速发展,大气污染已成为制约城市环境的重要因素,并对城市人群健康带来重大危害。相关研究已经表明道路交通是城市大气污染尤其细颗粒物(PM_{2.5})的重要来源^[1-2],同时道路交通相关的大气污染已严重影响城市人群健康^[3-4]。如何缓解道路交通相关的大气污染已成为学术界研究的热点^[5]。绿地植物在大部分情况下被认为是能够有效减少来自道路的污染物,Pugh 等表明,即使在街道峡谷中,街道植物也能将 PM₁₀浓度降低 60%;Al-Dabbous 等表明,植物屏障能够减轻约 11%—37%的 PNC 浓度;Chen 等表明,3 种绿化带都能够减轻步道上的 PM₁₀浓度(7%—15%);Abhijith 等表明,在开放空间中,不同的植物群落对不同的污染物(PNC,BC,PM₁₀,PM_{2.5},PM₁)有着不同的消减作用,同时作用受到外界环境如风速、风向等的影响^[6-9]。但在一些特殊条件下会加重污染物的浓度,Tong 等表明,在高速道路周边仅种植树木会导致部分环境的污染物浓度上升;Abhijith 等表明,街道峡谷环境中,较高的植物会导致空气质量恶化,而较低矮的植物会改善空气质量,在开阔的道路条件下,低孔隙度且具有足够的长宽的植物导致可以使污染物浓度降低,而高孔隙度植物可能导致空气质量没有得到改善甚至恶化;Deshmukh 等表明,在顺风环境下高叶面指数且具有一定高度的植物可以将污染物浓度降低 50%,但高孔隙度的植物会使污染物浓度上升^[10-13]。相关学者的研究表明植被对污染物有着一定的影响,这些影响和作用与周边环境 and 植物群落本身存在着一定的关系,如受到绿地宽度、绿地高度、植被孔隙率以及周边环境中的建筑、风等的影响,这些影响有正面的也有负面的影响。如何科学评估城市道路绿地植物降低空气污染物的效果,以及城市道路绿地植物群落组成的差异是如何影响道路周边大气污染物浓度,这些问题需要我们深入研究和探讨。

ENVI-met 是一种用于小尺度和中尺度的城市微气候模拟软件,通过基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和热力学的计算达到模拟城市微气候的效果,相较于其他城市气候模拟软件(如:Phoenicis, CFD, Star-CCM+等),ENVI-met 更加侧重于构筑物表面、植被和大气环境的交互作用上,这在针对植物群落的研究中有着十分重要的意义^[14-15]。该软件已经在城市居住区、街道峡谷空间、校园、道路、公园等领域的应用中得到应用,2018 年软件更新了植物和大气颗粒物模拟插件,但相关应用研究却很少^[16-21]。

因此,综合运用场地观测和 ENVI-met 模拟的方法分析城市道路绿地植物群落对 PM_{2.5}的影响,相关成果可为城市道路绿地设计提供依据,对改善城市大气环境质量具有重大意义。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域及实验点简介

1.1.1 研究区域

合肥位于中国华东地区,长三角西端,江淮之间。合肥是安徽省省会城市,2018 年末常驻总人口 808.7 万人,GDP 达到 7822.9 亿元。研究区域位于合肥南二环道路(图 1),南二环是城市主干道,道路交通量高,道路断面为双向四车道,道路宽度约为 40 m,道路中部有一条宽约 3 m 的绿带,道路东西两向各 15 m 的车道,两侧有 3 m 的人行道。道路周边的植物群落丰富,栽种杨树,红叶石楠,冬青和梧桐。

1.1.2 实验点设计

实验点分布在南二环路和金寨路交叉口到南二环路和宿松路交叉口 1000 m 范围内(图 1)。3 个实验点和一个对照点同处于同一段道路上,周边环境(除植物)较为相似,建筑为中低层建筑,建筑对风的影响较小,属于较为开放的道路环境。其中,一号点周边为二层的商业居住空间,二号点周边为四层的居住空间,三号点

周边为开放空间,四号点周边为二层的商业居住空间,建筑高度较为低矮,同时绿地距离建筑距离较远(30—40 m),对绿地周边环境的影响小。4 个点处于同一段道路,交通流量差异很小,可重点考虑道路植物群落差异对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。实验点植物群落分别为乔木(一号点)、乔木+树篱(二号点)、乔木+树篱+灌木(三号点)和没有植物的对照点(四号点),监测点位置和实验点的道路断面形式见图 2,实验点的植物群落配置见表 1。

1.2 数据收集

监测时间为 2019 年 4 月 12 日—4 月 14 日,天气晴朗。使用 ETEST-100 大气颗粒物检测仪监测 $PM_{2.5}$ 、温度、湿度数据,监测前统一调试仪器,确保记录的数据为同一时间,数据频率为每 5 min 一次。每天具体监测时间是 8:00—18:00,每天收集 9—10 h 的数据,共产生 28 h 的数据。风向,风速数据来自附近的气象站(位于包河区洛岗机场附近)。

