

DOI: 10.5846/stxb202108112211

符冰芬, 吴海堂, 赵立华. 基于城市微气候模拟软件的城市道路绿化带对 PM_{2.5} 消减作用的研究. 生态学报, 2023, 43(15): 6293-6306.

Fu B F, Wu H T, Zhao L H. Effect of urban road green belts on PM_{2.5} reduction based on ENVI-met. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6293-6306.

基于城市微气候模拟软件的城市道路绿化带对 PM_{2.5} 消减作用的研究

符冰芬^{1,2}, 吴海堂¹, 赵立华^{1,*}

1 华南理工大学建筑学院, 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640

2 广州市城市规划设计有限公司, 广州 510030

摘要: 随着经济的快速发展及机动车保有量的持续增长, 车辆造成的道路污染问题日益严重。广州作为中国重要的经济发展城市, 交通源排放问题高度集中, 机动车排放是城市 PM_{2.5} 的主要来源之一, 开展减缓城市道路污染危害的研究具有重要意义。本研究为调查绿化带对广州城市道路 PM_{2.5} 的影响, 运用实测与城市微气候模拟软件(ENVI-met)模拟结合的研究方法, 实测并分析城市道路空间 PM_{2.5} 的浓度分布及其影响因素, 使用实测数据对模拟软件进行验证分析, 模拟研究理想道路模型下不同高宽比、风向等因素及绿化带植配类型对 PM_{2.5} 的消减作用。研究表明: (1) 城市道路空间 PM_{2.5} 浓度分布受污染源、街道高宽比、风速风向、绿化带等综合影响, 自然消减情况下, 其主要受风速风向和高宽比双因素影响; (2) 通常街道高宽比越大, 越有利于道路空间 PM_{2.5} 的扩散; (3) 城市道路空间 PM_{2.5} 自然沉降最小距离为 12 m, 0—12 m 范围内应保持无障碍物的开敞环境, PM_{2.5} 消减的关键范围是 12—24 m, 此范围内可以利用生态手段沉降颗粒物; (4) PM_{2.5} 消减率受绿化带和风向的双控制, 应根据主导风向选择绿化带植配方式。在主导风平行面和垂直迎风面绿化带对 PM_{2.5} 有正消减效应, 建议植配类型为“乔-乔+灌+草”; 在主导风垂直背风面绿化带对 PM_{2.5} 呈负消减效应, 植配类型为“乔-灌”绿化带消减率接近于自然消减率, 而植配类型为“乔-灌+草”和“乔-乔+灌+草”的绿化带加重了颗粒物在该区域的积聚。

关键词: 城市道路; 城市微气候模拟软件(ENVI-met); 街道高宽比; 风速风向; 植配类型

Effect of urban road green belts on PM_{2.5} reduction based on ENVI-met

FU Bingfen^{1,2}, WU Haitang¹, ZHAO Lihua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Subtropical Building Science, School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2 Guangzhou Urban Planning and Design Company Limited, Guangzhou 510030, China

Abstract: With the rapid development of the economy and the continued growth of vehicle ownership, the road pollution problem caused by vehicles is becoming increasingly serious, however, vehicle pollution is one of the main sources of PM_{2.5} in cities. Guangzhou, as an important economic development city in China, with a high concentration of pollution problems caused by emissions from traffic sources. Study on mitigating the hazards of urban road pollution is of great significance. The objective of this study is to investigate the contribution of green belts to the reduction of road PM_{2.5} in Guangzhou, which varies according to the intensity of motor vehicle emissions, road orientation, street aspect ratio and green belt planting type. Based on the research object of Guangzhou city roads, using the method of measurement and ENVI-met simulation. Firstly, the PM_{2.5} concentration distribution in urban road space and its influencing factors are measured and analyzed, secondly, validated the simulation software using measured data, finally simulated the PM_{2.5} reduction effect of different factors under the ideal road model, as well as simulated the PM_{2.5} reduction effect of different planting types of

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878288, 51978276)

收稿日期: 2021-08-11; 采用日期: 2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzhao@scut.edu.cn

green belts. Results showed that: 1) the distribution of PM_{2.5} concentration in urban road space was influenced by pollution sources, street aspect ratio, wind speed and wind direction, and green belt etc. Under natural abatement, it is mainly influenced by the double factors of wind speed and wind direction and height and aspect ratio. 2) Generally, it benefits for spread of PM_{2.5} in the road space with gradually increasing the street aspect ratio, as the rate of PM_{2.5} dispersion is increased. 3) The minimum distance of PM_{2.5} natural settlement in the space of main urban roads in Guangzhou was 12 m, an open and ventilated environment should be maintained within 0—12 m, with few ground obstacles. The key range of PM_{2.5} reduction was 12—24 m; within which ecological methods can be better used to settle particulate matter. 4) The reduction rate of PM_{2.5} was controlled by the green belt and the wind direction. Different green belt planting methods should be selected according to the dominant wind direction. The green belt on the parallel side and vertical windward side had positive PM_{2.5} effect, the recommended planting type was tree+tree irrigation grass, while on the vertical leeward side the green belt had negative effect, and the richer the planting type is, the more serious the PM_{2.5} gathering phenomenon becomes, the recommended planting type was tree+irrigation.

Key Words: urban roads; ENVI-met; canyon aspect ratio; wind speed and direction; plant configuration type

随着我国城市化进程不断加速,人们对机动车需求的攀升使得城市机动车保有量快速增长,从而实现经济快速发展,然而由机动车所引起的道路污染问题日益严峻。机动车排放物被公认为是道路污染主要来源,而PM_{2.5}是汽车排放的主要污染物之一^[1],亟需解决由其所带来的道路机动车污染问题^[2]。广州作为贯彻落实粤港澳大湾区建设国家战略的重要城市,其人口密度、机动车保有量居全国前列,因而高度集中了由交通源排放所形成的污染问题。研究表明,机动车高污染区域集中在高速、快速路以及主干道周边^[3]。由于其近地排放,加上道路两侧建筑物遮挡使得污染物不易扩散而聚集于两侧人行道中,易对行人造成不良影响,其危害集中表现在呼吸道方面疾病,甚至有致癌风险^[4]。为此,如何有效地缓解城市主干道机动车排放物对行人的危害,已成为构建生态文明社会的重要问题。国内外学者对缓解城市道路污染问题进行了大量研究,有学者认为,城市道路中绿化带对颗粒物向人行道的传输具有明显的阻碍作用^[5-6],提高绿化覆盖率是降低道路污染程度的有效方式^[7-9]。

道路旁绿化带植物配置差异对城市街道峡谷污染状况造成影响。我国地域辽阔,当下研究主要集中在中华华北地区,初步得出了一些规律,孙晓丹等^[10]、田志会等^[11]对青岛、北京等当地植物配置的实测研究发现,街区植物种类越丰富,其消减大气颗粒物的能力越强。陈小平等在武汉市道路绿带进行实测发现主干道绿带的最优结构是“乔+灌”、次干道最优结构是“乔+灌+草”^[12]。以上科学规律在华南地区是否具有待探究,以广州为例,前人进行了植物配置滞尘效益的研究^[13-14],但针对当地常见城市道路绿带植物配置未进行统计及实测研究,探究缓解道路污染的最佳配置尤为重要。

