

DOI: 10.5846/stxb201703080392

周姝雯,唐荣莉,张育新,马克明.街道峡谷绿化带设置对空气流场及污染分布影响的模拟研究.生态学报,2018,38(17): - .
Zhou S W, Tang R L, Zhang Y X, Ma K M. Simulation study on the influence of green belt settings on air-flow and pollution distribution in street canyon.
Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

街道峡谷绿化带设置对空气流场及污染分布影响的模拟研究

周姝雯^{1, 2}, 唐荣莉^{1, 3}, 张育新¹, 马克明^{1, *}

1 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 重庆市农业科学院生物技术研究中心, 重庆 401329

摘要:合理设置道路绿化带能够改变街道空气流场进而改善空气质量。利用风洞试验结合数值模型的方法测试了树冠形状和绿化带位置对街道峡谷的风场影响。在数值模型中,采用针对植物模型不同高度赋予不同叶面积密度(leaf area density, LAD)值的新方法近似模拟不同树冠形状的植物,通过输入污染源数据,得到风场及污染物浓度数据结果;与风洞试验结果进行对比,验证了其有效性;进而,利用数值模型分析了不同绿化带设置下街道峡谷内行人的污染暴露特征,结果表明绿化带位置及树冠形状影响街道峡谷中的涡流结构,形成复杂的细小湍流,从而影响街道峡谷中的风环境和污染物分布。阔叶树冠和位于街道峡谷中央的绿化带位置有利于降低行人污染暴露风险。未来研究中,通过增加风洞试验布点、考虑热力作用及气象因子的影响,或许可以提供更加详细的改善街道峡谷微环境的绿化带布局,为城市大气环境管理和绿地系统建设提供科学依据。

关键词:街道峡谷;树冠形状;绿化带位置;污染分布;数值模拟;风洞试验

Simulation study on the influence of green belt settings on air-flow and pollution distribution in street canyon

ZHOU Shuwen^{1, 2}, TANG Rongli^{1, 3}, ZHANG Yuxin¹, MA Keming^{1, *}

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Biotechnology Research Center, Chongqing Academy of Agricultural Science, Chongqing 401329, China

Abstract: Reasonable greenbelt setting can change the air flow field, effectively optimizing air quality. In this study, the effects of crown profiles and location of green belts in street canyon were explored by using wind tunnel and numerical model. In numerical part, an innovative method, assigning different leaf area density (LAD) values to different heights of plant models, was used to simulate the crown profiles in the numerical model, and then the pollution source data was input into the simulation system to calculate the wind field data and pollutant concentration data. After simulate calculation, the numerical model was verified by comparing data from simulation results with the the data obtained from wind tunnel experiment. At last, pollutant exposure characteristics of pedestrians in street canyons under different green belts settings were analyzed using the numerical model. The results show that the differences between green belts location and crown profile will affect the vortex structure in the street canyon, resulting in complex turbulence, which affects the wind environment and the pollutant distribution in the street canyon. The deciduous profile and the one central green belt are

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41430638);国家重点研究和发展计划项目(2016YFC0503003);国家自然科学基金青年科学基金项目(31500381);城市与区域生态国家重点实验室自主重点项目

收稿日期:2017-03-08; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

effective in reducing the pedestrians pollutant exposure. In future study, more monitoring points should be set in the wind tunnel and the influence of thermal and meteorological factors should also be embedded into simulation and wind tunnel experiment, so as to provide a more detailed configuration of the green belt in street planning to alleviate the pollution in the microenvironment in street canyons, and provide better scientific basis for local atmospheric environment management and the design of urban green space.

Key Words: street canyon; crown profile; location of green belts; pollution distribution; numerical simulation; wind tunnel

绿化带作为街道峡谷的绿色基础设施,能发挥多种生态服务,如改变街道峡谷内气体流动、提供荫蔽、过滤污染物,从而改善微环境^[1]。良好的街道峡谷微环境能够满足城市公共空间舒适度的要求,促进城市居民外出活动的积极性,降低建筑物的能源消耗^[2]。合理设置街道绿化带,妥善管理树冠覆盖是改善街道风环境、移除空气环境污染物非常重要的策略。