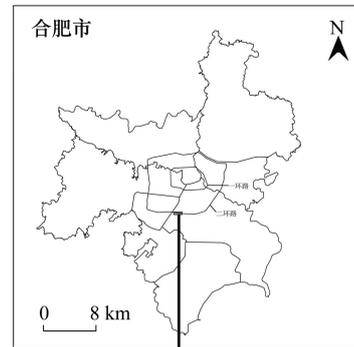


图 1 实验点所处位置

Fig.1 Location and distribution of experimental points

表 1 实验点植物分布

Table 1 Experimental point vegetation distribution

实验点 Experimental point	植物配置 Plant configuration	道路周边绿地植物组成 Composition of greenery around roads	绿地植物尺度 Scale of green space plants X:长度 Length Y:宽度 Width Z:高度 Height
一号实验点 Experimental point one	乔木	梧桐	X:30 m, Y:1 m, Z:6 m
二号实验点 Experimental point Two	乔木+树篱	梧桐, 红叶石楠	树篱: X:70 m, Y:1 m, Z:1.5 m 乔木: X:70 m, Y:1 m, Z:6 m
三号实验点 Experimental point Three	乔木+树篱+灌木	杨树, 红叶石楠, 冬青	X:140 m, Y:3 m, Z:15 m
四号对照点 Control pointt Four	无	无	无

1.3 统计分析方法

使用 SPSS 24 进行数据分析, Origin 2018 绘图。ENVI-met 4.4 进行建模和模拟分析。

根据消解率的公式: $P = (C_s - C_m) / C_s$, P 是消解率, C_s 是对照点的平均浓度, C_m 是实验点的平均浓度, 计算颗粒物的消减率。

将绿地长度、宽度、高度和消减率导入 SPSS 软件进行回归分析, 得出作用方程。

为更加清晰的了解绿地对道路污染物消减的工作机制, 使用 ENVI-met 建立理想模型, 采用控制变量的方法对绿地的各要素进行建模模拟研究。模型的风环境的模拟结果由 ENVI-met 的 Atmosphere 模块中导出。

1.4 ENVI-met 模拟参数

ENVI-met 模型构建的地理坐标、模型、大气环境、污染源的参数如表 2 中所示, 分别建立 5 个模型, 其中 b、c、d、e 4 个模型分别代表着 4 种(绿地的长度、宽度、高度、LAI)不同的要素, 以及 a 模型作为对照用的常量(表 3), 对模拟的结果进行对比研究。模拟计算时间为 10 h。其中污染物的放置, 由于道路较宽(40 m)且为双向四车道, 将污染源分别在两个车道上放置。