道路污染物的分布不仅受到植物配置影响,还受到其他因素如路面屏障、街道高宽比、气象等因素影响^[15-17]。目前多为单因素研究,有学者针对单一植配类型进行研究^[18-20],还需进一步考虑多种植配类型的综合影响。也有学者探究高宽比较小的浅街谷发现主干道上绿化对人行道存在负面影响^[21],此外还综合比较不同高宽比的街谷类型对污染物分布影响。探究多因素综合影响采用实测与数值模拟的方法^[18,21-23],而在模拟研究往往缺乏对模拟软件的充分验证。本文将对模拟软件是否适用于广州道路污染方面的研究进行系统验证;并探究多因素对于植物配置缓解道路污染所产生的影响。

本研究实地调研了解广州市典型道路绿带配置情况,实测并分析城市道路空间PM_{2.5}的分布规律,采用实测数据对模拟软件进行验证,模拟研究在理想道路模型下不同因素对PM_{2.5}的消减作用,探索街道两侧绿带植物配置的优化方案,为城市道路绿化带配置类型提供科学建议。

1 研究区域

广州市地处中国南部,植被属南亚热带季风常绿阔叶林。调研广州市四个中心城区(越秀区、天河区、荔

湾区、海珠区)十二条主干道,道路选线涵盖了东西和南北走向,如图 1 所示。调研道路的宽度、绿化带断面形式(绿带宽度、植配类型、植物种类、植物高度等)、街道高宽比等数据。街道高宽比是指建筑高度(Hb)与街道宽度(Ws)比值(以下简称高宽比 Hb/Ws),绿化带包括行道树绿带、路侧绿带、分车绿带 3 种形式。



图 1 研究区位

Fig.1 Research area

广州市十二条主干道的调研结果如表 1 所示,主干道均为对称道路,高宽比分别为 0.2、0.6、1.0、1.4、1.7;道路断面形式主要是两板三带式,道路路幅宽 45—55 m,双向 3—5 车道;同时对绿化带植配类型以及行道树植物的种类、规格、占比进行了细致的调研^[24]。绿化带植配类型主要为“乔”、“乔+灌”、“乔+灌+草”;植物选择上,乔木主要有榕树(桑科,榕属, *Ficus microcarpa* Linn. f.)、非洲楝(楝科,非洲楝属, *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.)、樟树(樟科,樟属, *Cinnamomum camphora* (L.) Presl);灌木主要有鹅掌柴(五加科,鹅掌柴属, *Schefflera heptaphylla* (Linnaeus) Frodin)、海桐(海桐花科,海桐花属, *Pittosporum tobira*)、黄杨(黄杨科,黄杨属, (*Buxus sinica* (Rehder & E. H. Wilson) M. Cheng)、灰莉(马钱科,灰莉属, *Fagraea ceilanica* Thunb.)等;草主要是沿阶草(百合科,沿阶草属, *Ophiopogon bodinieri* Levl.)、兰花草(爵床科,单药花属, *Ruellia brittoniana* Leonard)等。

2 研究方法

本研究的目的主要是探究绿化带对道路 PM_{2.5} 的消减作用。PM_{2.5} 的消减因机动车排放强度、道路朝向、道路高宽比、绿化带植配类型等不同存在差异,不同道路 PM_{2.5} 的分布和浓度差异较大,然而若测试所有的工况需要耗费大量人力、物力,采用数值模拟计算可提升工作效率,数值模拟是研究城市热环境及污染物浓度的重要方法,Michael Bruse 等^[25] 1998 年开发的 ENVI-met 软件是城市热环境领域应用最广泛的软件之一,可用于绿化带对城市道路污染物的相关研究^[22—23],本文选用 ENVI-met 软件进行模拟。

首先确定研究对象,根据对广州城市中心区的主干道的调研结果,综合选择广州大道和中山二路作为研究对象进行实测。然后根据实测所得的道路参数、微气候参数、车流量数据借助于 ENVI-met 进行模拟分析,得到在相同参数条件下的 PM_{2.5} 的模拟结果,对实测结果与模拟结果进行均方根误差分析和一致性指数分析,验证模拟软件 ENVI-met 的可信性。最后参考 Wania 等^[26] 的颗粒物模拟案例,建立十字交叉型道路结构的城市道路理想模型^[26—27],模拟研究不同风向、街道高宽比、植物配置类型情况下绿化带对 PM_{2.5} 的消减规律。

表 1 主干道调研信息汇总
Table 1 Summary of road informations

道路序号 No.	高宽比 Aspect ratio	车道 Lanes	横断面形式 Cross-sectional format	行道树绿带 Street tree green belts			路侧绿带 Roadside green belts			分车绿带 Divided green belts		
				植被类型 Planting type	植物 Species	植物 Species	植被类型 Planting type	植物 Species	植物 Species	植被类型 Planting type	植物 Species	
1	1.4	4	两板三带	乔+灌	非洲楝+灰莉	灰莉	灌	灰莉	灌+草	灰莉+兰花草		
2	1.7	3	一板两带	乔+灌	榕树、樟树+灰莉、红背桂	榕树、樟树+灰莉	乔+灌	榕树、樟树+灰莉	-	-		
3	1.0	4	两板三带	乔	榕树	榕树	乔+灌	榕树+鹅掌柴	乔+灌	小叶榄仁+鹅掌柴		
4	1.0	3	三板四带	乔	榕树	羊蹄甲+使君子	乔+灌	羊蹄甲+使君子	乔+灌	羊蹄甲+使君子		
5	0.6	4	两板三带	乔+灌+草	芒果、榕树+红背桂+沿阶草	香樟+红背桂+沿阶草	乔+灌+草	香樟+红背桂+沿阶草	乔+草	美丽异木棉、榆树+吊兰		
6	0.6	5	一板两带	乔+灌	榕树+海桐	榕树	乔	榕树	-	-		
7	1.0	3	两板三带	乔+灌+草	小叶榄仁+海桐、黄杨+沿阶草	小叶榄仁+海桐、黄杨+沿阶草	乔+灌+草	小叶榄仁+海桐、黄杨+沿阶草	乔+灌+草	黄葛+鹅掌柴+兰花草		
8	0.2	4	两板三带	乔	榕树	榕树	乔	榕树	灌	石楠、朱蕉、灰莉		
9	0.2	4	两板三带	乔+灌	非洲楝+海桐、鹅掌柴	非洲楝+海桐、鹅掌柴	乔+灌	非洲楝+海桐、鹅掌柴	乔+灌+草	非洲楝+紫薇+兰花草		
10	0.6	4	两板三带	乔	榕树	榕树	乔	榕树	乔+灌	石楠+黄杨、海桐		
11	0.6	4	两板三带	乔	榕树	榕树	乔	榕树	灌	鹅掌柴、灰莉		
12	0.2	4	两板三带	乔+灌+草	榕、黄葛+黄杨+沿阶草	榕、黄葛+黄杨+沿阶草	乔+灌+草	榕、黄葛+黄杨+沿阶草	乔+灌	黄葛树+黄杨、灰莉		

2.1 实地测试

广州冬季相比于其他季节气候干燥,风速小气压相对稳定,污染物难以扩散,秋冬季节广州PM_{2.5}浓度较高^[28]。因此选择晴朗、微风的冬天,分别测试典型道路空间的PM_{2.5}浓度、温湿度、风速和风向、车流量等数据,测试时间为2020年12月22日、24日、25日、29日,均为工作日,从8:00—20:00连续采样12小时,采样间隔为1 min。测点布置见图2,分别位于路边(测点1)、行道树后(测点2)、路侧绿带后(测点3)距地1.5 m处。测试时利用三脚架将测试空气温度、相对湿度、风速、PM_{2.5}浓度的仪器固定于测点上方,同时在空旷地布置监测风向的仪器,测试仪器性能见表2,全天车流量通过间隔两小时的记录数据估算,每隔两小时拍照连续记录10 min通过的车辆类型及数量。