植物特征的差异会造成街道峡谷内污染状况的差异。植物冠层会改变街道峡谷内的风场、减弱街道峡谷内的环形涡流、降低街道建筑顶部空气交换速率,从而导致街道通风效应减弱和污染物浓度增加^[1]。目前,一些针对街道峡谷中绿化带内树木连续性、树冠孔隙度开展风速及污染物浓度的响应研究发现,孔隙度越大^[3]、树木之间间隔越宽^[4],空气流通越好、越利于污染物的扩散。也有研究发现绿化带位置的影响, McNabola 等^[5]和 Gromke 等^[6]分别应用计算流体模型(Computational Fluid Dynamics, CFD)和风洞试验法证实了街道中央一道低矮墙体或一条连续的灌木篱墙有利于降低街道峡谷中行人的空气污染物暴露风险。本研究尝试在街道峡谷中设置不同位置的针叶及阔叶乔木,测试是否具有同样的规律。

树冠形状对街道风场的影响研究未见报道。树冠几何结构对行人水平局域风环境具有重要影响,树冠形状的精确表达在模拟局域风环境及局域颗粒污染物分布时至关重要^[7-8]。然而许多数值模型往往忽略植物树冠形状,仅以最基本的柱状形式来表示植物^[9]。风洞实验法能够展示绿化带的详细设置,可用于树冠形状对街道峡谷风场及污染物扩散的影响研究。需要进行尝试。

气体污染物浓度基本不会因树木覆盖的变化而变化,但空气颗粒物浓度受到绿化带的明显影响^[10]。并且近道路绿化带对颗粒污染物的截获能力随颗粒粒径的增大而增大^[11]。因此本研究选择数值模型所能模拟的最大粒径颗粒物 PM_{10} 作为模拟污染源。

本研究将物理学的风洞试验方法运用到城市生态学研究,结合三维微尺度数值模型法提出一种在 CFD 模型中能够近似模拟不同树冠形状的新方法,分析街道峡谷树冠形状及绿化带位置对风速场和污染物分布的影响,探索街道峡谷绿地设置的优化方案,为城市大气环境管理和绿地建设提供科学依据。

1 研究方法

1.1 风洞试验

试验利用北京林业大学风洞设备进行,风洞设备分为动力段、过渡段及试验段(图 1a)。该设备中模拟区域的大小为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 12\text{ m}$,环境平均温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,大气压强为 101.3 kPa 。该风洞设备的主要监控系统由三维移测系统、热膜风速仪和热线风速仪组成。该仪器迎风界面小,总迎风面积不超过风洞截面的 5%,雷诺数达到自模拟的范围。TSI 公司生产的 IFA300 型单丝热膜探头风速仪用于测量风洞内的风速廓线和边界层厚度。KIMO 公司生产的热线风速仪则用于试验段风速流场的观测,该仪器在 $3.1\text{—}30\text{ m/s}$ 量程内的测量精度达到 $\pm 0.1\text{ m/s}$ 。在本研究中,风速仪每秒记录 1 次风速数据,每个观测点取 10 s 内的平均值作为该观测点的风速数据。本研究预设实际与模拟街道的比例尺为 150:1,模型中的街道峡谷长度为 $L=40\text{ cm}$,两侧为高度 $H=8\text{ cm}$ 的连续建筑,街道宽度 $W=8\text{ cm}$ 。重点关注的行人高度 1.5 m 在实验中对应对应 1 cm 高度。

在模拟区域中复现大气边界层的动力学特征是保证模拟结果准确性的重要前提^[12]。通过调整尖劈和粗糙元的位置及数量来调节风洞过渡段的粗糙度,使风洞内风速廓线与实际风速廓线的幂律趋于相同,从而实现模型的动力学相似条件。风速廓线的测量位点在试验段起始断面的垂直中心线上(图 1b)。初始风速设置为 8 m/s,近地层的平均水平风速模拟用以下幂律公式表示:

$$\frac{U(z)}{U(z_{\text{ref}})} = \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^{\alpha_U} \tag{1}$$

试验中,将模型中的建筑物高度作为参考高度 $Z_{\text{ref}}=H=8\text{ cm}$,将该高度模型上游基本未受干扰处的风速作为风速参考值 $U(Z_{\text{ref}})=7.62\text{ m/s}$ 。试验测得风速廓线的稳定度参数 $\alpha_U=0.18$ (图 1c)。参照城区与郊区的典型稳定大气边界条件^[13],稳定度参数 $0.15\leq\alpha_U\leq0.25$ 属于中性大气稳定度(D 型)条件。