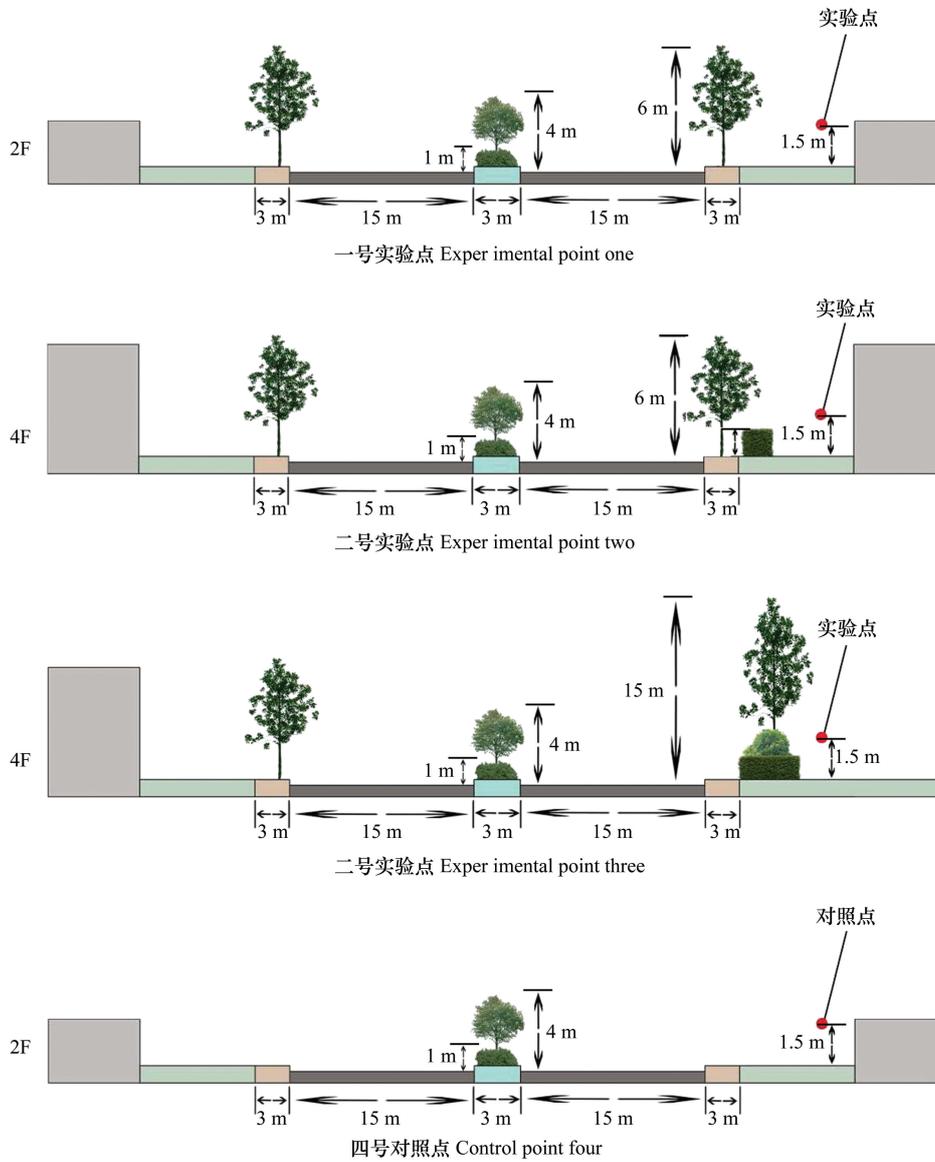


图 2 实验点道路断面

Fig.2 Experimental point road section

表 2 ENVI-met 模拟参数

Table 2 ENVI-met simulation parameters

类型 Types	项目 Project	参数 Parameter	类型 Types	项目 Project	参数 Parameter
模型 Model	网格数	60×80×30	污染源 Pollution source	最低点	35% (14:00)
	网格精度	1 m×1 m×2 m		风速	2.5 m/s
	网格土壤定义	默认值		风向	30
	地理坐标	N:31.86° E:117.28°		粗糙度参数	0.01
大气环境 Atmospheric environment	模拟时间	4月12日 8:00—18:00	颗粒物直径	2.5 μm	
	温度	最高点为 30℃ (14:00) 最低点为 14℃ (8:00)	污染物类型	线性	
	相对湿度	最高点 70% (8:00)	污染物高度	0.3 m	
			污染物释放速率	8.5 μg s ⁻¹ m ⁻¹	

表 3 植物模型参数

Table 3 Plant model parameters

模型 Model	长度 Length/m	宽度 Width/m	高度 Height/m	叶面积指数 Leaf area index (LAI)
模型 a Model a	80	1	2	2.5
模型 b Model b	30	1	2	2.5
模型 c Model c	80	3	2	2.5
模型 d Model d	80	1	4	2.5
模型 e Model e	80	1	2	1

2 结果与分析

2.1 监测点风环境

实验点的风向以北风和东北风为主,4月12日和13日风速较弱以0—4 m/s为主,14日风速较强可达8 m/s,三天的风向基本以垂直和倾斜于道路为主,三日的风环境中12日主风向为倾斜于道路,各监测点之间有一定的上下风关系,但12日处于微风环境(0—4 m/s)上下风向对颗粒物的影响较低,13、14日主风向为垂直于道路,各监测点之间无明显的上下风关系,图3了风速和风向的日变化。

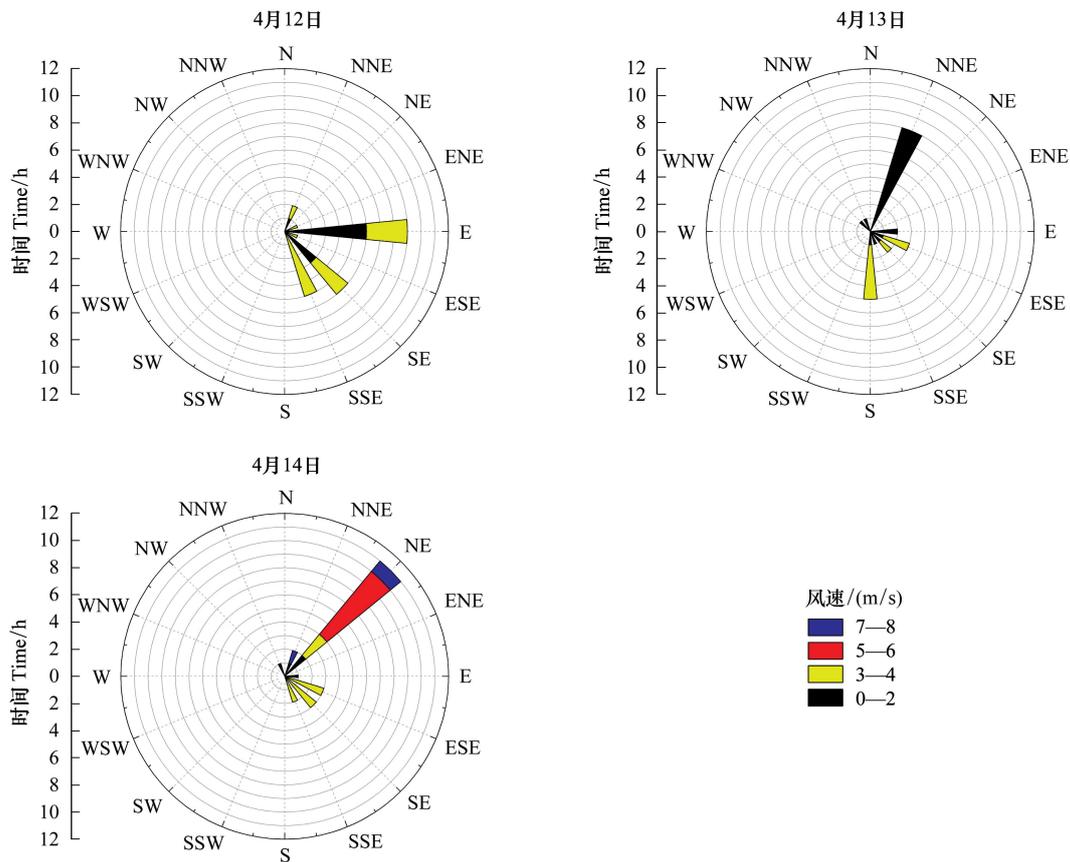


图 3 风玫瑰图

Fig.3 Wind rose

2.2 不同道路监测点 PM_{2.5}浓度分布特征

如图 4 所示,实验点三日的 PM_{2.5}浓度基本随时间的推移呈现下凹式分布,最高值出现在早晨,最低值出

现在中午及下午。其中:4月12日最高值出现在8:00的四号点(141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),最低值出现在12:17的一号点(61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),相差131%;4月13日最高值出现在8:40的四号点(228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),最低值出现在16:40的三号点(29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),相差686%;4月14日最高值出现在8:35的三号点(117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),最低值出现在14:10的二号点(33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),相差254%。