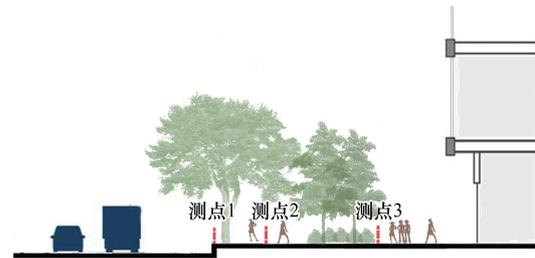


图2 测点布置

Fig.2 Location of measurement points

表2 测试仪器基本信息

Table 2 Basic information about the instruments

测试内容 Test content	仪器名称 Instruments	仪器量程 Range	仪器精度 Accuracy	分辨率 Resolution
空气温度 Temperature ambient	HOBO 温湿度记录仪	-40—70℃	±0.2℃	0.02℃
相对湿度 Relative humidity	HOBO 温湿度记录仪	0—100%	±2.5%	0.03%
风速 Wind speed	HD32.2 热指数仪	0—5 m/s	±0.05 (0—1 m/s) ±0.15 (1—5 m/s)	0.01 m/s
PM _{2.5} 浓度 PM _{2.5} concentration	便携式多功能颗粒物检测仪 JK60-FC	0—99999 μg/m ³	±0.1 μg/m ³	0.1 μg/m ³
风向 Wind direction	KestrelNK4500	0—360°	±3%	1%

2.2 模拟软件验证方法

为了确保 ENVI-met 模拟软件的可信性,分别对广州大道和中山二路进行模拟验证,两条道路模拟值与实测数据均在误差范围内,本文以中山二路的模拟验证为例进行具体阐述。中山二路断面形式为两板三带式,双向八车道,场地最高建筑的高度为81 m,几何模型的尺寸为220 m×130 m×162 m,网格数为110×65×81,分辨率为2 m×2 m×2 m,其中近地处网格被分为五个子单元,以细化研究人行高度情况,嵌套网格数为5。初始条件与边界条件主要包括气象参数、道路、污染源及植被参数,参数设置见表3。气象参数选取实测日(2020年12月22日)的天气参数,初始风速根据实测风速计算得到,为东北风1.71 m/s,近地面粗糙度按城市地区的一般情况取值0.1,其余输入参数(如土壤温湿度、2500 m含湿量、建筑属性等)采用系统默认值。结合调研结果确定植物模型,灌木高度为1 m,乔木高度为20 m。根据车流量统计结果,PM_{2.5}总排放速率25.10 μg s⁻¹ m⁻¹,考虑到道路为双向八车道,按八条线源设置污染物参数,每条线源PM_{2.5}排放速率设置为3.14 μg s⁻¹ m⁻¹,排放高度为0.15 m。

表3 ENVI-met 中模拟的参数设置

Table 3 Specific input values for ENVI-met

类别 Category	参数 Parameters	参数值 Parameter values	类别 Category	参数 Parameters	参数值 Parameter values
气象条件 Meteorological conditions	模拟时间	2020-12-22 8:00—20:00	污染物 Pollutants	颗粒物直径	2.5 μm
	初始温度	14℃		类型	线性,0.15 m高
	初始相对湿度	55%		释放速率	3.14 μg s ⁻¹ m ⁻¹
	风速(10 m高度)	1.70 m/s	植物 Plants	3D plant	20 m高
	风向(10 m高度)	45°		Simple plant	1 m高
	粗糙度参数	0.10			

采用均方根误差 (RMSE) 和一致性指数 (d) 两个指标用来评价模拟精度, 其中 RMSE 是验证模拟精度的强指标, 按式 (1) 计算, 是衡量模拟误差的统计量, RMSE 值越低表明模拟结果越可靠, 当 RMSE 不大于 25% 时, 模拟结果视为有效^[29]。 d 值按式 (2) 计算, 表示相对误差的大小, 越接近 1 说明模拟值与实测值越接近, 模型预测效果越好。

$$\text{RMSE}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{ip} - t_{im})^2}{n-1}} \times \frac{1}{\bar{t}_m} \times 100 \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_{ip} - t_{im})^2}{\sum_{i=1}^n (|t_{ip}| + |t_{im}|)^2} \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (2)$$

式中, t_{ip} 是第 i 个模拟值, t_{im} 是第 i 个实测值, \bar{t}_m 是实测值的平均值。

2.3 主干道理想模型构建

主干道理想模型如图 3 所示。采用十字交叉型道路结构建立城市道路理想模型, 该结构能一定程度上减少建模工作量, 同时能在同一来风风向下观察到两种不同风向结果^[26], 十字交叉型道路结构是目前大部分城市道路结构。主干道建模参数基于对广州城市干道的大量调研数据而来, 综合确定了模型道路路幅为 55 m, 结合调研数据和街道峡谷分类方法^[30], 选取三种典型街道高宽比 0.6、1、1.7; 其中断面 A—A 的道路走向与主导风向平行, 此断面定义为主导风平行面 (简称平行面), 断面 B—C 的道路走向与主导风向垂直, B—O 断面为垂直主导风的迎风面 (简称迎风面), O—C 断面为垂直主导风的背风面 (简称背风面); 依据调研结果, 模型中行道树绿带和路侧绿带植配类型设置根据占比分别是“乔—灌”(I 类)、“乔—乔+灌+草”(II 类)、“乔—乔+灌”(III 类), 其中同一绿化带内植物配置表达为“A+B”, 不同绿化带间植物搭配表达为“A-B”, A、B 分别为植物类型; 并设置无绿化工况作为对照组, 共四种绿化带植配类型。为了精确模拟行道树绿带和路侧绿带植配类型对 PM_{2.5} 的消减规律, 控制变量, 为此未将中央分车绿带纳入模型中。基于各高宽比和绿化带植配类型一共需模拟 24 个工况。

3 结果与分析

3.1 广州城市主干道 PM_{2.5} 浓度实测分析

广州大道和中山二路 PM_{2.5} 浓度日变化规律见图 4。总体上广州城市道路空间中 PM_{2.5} 浓度较低, 基本符合国家空气质量二级 (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 标准, 不过与空气质量准则要求 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 还有较大差异。图中城市道路一侧 PM_{2.5} 浓度均高于绿化带一侧, 至路侧绿带后 PM_{2.5} 平均浓度降低了 1/3, 表明绿化带能一定程度上有效阻滞颗粒物传播, 对保护行人健康有积极作用; 广州大道中和中山二路路侧绿化带对 PM_{2.5} 的消减率分别为 34% 和 37%, 两条道路路侧绿化带植配类型有显著差异, 表明不同植配类型对 PM_{2.5} 消减能力存在一定差异。