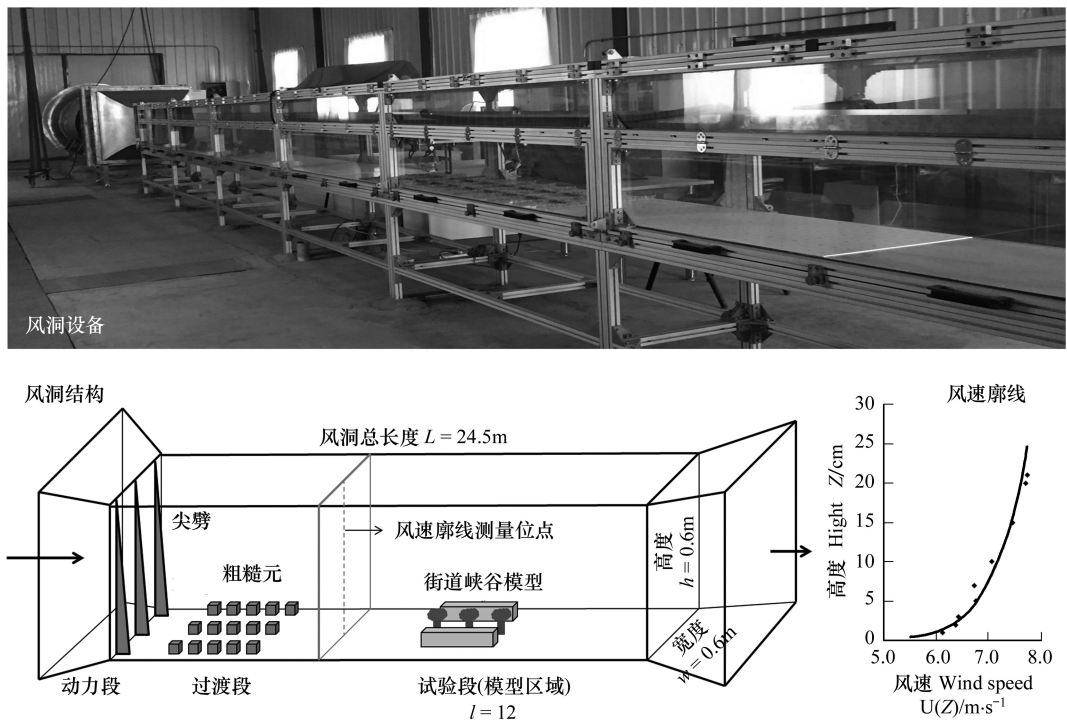


图 1 风洞设备及其构造示意图(a:风洞设备,b:风洞结构,c:风速廓线)

Fig.1 Wind tunnel and the structure diagram(a: wind tunnel, b: structure, c: wind profile)

1.2 实验设置

实验变量包括街道与风向之间的夹角 α 、树冠形状和绿化带位置(表 1)。

表 1 实验参数设置
Table 1 Experimental parameters settings

参数 Parameters		树冠形状 Crown profile		
变量 Variables	绿化带位置	阔叶冠形	针叶冠形	无植物
	中央绿化带	中央阔叶绿化带	中央针叶绿化带	对照组
	两侧绿化带	两侧阔叶绿化带	两侧针叶绿化带	
常量 Constants	街道与风向之间的夹角 α		0°	
			90°	
	街道宽高比 W/H 1			
	街道长高比 L/H		5	

树冠形状考虑阔叶冠形与针叶冠形(图 2a),街道中的阔叶树木模型高度 $H_{\text{U}}=6\text{ cm}$ 、枝下高 $h_{\text{U}}=2\text{ cm}$ 、冠

幅 $P_1 = 3 \text{ cm}$, 针叶树木模型高度 $H_2 = 6 \text{ cm}$ 、枝下高 $h_2 = 1 \text{ cm}$ 、冠幅 $P_2 = 2 \text{ cm}$ 。绿化带位置考虑两种情况: 在街道峡谷内靠近两侧建筑设置两侧绿化带和在街道峡谷中央设置中央绿化带(图 2b)。街道宽高比和长高比是实验的常量, 分别为 $W/H = 1$ 和 $L/H = 5$ 。