如图5所示,4月12日和4月13日四号点的PM_{2.5}浓度总体高于其他3个实验点,三号点的PM_{2.5}浓度最低。4月14日4个实验点PM_{2.5}浓度差异性较低,三号点浓度高于其他点。

根据消解率的公式,计算得出总体消解率三号点>二号点>一号点(14.2%>12.9%>9.2%)。

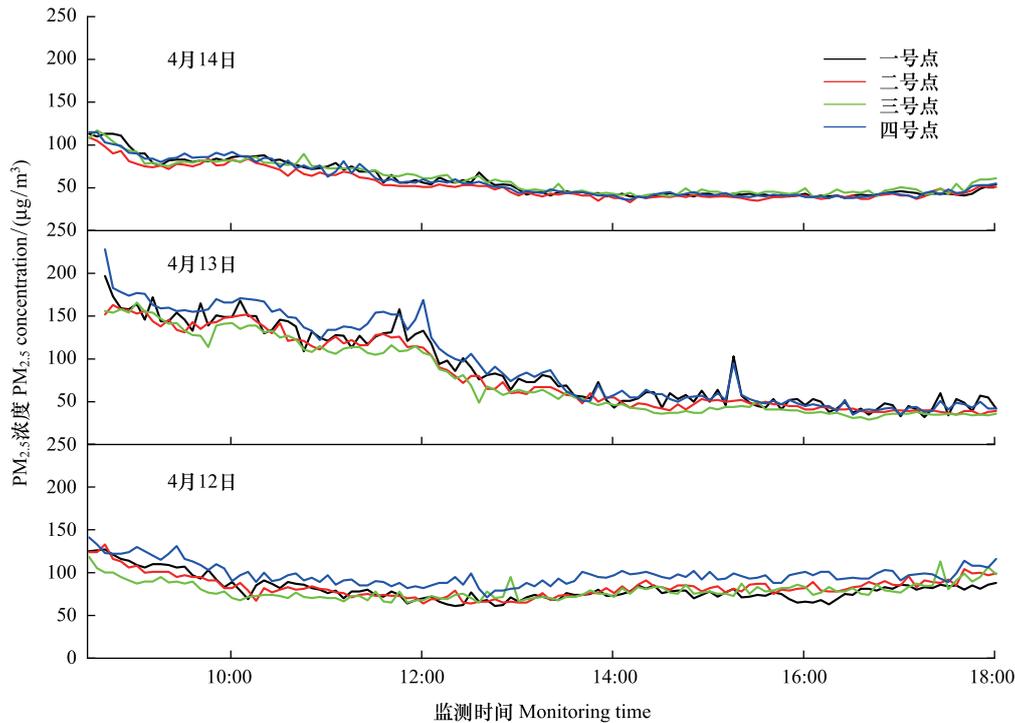


图4 实验点PM_{2.5}浓度日变化图

Fig.4 Experimental point PM_{2.5} concentration change chart

2.3 不同道路绿地植物群落对PM_{2.5}浓度的影响

回归分析得出绿地长度,宽度,高度和消减作用有着相关性,得出函数 $p = -0.237x + 13.167y + 0.522z$, x 是绿地长度, y 是绿地宽度, z 是绿地高度, p 是消解率。