3.2 模拟软件验证结论

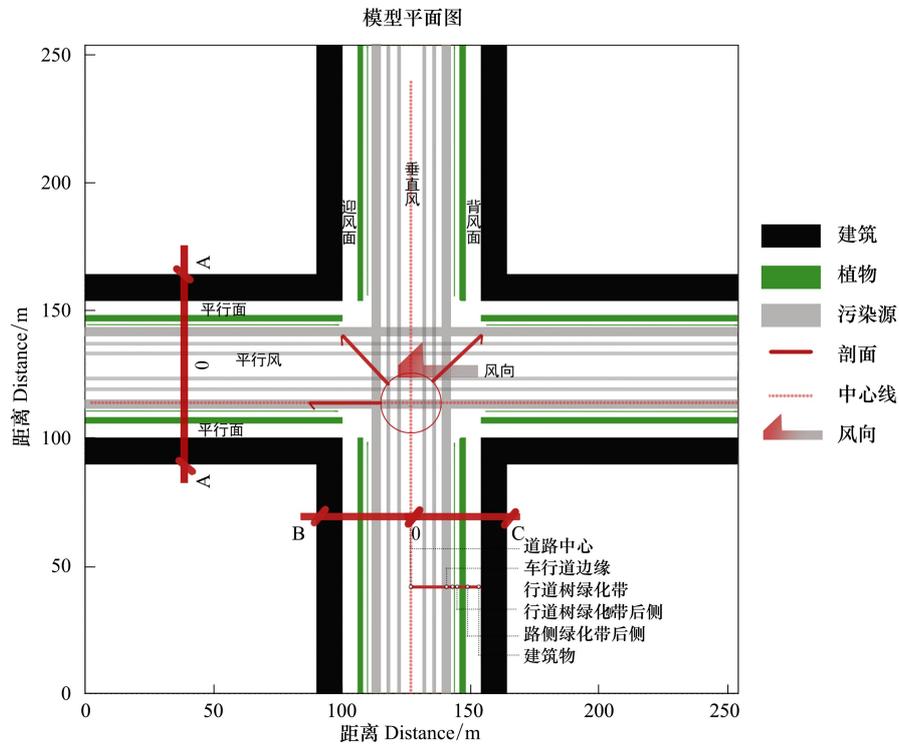
中山二路 PM_{2.5} 浓度实测值与模拟值对比结果如图 5 所示, ENVI-met 模拟值与实测结果相近、变化趋势一致; 模拟值与实测数据误差在 50% 范围内, 其中测点 1 (路旁) 实测值略小于模拟值, 而测点 2 (行道树后)、测点 3 (路侧绿带后) 实测值略大于模拟值。原因在于模拟过程中没有考虑车辆湍流影响, 使得测点 1 模拟值略偏高, 这一特征在交通车流量大的道路上尤为显著^[31]。

各测点的验证评价指标见表 4, 各点均方根误差 (RMSE) 最大值为 18%, 皆不大于 25%, 一致性指数 (d) 为 99%, 接近于 1, 均方根差与一致性指数均符合精度标准, 依据 Eniolu 等^[15] 研究成果认为该软件符合精度

表 4 验证评价指标

Table 4 Verification evaluation index			
	测点 1 point1	测点 2 point2	测点 3 point3
均方根差 (RMSE)	0.17	0.17	0.18
一致性指数 (d)	0.99	0.99	0.99

RMSE: 均方根差 Root mean square error; d : 一致性指数 Index of agreement



街道高宽比模型

绿化带植配模型

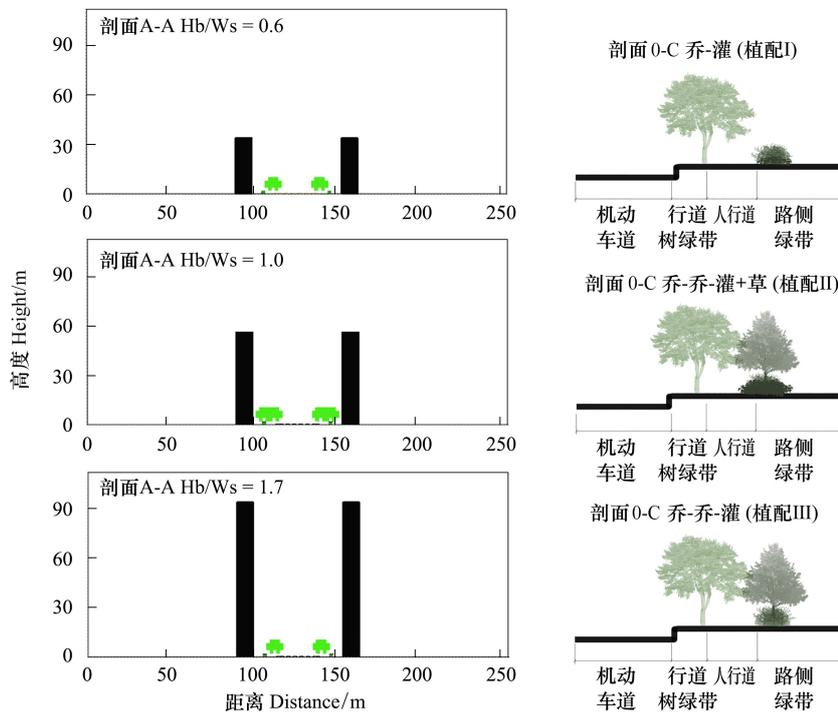


图3 道路理想模型

Fig.3 Ideal geometrical model of road

标准。因此 ENVI-met 模拟软件及依据实测设置的相关参数适用于广州城市道路PM2.5分布的模拟研究。

3.3 城市道路空间PM2.5影响因素模拟分析

主干道理想模型无绿化带工况下PM2.5分布特征的模拟结果见图6,PM2.5浓度分布受污染源排放及扩散

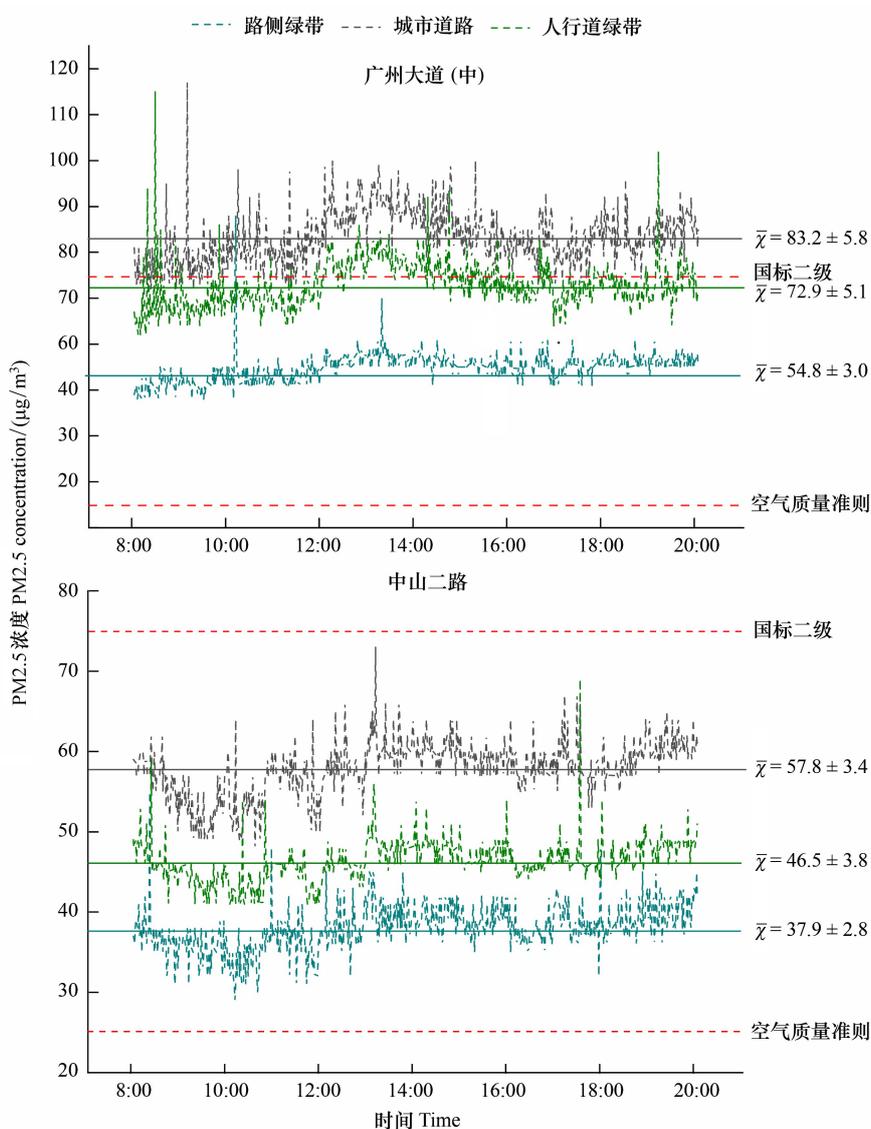


图4 PM2.5浓度日变化规律

Fig.4 Diurnal variation of PM2.5 concentration

能力两方面影响,风对降低PM2.5浓度有积极影响^[32]。对走向与主导风平行的道路,“街道峡谷”对风有引导作用形成对流风,下风向PM2.5浓度高于上风向;对走向与主导风垂直的一侧道路,固体屏障物对风有阻挡作用形成涡流,如PM2.5垂直流态示意图所示,该旋涡主导了整个峡谷内的气流运动,沿旋涡方向传输,在背风面建筑物底部堆积,徐伟嘉等^[33]的研究结论与本研究观点一致。因此,图6中背风面距交叉路口中心,50—80 m处为PM2.5高集聚区域。交叉路口机动车汇集污染排放量大,是PM2.5浓度最高的区域。

3.3.1 不同高宽比下绿化带对PM2.5浓度空间分布的影响

无绿化对照组的PM2.5浓度分布剖面如图7所示。其中剖面A—A在平行风向下,剖面B—C在垂直风向下,总体上随着高宽比的增加,PM2.5扩散范围有所收缩。Angeliki Chatzidimitrio等^[34]、李萍等^[35]研究发现街道高宽比增大能增加街道谷内风速,产生“微峡谷效应”,有利于污染物快速扩散,与本研究结论相似。然而在同一风向下,不同高宽比导致PM2.5扩散范围收敛变化的幅度差别较大,如平行风向下,PM2.5在高宽比为0.6、1.0、1.7的峡谷中所对应的竖向扩散范围分别为0—10 m、0—7 m、0—5 m,水平扩散范围分别为30—40 m、30—40 m、20—30 m;垂直风向下,PM2.5向一侧发生集聚,随着高宽比的增加,PM2.5的扩散区域先扩大

后收缩,高宽比为 1.0 时竖向和水平扩散范围均最大。因此当街道高宽比小于 1 时,高宽比越大越不利于背风面PM2.5扩散;而当街道高宽比大于 1 时,高宽比越大,越有利于PM2.5扩散。

18 个不同高宽比有绿化的工况下绿化带对PM2.5分布的影响汇总见表 5,对比无绿化对照组PM2.5在竖向和水平扩散区域,其中“++”表示竖向和水平扩散范围均收缩,“- -”表示竖向和水平扩散范围均扩大,“+-”表示向单侧收敛或扩大,“0”表示与对照组间差距小。总体上,绿化带在一定程度上抑制了PM2.5的扩散和继续传播。随着高宽比的增加,未出现如对照组中在竖向和水平扩散范围逐步收敛或扩大的规律,也未出现随着绿化带中植物配置层次的增加,道路空间中PM2.5分布呈规律性扩散或收敛,表明绿化带对PM2.5的消减作用受多因素共同影响,下文将分别讨论不同因素对PM2.5的消减力。

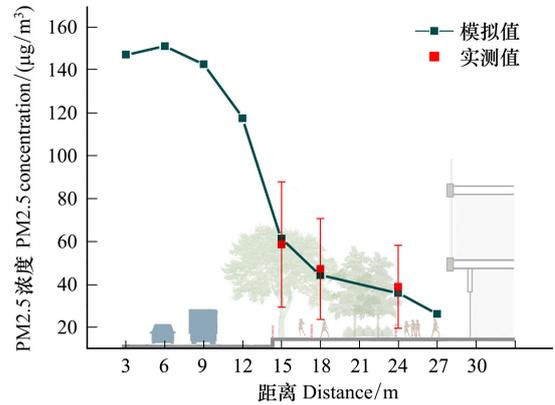


图 5 中山二路PM2.5浓度的模拟值与实测值对比
Fig.5 Comparison of simulated and measured PM2.5 concentrations on Zhongshan 2nd road

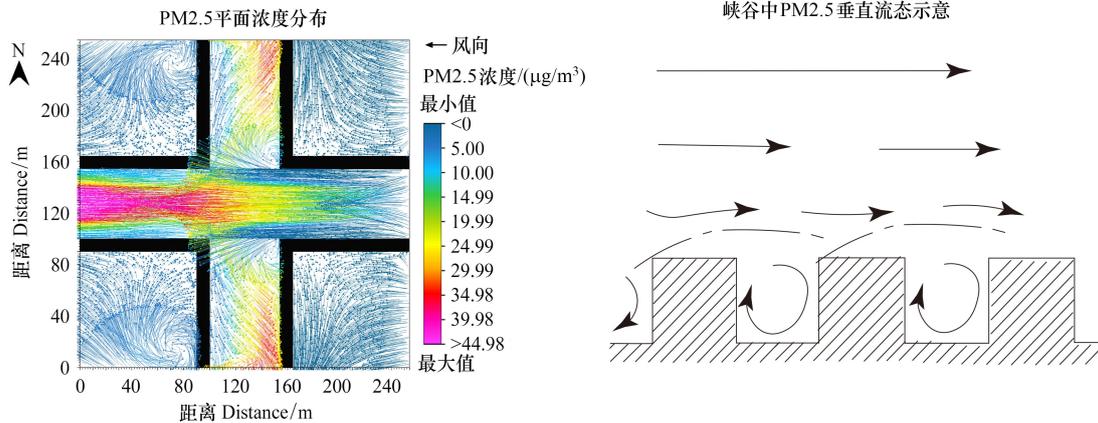


图 6 PM2.5平面浓度分布及垂直流态示意图

Fig.6 PM2.5 concentration distribution and vertical flow pattern

表 5 绿化带影响PM2.5浓度分布的评价

Table 5 Evaluation of Green Belt Affecting PM2.5 Concentration Distribution

街道高宽比 Street aspect ratio	位置 Site	植配类型 Planting type		
		乔-灌 (I) Arbors-shrubs (I)	乔-乔+灌+草 (II) Arbors-Arbors+shrubs+grasses (II)	乔-乔+灌 (III) Arbors-arbors+shrubs (III)
0.6	A—A	++	0	0
	B—C	--	0	0
1.0	A—A	++	0	0
	B—C	+-	+-	+-
1.7	A—A	++	0	0
	B—C	+-	+-	+-

A—A:与主导风走向平行的道路断面;B—C:与主导风走向垂直的道路断面; ++:表示PM2.5浓度竖向和水平扩散范围均收缩; --:表示竖向和水平扩散范围均扩大; +-:表示向单侧收敛或扩大; 0:表示与对照组间差距小