2.3.1 绿地植物种类的影响

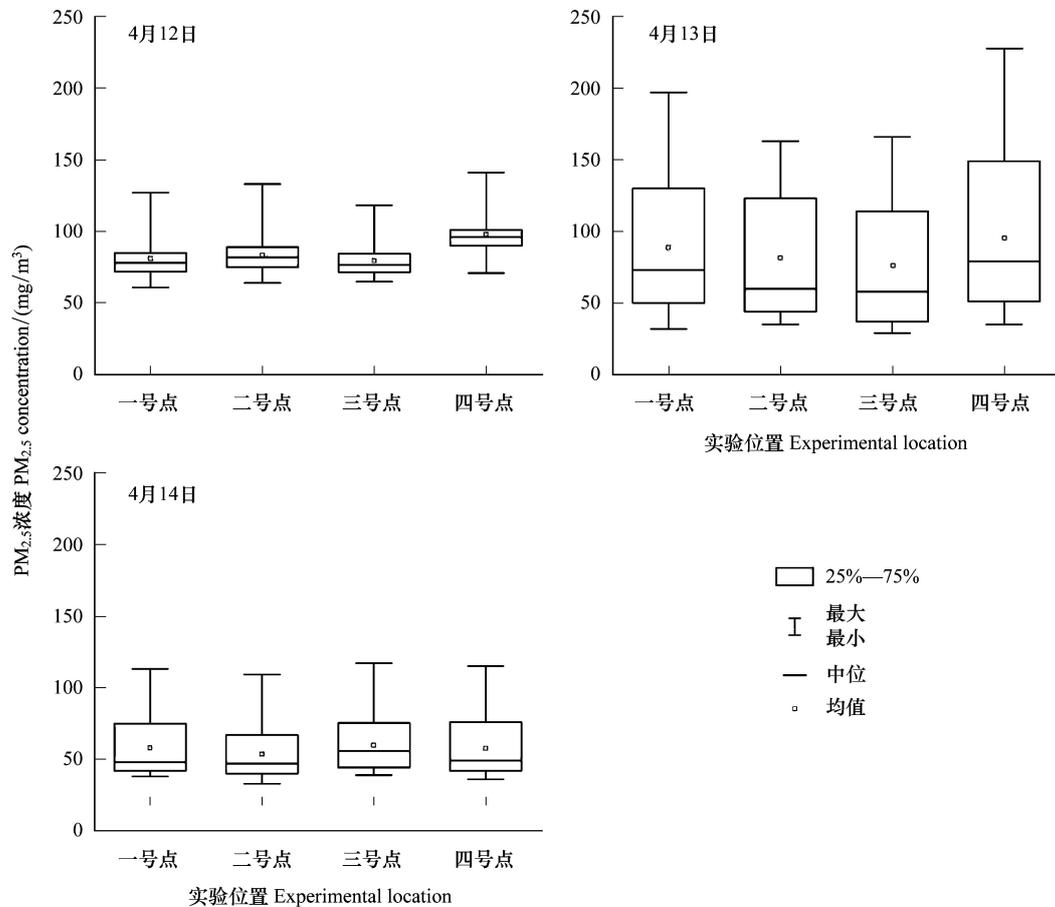
实验结果表明,随着绿地植物物种丰富度的增加而消解率逐步加强,相较于从无到有植物而增加的9.2%的消减作用而言,进一步增加树篱和灌木带来的消减作用逐步减弱(分别增加了3.7%和1.3%)。随着植物种类的增加,各种影响因素之间共同作用,加强了对PM_{2.5}的消减作用。

2.3.2 绿地长度的影响

回归分析表明,绿地长度的增加会导致消解率的降低。绿地长度的增加会导致受到绿地影响的PM_{2.5}的总量的增加,同时也使得PM_{2.5}浓度的稳定和均质化,导致PM_{2.5}向绿地两侧扩散的量与总量相比减少。

2.3.3 绿地宽度的影响

实验结果表明,绿地宽度的增加将加强消解率。绿地宽度的增加将增加颗粒物在绿地的通过时间,加强绿地中的植物叶面对颗粒物的吸收和迟滞作用的时间和距离,加强了绿地对PM_{2.5}的消减作用。同时绿地宽度的影响也受到植物的植物叶面指数的影响。

图5 实验点 PM_{2.5} 浓度时空特征Fig.5 Experimental point PM_{2.5} concentration spatiotemporal characteristics

2.3.4 绿地高度的影响

实验的结果表明随着植物高度的增加,消减作用有加强的趋势。有关研究表明高度达到4—5m或更高的树木可以起到对颗粒物的消减的目的,实验验证该结论的同时也表明树木的度的增加可能会加强消减作用。

2.3.5 植物叶面积指数(LAI)的影响

实验点的 LAI 呈现从一号点到三号点递增的趋势。组成绿地的植物的叶面积密度决定了颗粒物通过绿地的运动,实验表明,绿地的消减作用与叶面指数呈正比,较高的叶面指数增加了颗粒物在绿地内部运动的阻力,同时也降低了风速,使得颗粒物得以沉降。

2.4 ENVI-met 模拟结果

选取模型坐标为(X:5 m, Y:30 m, Z:1.4 m)的点作为观测点,利用12:00的监测数据进行可视化分析,分别生成 PM_{2.5} 浓度剖面(图6)和平面(图7)分布图。图6表明,绿地长度和叶面积指数的减少在近地空间的表现出对 PM_{2.5} 浓度较强的影响,绿地高度的增加会促使 PM_{2.5} 在通过绿地时向更高的空中运动。

如图7的 PM_{2.5} 浓度平面图所示,模型b、c、d、e的 PM_{2.5} 浓度与模型a的 PM_{2.5} 浓度相比增加了分别减少了2.89%、0.55%、-2.85%、-3.14%。表明绿地长度和高度的增加对 PM_{2.5} 消减作用起负面作用,绿地宽度和叶面积指数的增加对 PM_{2.5} 起消减作用起正面作用。与实验结果不同的是绿地高度在模拟分析中表现出了负面的作用。