3.3.2 不同风向下绿化带对PM2.5空间分布的影响

分析平行面、迎风面、背风面三个截面PM2.5浓度变化揭示了风向对PM2.5空间分布的影响。从机动车车

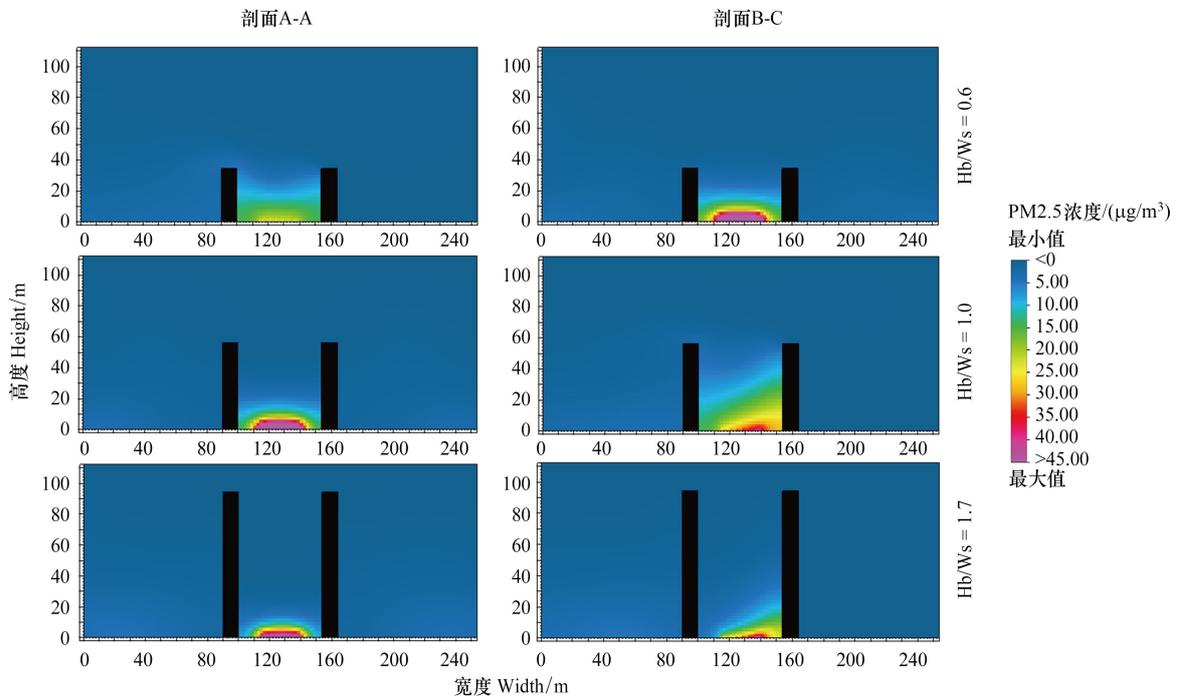


图7 PM2.5浓度分布剖面图

Fig.7 PM2.5 concentration distribution profile

行道中心到建筑物前PM2.5浓度变化反映了PM2.5从“源”到“留”的释放—沉降过程,截面上典型位置见图3,图8展示了主干道理想模型中各工况不同截面典型点PM2.5浓度。

对走向与主导风平行的道路,PM2.5平均浓度从机动车车行道中心到建筑物前降低了3/4。距道路中心12 m处即行道树绿带后,PM2.5浓度呈指数下降,距道路中心24 m即路侧绿带后PM2.5浓度下降趋势开始缓和。绿化带植物配置类型也会影响PM2.5的浓度分布,如高宽比0.6时,“乔-灌”植配类型有利于PM2.5的沉降,有学者认为这种乔灌混交的种植搭配方式,能发挥乔灌木各自的净化优势从而达到更优的净化效果^[36]。

对走向与主导风垂直的道路,迎风面在0—12 m范围内PM2.5下降速率高于平行面和背风面。在12—20 m区域PM2.5浓度亦呈指数下降,20 m后下降趋势缓和;背风面PM2.5有波峰现象,距道路中心约8—12 m处达到积聚高峰,12 m后PM2.5浓度开始下降,无绿化对照组PM2.5平均浓度低于有绿化带工况,随着植物配置层次的增加,PM2.5积聚效果越显著,表明背风面绿化带不利于颗粒物的自然扩散。

3.3.3 绿化带植物配置类型对PM2.5浓度消减作用

为了进一步量化植物配置类型对颗粒物的消减效果,根据消减率的计算公式^[36]为:

$$P = (C_s - C_m) / C_s \quad (3)$$

式中, C_s 是机动车道路侧PM2.5浓度值, C_m 是路侧绿带外侧PM2.5浓度值。

根据模拟结果分析了PM2.5自然消减以及绿化带对PM2.5消减作用,其结果如表6所示。对照工况中PM2.5消减率为自然消减率。随着高宽比的增大,消减率也随之增大,与前面结论一致;高宽比一致时,平行面PM2.5自然消减率远高于迎风面和背风面。表明在自然消减情况下,受风向和街道高宽比双因子影响,而风对PM2.5消减效果更好。

绿化带对PM2.5消减作用因风向不同而差异较大。平行风向时,自然消减率与绿化带消减率差距在10%以内,随着高宽比的增大,自然消减率略有上升,然而自然消减率与植物消减率间差异较小。因此,在平行风下,PM2.5主要受风向影响,绿化带对PM2.5的消减能力较小。