虽然绿地后面的 PM_{2.5} 浓度降低,但在没有绿地直接暴露在道路环境中的空间的浓度较其他空间快速上

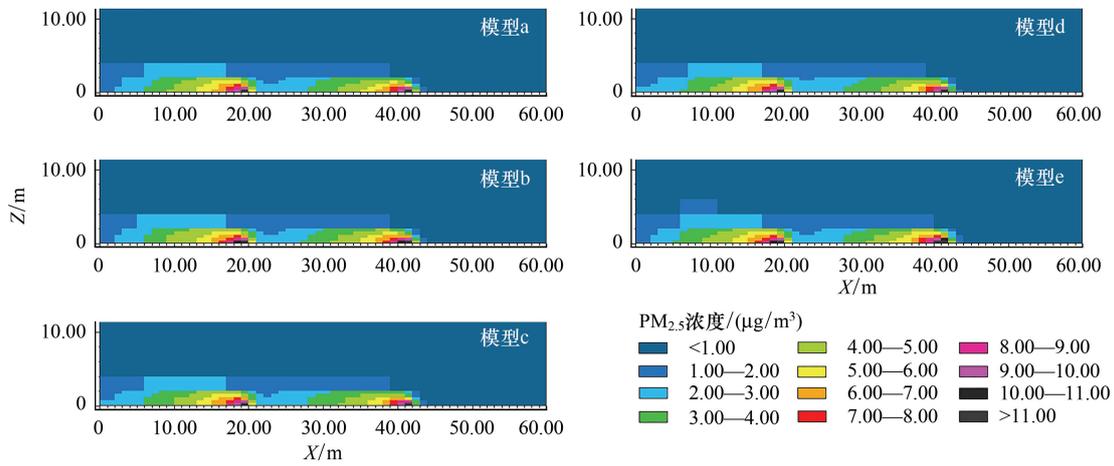


图 6 PM_{2.5}剖面分布图

Fig.6 PM_{2.5} profile map

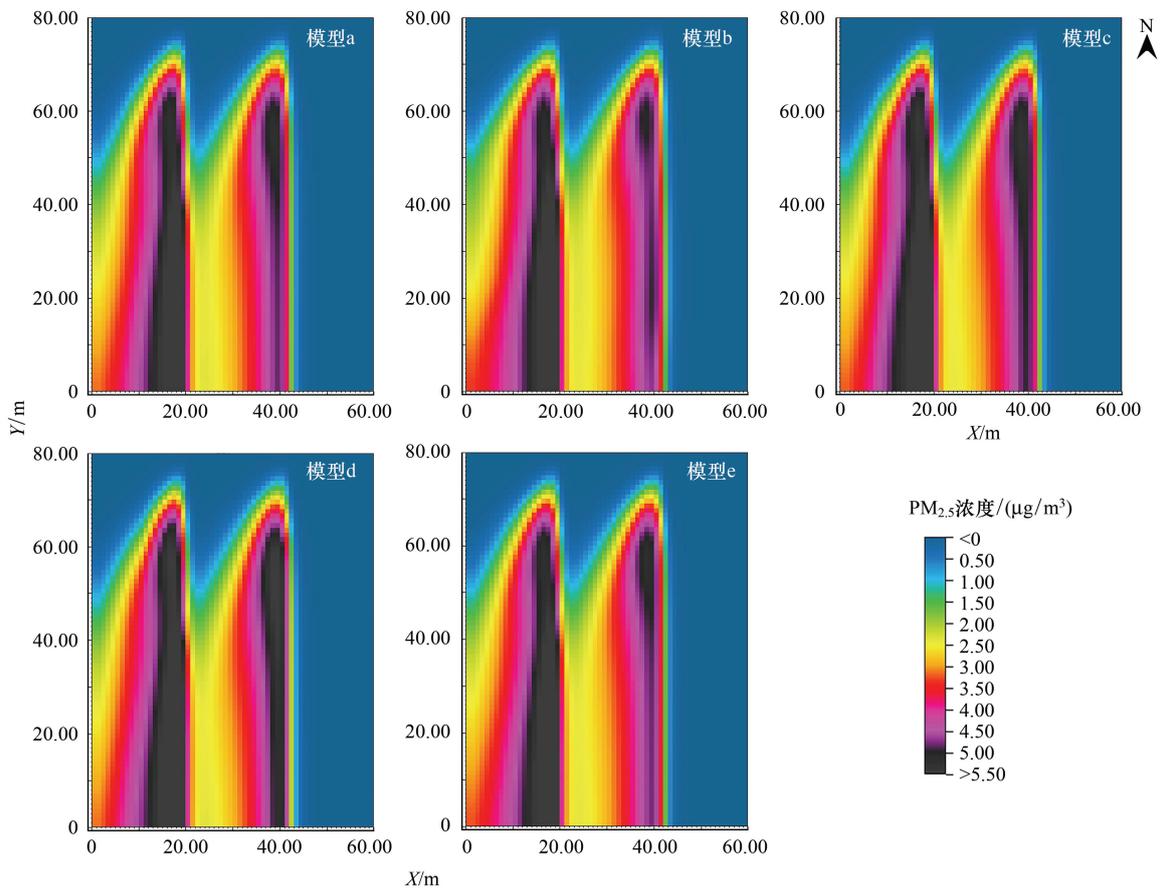


图 7 PM_{2.5}平面分布图

Fig.7 PM_{2.5} plane distribution map

升。提取 a,b 两个模型绿地后方的 PM_{2.5}浓度数据,PM_{2.5}浓度降低的空间是绿地后方宽度约为绿地长度 80% 的空间,同时 PM_{2.5}浓度降低空间的宽度随着与绿地的距离的增加而递减,这个空间的跨度在至距离绿地 10m 处衰减为约为绿地长度的 50%。结果表明,绿地的长度的一定量的减少可以在绿地后方形形成一个宽度约为

绿地长度 80%的、随着与绿地的距离的增加而宽度递减的较绿地长度更长的 $PM_{2.5}$ 浓度低谷区。图 8 显示了模型 a、b 的风环境模拟结果,绿地长度的降低带来绿地周边的风环境的改变,使得绿地周边的风速增加,导致颗粒物向没有阻碍且风速较高的空间运动。

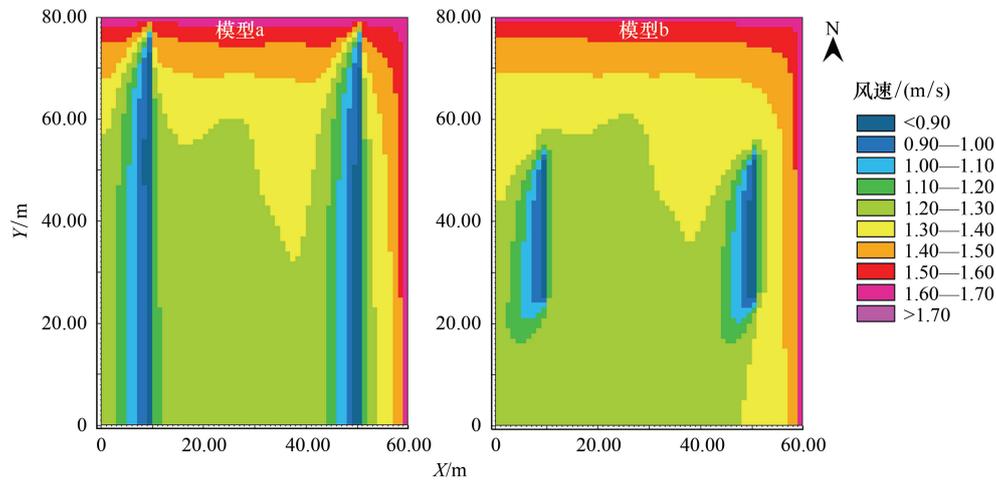


图 8 模型 a、b 风环境

Fig.8 Model a b wind environment

3 讨论

3.1 不同绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 消减作用的影响

无论是监测结果还是 ENVI-met 模拟都表明绿地对 $PM_{2.5}$ 有着一定的消减作用,而绿地对 $PM_{2.5}$ 的消减作用强弱与绿地中植物的配置丰富度有关,这与孙晓丹等的研究相一致^[22],植被丰富度的增加和物种的改变导致多种因素的改变,如植物的郁闭度、疏透度以及植物微结构等。前人的研究已经表明绿地对大气颗粒物的消减作用同植物群落的郁闭度成正相关,同疏透度成负相关关系^[23-24],同时也受到植物叶面微结构的影响^[25],这些因素综合导致对 $PM_{2.5}$ 的消减作用强弱的改变。

3.2 绿地形态对 $PM_{2.5}$ 的消减作用的影响

模拟实验表明绿地的长度的一定量的减少可以在绿地后方形成一个宽度约为绿地长度 80%的、随着与绿地的距离的增加而宽度递减的较绿地长度更长环境 $PM_{2.5}$ 浓度更低的低谷区,但其他没有绿地的空间的 $PM_{2.5}$ 浓度会加重。究其原因,较短的绿地影响道路的风环境,使没有绿地的空间风速增加,导致 $PM_{2.5}$ 向没有阻碍且风速较高的空间运动。前人的研究更多的着重于绿地长度达到一定的规模后可以有效的消减大气颗粒物^[23,26],而对于长度的变化对大气颗粒物的分布等的影响的研究较少。

绿地宽度的增加将加强绿地对 $PM_{2.5}$ 的消减作用,绿地宽度的增加了颗粒物在绿地的通过时间,加强绿地中的植物叶面对颗粒物的吸收和迟滞作用的时间和距离,这与王国玉、蔺银鼎等的研究相一致^[26-27],这也证明了绿地宽度的增加能够有效的加强对大气颗粒物消减作用。

绿地高度的变化的影响在场地观测和模拟实验中产生了矛盾。模拟实验中,绿地高度的增加,会迫使一部分颗粒物向更高的空间运动,在通过绿地之后由于动能的消耗而沉积,导致消减作用的减少。但蔺银鼎等在通过增减遮阳网的方式得出高度的增加能够加强对颗粒物的消减作用^[27],这与场地观测的结果相一致,说明在实际条件下绿地高度的增加能够加强对颗粒物的消减作用。

3.3 绿地对 $PM_{2.5}$ 的消减作用的不确定性

实验过程中绿地对 $PM_{2.5}$ 的消减作用表现出了强烈的不确定性,三日中各实验点的消解率的大小表现出

了剧烈的波动。这表明绿地植物对 PM_{2.5}的消减作用不仅仅受到植物群落的因素影响,同时也受到其他方面因素的影响,杨貌等、Abhijith 等的研究都已经表明绿地植物对 PM_{2.5}的消减作用受到风速、风向的影响^[11,24],说明了绿地对 PM_{2.5}的影响不是单一的不变的简单过程,而是多方面共同作用的复杂过程。

4 结论与建议

本次实验测量并比较了在同一条道路上拥有不同的植物群落的绿地后方的 PM_{2.5}浓度,同时也利用 ENVI-met 软件进行建模和模拟分析,评估了不同的植物群落中的植物的种类、绿地宽度、绿地长度、绿地高度、绿地植物的叶面指数等要素对 PM_{2.5}浓度的影响。

4.1 主要结论

- (1) 绿地对 PM_{2.5}有着一定的消减作用。
- (2) 绿地对 PM_{2.5}的消减作用与绿地中植物的种类、绿地宽度、绿地植物的叶面指数等要素呈正相关。
- (3) 绿地长度一定量的减少虽然会降低绿地后方的 PM_{2.5}浓度,但会加重其他没有绿地的空间的浓度。
- (4) 绿地高度的增加会迫使 PM_{2.5}在经过绿地时向更高的空中运动。
- (5) 实验和模拟结果表现出的不确定性也表明影响作用与周边的气候环境有着相关性。