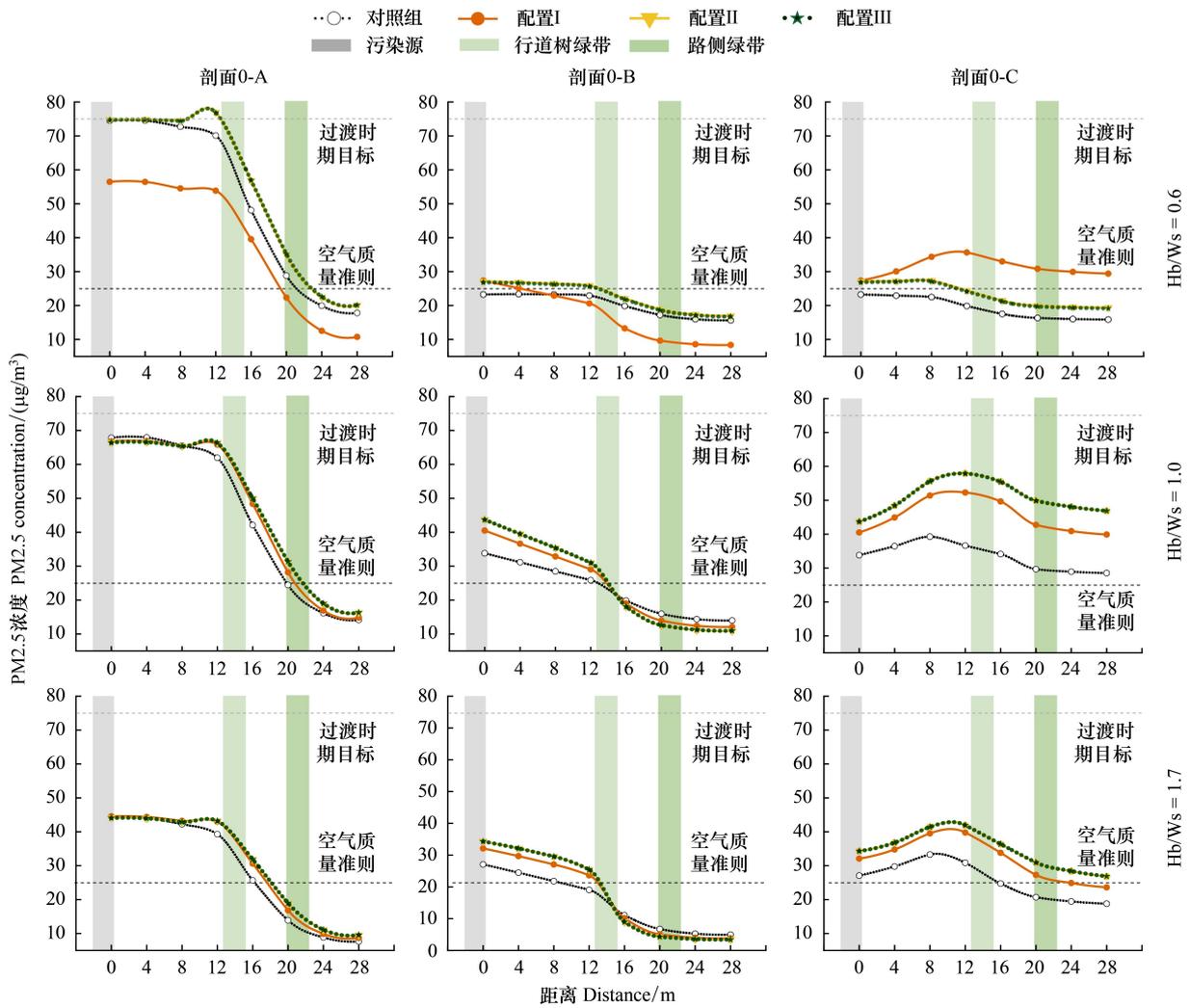


图 8 1.5m 高PM2.5浓度变化

Fig.8 PM2.5 concentration curve at 1.5m high

表 6 绿化带不同植配类型对PM2.5的消减率/%

Table 6 Reduction rate of PM2.5 by different planting types in the green belt

高宽比 Aspect ratio	A—A 平行面 A—A Parallel sides				B—0 迎风面 B—0 Windward sides				0—C 背风面 0—C leeward sides			
	对照 Base case	I类 Category I	II类 Category II	III类 Category III	对照 Base case	I类 Category I	II类 Category II	III类 Category III	对照 Base case	I类 Category I	II类 Category II	III类 Category III
0.6	72	77	71	71	30	58	33	33	19	16	20	20
1.0	74	74	71	71	45	57	64	65	21	22	17	17
1.7	78	77	74	74	72	83	86	87	37	37	32	32

垂直风向时,B—0 迎风面一侧绿化带对PM2.5呈正消减作用,对降低道路PM2.5浓度有积极意义。当高宽比为 0.6 时,自然消减率为 30%,其中 I 类植配模式消减率为 58%,约为自然消减率 2 倍,表明在该条件下“乔-灌”配置类型消减效果最优。当街道高宽比为 1.0、1.7 时,绿化带消减率均高于自然消减率并随着植物配置层次的丰富,消减效果越突出。背风面绿化带对PM2.5消减效果不理想, I 类植配模式中消减率与对照组中自然消减率相当,而 II 类、III 类消减率要远低于自然消减率,即“乔-灌+草”和“乔-乔+灌+草”的植配类型加重了颗粒物在该区域的积聚。

4 讨论

4.1 广州城市道路PM_{2.5}来源

根据图4广州大道和中山二路PM_{2.5}浓度变化趋势可知,曲线整体波动较小,没有明显的波峰波谷现象,平均浓度方差波动幅度分别为 $\pm 5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $\pm 3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。然而对上海^[37]、天津^[38]城市道路中PM_{2.5}浓度变化研究表明有明显的“早高峰”、“晚高峰”现象。该现象在广州不显著。结合当日车流量数据,在10:00—11:00和14:00—16:00以及18:00—19:00三个时间段分别有明显交通高峰但PM_{2.5}并未有大幅度升高的现象,推测机动车在PM_{2.5}的排放强度上已得到一定控制,研究发现兰州济南等地新能源汽车使用对降低PM_{2.5}浓度有积极作用^[39-40],广州地区已探究新能源汽车对CO₂、THC等有明显的减排效果,而对PM_{2.5}的减排能力还需进一步探索^[41]。当前,ENVI-met模拟软件中污染源均考虑燃油车排放速率,这也可能是导致模拟与实测之间差异较大的原因。因此,广州城市道路中“早高峰、晚高峰”不显著的原因可能是随着新能源汽车比例的升高减少了PM_{2.5}排放,即使是污染较重的冬季,广州市PM_{2.5}浓度基本能达到国标要求,因此未来可重点关注新能源汽车对广州市城市道路PM_{2.5}的影响机制。

4.2 提高数值模拟精度

ENVI-met数值模拟不但能降低实地测试带来的人力和物力成本,同时能根据需要预测模型用于指导实践以及目标优化。测点1、测点2、测点3的PM_{2.5}模拟和实测的均方根误差(RMSE)分别为17%、17%、18%,尽管在25%可接受范围内,模拟结果可信,但与热环境模块相比误差偏大^[42];刘之欣^[43]从机理层面展开了亚热带湿热环境植物模块验证工作,并对植物模块的参数做了地域优化以及搭建植物数据库,由此极大地提高了热环境模拟结果精度。本研究验证了污染物实测与模拟的可信性,但未从机理层面探究影响误差的因素,若要进一步提高污染物模拟精度,后续研究需要从机理入手对污染物模块进行验证。

4.3 植物降低城市道路中PM_{2.5}浓度策略

城市道路中PM_{2.5}浓度受城市街道形态、机动车污染排放强度、气象因素、绿化等综合影响。根据模拟结果,无绿化的城市道路,街道高宽比越大越有利于PM_{2.5}扩散,尤其是街道形态与风向平行的街道中,Lígia Parreira Muniz-Gaal等^[30]与本研究有相同的结论。街道形态与风形成一定夹角时,位于背风面一侧不利于颗粒物的自然扩散,由于建筑物阻挡了相对独立的气流,使得街道内的空气被驱动流动,形成稳定的涡旋,颗粒物在建筑背风面处向上攀升或堆积,形成高浓度区域,造成背风面浓度高于迎风面现象^[44]。

顾康康等^[45]用ENVI-met模拟了安徽省城市道路绿化带不同植配类型对PM_{2.5}的消减效果,乔木、乔木+树篱、乔木+树篱+灌木3种配置模式对PM_{2.5}的消减率分别是9.2%、12.9%、14.2%,表明植物群落结构越丰富越有利于颗粒物的消减。张灵芝等^[46]实测道路绿化带中PM_{2.5}不同结构植物群落对PM_{2.5}滞尘效应的强弱顺序为:乔草型>乔木型>草坪型>乔灌型>乔灌草型>灌草型,具有乔木、草本植物或灌木球零散布局的植物群落配置模式对PM_{2.5}的滞尘效应较强,两人的结论有些出入。本研究的结论是道路行道树植配类型的选择应该结合主导风向考虑,如在平行风向和垂直迎风面一侧可以考虑“乔+灌+草”的群落结构形式,冠层内的颗粒物不易发生集聚,植物对颗粒物有较好的消减作用,若位于背风面一侧,如图9中O—C背风面一侧所示,植配类型越丰富有可能导致PM_{2.5}的积聚,选择“乔+草”和“乔+灌”类型更有利于颗粒物的消减,表明植物对PM_{2.5}消减效果的不确定性,在探寻如何降低城市道路颗粒物浓度时,需要分类综合考虑城市主导风向,城市形态、城市道路街宽比以及植配类型。

5 结论

通过实测和模拟分析发现,广州城市道路空间PM_{2.5}除了受机动车排放的污染影响较高外,还受风向和街道高宽比控制,绿化带在不同风向和高宽比下对PM_{2.5}消减作用差距较大。本研究主要从降低城市道路污染物角度分析植配类型选择。

(1)整体上,随着高宽比的增大,颗粒物的扩散速率加快。当高宽比为 0.6 时,平行风向下道路绿化带植配类型适宜选用“乔-灌”;垂直风向下适宜选用“乔-乔+灌+草”和“乔-乔+灌”。当高宽比为 1.0、1.7 时,垂直风向下 PM_{2.5} 在道路迎风面一侧显著下降,背风面一侧树冠下积聚效应显著,说明植物对 PM_{2.5} 有负消减效应。

(2)总体上,PM_{2.5} 平均浓度在迎风面要低于平行面和背风面。平行面时,距道路中心约 12 m,PM_{2.5} 浓度呈指数下降,于 24 m 处下降趋势趋于缓和。迎风面 PM_{2.5} 在 0—12 m 扩散快速,当 12 m 后呈指数型下降趋势,在 20 m 处趋于缓和;背风面有波峰现象,波峰出现在距道路中心 8—12 m 处,于 16 m 后开始自然降低。城市道路中 PM_{2.5} 自然沉降距离最小为 12 m,0—12 m 保持开敞的通风环境,少布设地面屏障物,12—24 m 可以更好利用生态手段使颗粒物沉降。

(3)自然消减情况下,PM_{2.5} 主要受风向和高宽比双因素影响,其中风向对 PM_{2.5} 影响更高。平行风下,植配类型对 PM_{2.5} 的消减能力不突出;垂直风下,随着植配类型越丰富消减效果越显著;建议在迎风面植物配置上可选“乔-乔+灌+草”,背风面植配类型以“乔-灌”的形式。

(4)植物种类选择上,由于广州冬季风速小气压相对稳定,污染物较难扩散,可以考虑选择落叶植物,促进空气流动减少污染物积聚现象。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部.中国移动源环境管理年报(2021)[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202109/t20210910_920605.shtml.
- [2] 中华人民共和国生态环境部.2021 中国生态环境状况公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/28/content_5692799.htm.
- [3] 张亮.广州市道路交通污染物的空间特征分析[D].广州:华南师范大学,2013.
- [4] Wang X H, Wang B Z. Research on prediction of environmental aerosol and PM_{2.5} based on artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(12): 8217-8227.
- [5] 蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,韩翀.城市机动车道颗粒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.
- [6] Ghasemian M, Amini S, Princevac M. The influence of roadside solid and vegetation barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 108-117.
- [7] 戴菲,陈明,王敏,朱晟伟,傅凡.城市街区形态对 PM₁₀、PM_{2.5} 的影响研究——以武汉为例. *中国园林*, 2020, 36(3): 109-114.
- [8] 陈明,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 年论文集*. 贵阳, 2018: 340-345.
- [9] 戴菲,陈明,朱晟伟,陈宏,傅凡.街区尺度不同绿化覆盖率对 PM₁₀、PM_{2.5} 的消减研究——以武汉主城区为例. *中国园林*, 2018, 34(3): 105-110.
- [10] 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.
- [11] 田志会,刘佳明.不同植物配置模式的大气颗粒物消减效应研究——以北京市中关村森林公园为例. *北京农学院学报*, 2020, 35(1): 50-54.
- [12] 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.
- [13] 薛文川.广州市主要绿地类型植物配置对空气颗粒物消减功能研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [14] 刘璐,管东生,陈永勤.广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力. *生态学报*, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [15] 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.
- [16] Tong Z M, Baldauf R W, Isakov V, Deshmukh P, Zhang K M. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 920-927.
- [17] Ow L F, Ghosh S. Urban Cities and road traffic noise: reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, 2017, 120: 15-20.
- [18] Li X B, Lu Q C, Lu S J, He H D, Peng Z R, Gao Y, Wang Z Y. The impacts of roadside vegetation barriers on the dispersion of gaseous traffic pollution in urban street canyons. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 17: 80-91.
- [19] Hagler G S W, Lin M Y, Khlystov A, Baldauf R W, Isakov V, Faircloth J, Jackson L E. Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions. *Science of the Total Environment*, 2012, 419: 7-15.
- [20] Lee E S, Ranasinghe D R, Ahangar F E, Amini S, Mara S, Choi W, Paulson S, Zhu Y F. Field evaluation of vegetation and noise barriers for

- mitigation of near-freeway air pollution under variable wind conditions. *Atmospheric Environment*, 2018, 175: 92-99.
- [21] 胡杨, 马克明. 城市街道绿化对空气质量及微气候影响的综合模拟研究. *生态学报*, 2021, 41(4): 1314-1331.
- [22] 郭晓华, 戴菲, 殷利华. 基于 ENVI-met 的道路绿带规划设计对PM2.5消减作用的模拟研究. *风景园林*, 2018, 25(12): 75-80.
- [23] 戴菲, 毕世波, 郭晓华. 基于 ENVI-met 的道路绿地微气候效应模拟与分析研究. *城市建筑*, 2018(33): 63-68.
- [24] 符冰芬. 广州市道路绿带植物配置对PM2.5的滞尘效应及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [25] Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 1998, 13: 373-384.
- [26] Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 2012, 94(1): 91-101.
- [27] Vos P E J, Maiheu B, Vankerkom J, Janssen S. Improving local air quality in cities; to tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 2013, 183: 113-122.
- [28] 吴仪, 邓孺孺, 秦雁, 王春梅, 梁业恒, 熊龙海. 秋冬季珠三角典型区域气溶胶浓度垂直分布的激光雷达反演. *遥感学报*, 2020, 24(3): 302-318.
- [29] Willmott C J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309-1313.
- [30] Muniz-Gaal L P, Pezzuto C C, de Carvalho M F H, Mota L T M. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 2020, 169: 106547.
- [31] Klein P K, Berkowicz R, Plate E J. Modelling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 14(1/2/3/4/5/6): 496.
- [32] 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.
- [33] 徐伟嘉, 幸鸿, 余志. 道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究. *环境科学*, 2012, 33(2): 532-538.
- [34] Chatzidimitriou A, Yannas S. Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 33: 85-101.
- [35] 李萍, 王松, 王亚英, 郝兴宇, 武小钢, 阎海冰, 蔺银鼎. 城市道路绿化带“微峡谷效应”及其对非机动车道污染物浓度的影响. *生态学报*, 2011, 31(10): 2888-2896.
- [36] 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.
- [37] 李青好, 胡婷蕊, 陈楠, 王齐, 饶品华, 段玉森, 黄辰宇. 某高密度街区大气颗粒物质量浓度分布特征实测研究. *环境污染与防治*, 2022, 44(2): 206-211, 217.
- [38] 王浩. 京津地区大气细颗粒物PM2.5的时空变化特征及来源研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [39] 孟浩贤. 甘肃经济社会发展与能源消耗对环境空气质量的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [40] 崔新娟, 田野, 刘坤, 韩尤杰, 刘新华. 济南市 2018—2019 老旧柴油车污染现状及治理措施的减排效益分析. *时代汽车*, 2022(9): 52-53.
- [41] 钟庄敏. 基于车载测试的轻型汽油和混合电动车排放因子建立的关键问题与特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [42] 陈卓伦. 绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [43] 刘之欣. 基于循证设计的湿热地区树木小气候效应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [44] 任思佳. 城市街谷绿化形式对机动车尾气扩散影响的数值模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [45] 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PM2.5的影响研究. *生态学报*, 2020, 40(13): 4340-4350.
- [46] 张灵芝, 秦华. 城市道路行道树绿带对PM2.5的滞尘效应及其变化分析. *中国园林*, 2015, 31(5): 106-110.