4.2 建议

- (1) 道路绿地能够有效的减少周边环境的 PM_{2.5}浓度,道路建设时应建设相应的绿地。
- (2) 绿地宽度的增加可以加强对 PM_{2.5}消解率,道路绿地的建设应在条件允许的情况下宽度达 3m 或更宽。
- (3) 在靠近居民区的情况下可以考虑建设绿地长度达到居民区长度一倍左右的绿地,在居民区范围内形成污染物的低谷区,可以适当减少无人区的绿地。
- (4) 绿地高度的增加会导致 PM_{2.5}向更高的空间运动,应避免在靠近多层建筑的空间建设较高的植物。
- (5) 道路绿地应有较高的植物丰富度,乔木+灌木+树篱的组合较适宜。

参考文献 (References):

- [1] Xu X M, Zhang H F, Chen J M, Li Q, Wang X F, Wang W X, Zhang Q Z, Xue L K, Ding A J, Mellouki A. Six sources mainly contributing to the haze episodes and health risk assessment of PM_{2.5} at Beijing suburb in winter 2016. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166: 146-156.
- [2] Wang Y N, Jia C H, Tao J, Zhang L M, Liang X X, Ma J M, Gao H, Huang T, Zhang K. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1031-1040.
- [3] Yao L, Zhan B X, Xian A Y, Sun W W, Li Q, Chen J M. Contribution of transregional transport to particle pollution and health effects in Shanghai during 2013-2017. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 564-570.
- [4] Evans K A, Halterman J S, Hopke P K, Fagnano M, Rich D Q. Increased ultrafine particles and carbon monoxide concentrations are associated with asthma exacerbation among urban children. *Environmental Research*, 2014, 129: 11-19.
- [5] Pasquier A, André M. Considering criteria related to spatial variabilities for the assessment of air pollution from traffic. *Transportation Research Procedia*, 2017, 25: 3354-3369.
- [6] Pugh T A M, MacKenzie A R, Whyatt J D, Hewitt C N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(14): 7692-7699.
- [7] Al-Dabbous A N, Kumar P. The influence of roadside vegetation barriers on airborne nanoparticles and pedestrians exposure under varying wind conditions. *Atmospheric Environment*, 2014, 90: 113-124.
- [8] Chen X P, Pei T T, Zhou Z X, Teng M J, He L, Luo M, Liu X X. Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM₁₀): a street scale investigation in Wuhan, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 354-360.
- [9] Abhijith K V, Kumar P. Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions. *Atmospheric Environment*, 2019, 201: 132-147.
- [10] Tong Z M, Whitlow T H, MacRae P F, Landers A J, Harada Y. Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns.

- Environmental Pollution, 2015, 201: 141-149.
- [11] 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.
- [12] Deshmukh P, Isakov V, Venkatram A, Yang B, Zhang K M, Logan R, Baldauf R. The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, 12(3): 259-270.
- [13] Morakinyo T E, Lam Y F, Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: modelling and measurement. *Journal of Environmental Management*, 2016, 182: 595-605.
- [14] Roth M, Lim V H. Evaluation of canopy-layer air and mean radiant temperature simulations by a microclimate model over a tropical residential neighbourhood. *Building and Environment*, 2017, 112: 177-189.
- [15] Liu Z X, Zheng S L, Zhao L H. Evaluation of the ENVI-Met vegetation model of four common tree species in a subtropical Hot-Humid Area. *Atmosphere*, 2018, 9(5): 198-198.
- [16] Hertel D, Schlink U. Decomposition of urban temperatures for targeted climate change adaptation. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 113: 20-28.
- [17] Xu X Y, Liu S M, Sun S B, Zhang W W, Liu Y, Lao Z M, Guo G C, Smith K, Cui Y, Liu W, García E H, Zhu J N. Evaluation of energy saving potential of an urban green space and its water bodies. *Energy and Buildings*, 2019, 188-189: 58-70.
- [18] 郑子豪, 陈颖彪, 千庆兰, 李勇, 谢锦鹏. 基于三维模型的城市局地微气候模拟. *地球信息科学学报*, 2016, 18(9): 1199-1216.
- [19] Farhadi H, Faizi M, Sanaieian H. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101448.
- [20] Xing Y, Brimblecombe P. Role of vegetation in deposition and dispersion of air pollution in urban parks. *Atmospheric Environment*, 2019, 201: 73-83.
- [21] 郭晓华, 戴菲, 殷利华. 基于 ENVI-met 的道路绿带规划设计对 PM_{2.5} 消减作用的模拟研究. *风景园林*, 2018, (12): 75-80.
- [22] 孙晓丹, 李海梅, 刘霞, 徐萌. 不同绿地结构消减大气颗粒物的能力. *环境化学*, 2017, 36(2): 289-295.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征. *生态学报*, 2020, 40(1): 213-222.
- [26] 王国玉, 白伟岚, 李新宇, 赵松婷. 北京地区消减 PM_{2.5} 等颗粒物污染的绿地设计技术探析. *中国园林*, 2014, (7): 70-76.
- [27] 蔺银鼎, 武小刚, 郝兴宇, 韩翀. 城市机动车道颗粒污染物扩散对绿化隔离带空间结构的响应. *生态学报*, 2011, 31(21): 6561-6567.