实验风速测量点呈网格分布(图 2b,c 圆点所示)。垂直方向设置 4 个梯度: 1、3、6 和 8 cm, 分别对应 1.5 (呼吸带高度)、4.5、9、12 m 的实际高度; 水平方向则在街道两侧的人行道背风面和迎风面布点, 沿道路每 5 cm 布一个点。在理论上: 当 $\alpha = 0^\circ$ 时(平行于街道), 街道迎风侧和背风侧的风速分布情况相同; 当 $\alpha = 90^\circ$ 时(垂直于街道), 街道两端的风速分布情况相同。因此在实际测量中针对这些位置的监测点未进行全部测量。

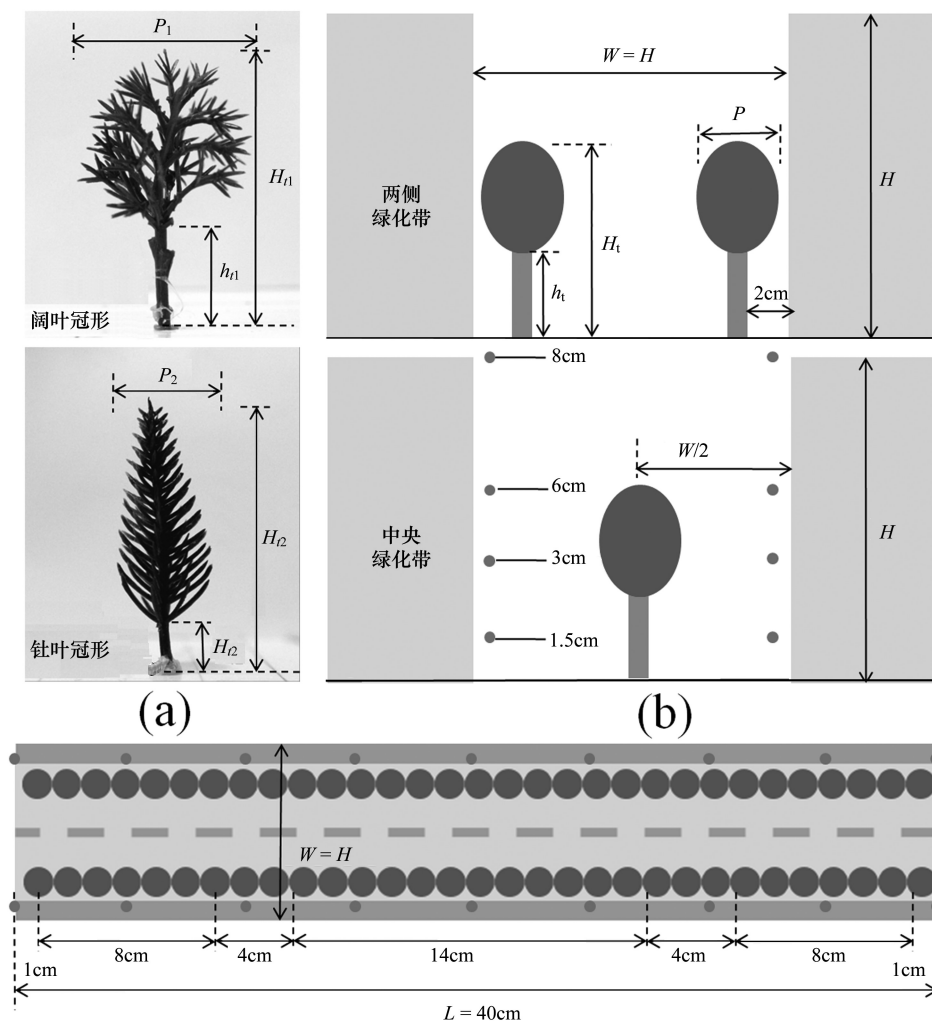


图 2 实验设置

Fig.2 Experimental settings

a: 树冠形状, b: 绿化带位置, c: 街道俯视图; 圆点表示风速测量点

1.3 数据分析

采用 Surfer 11.0 对风速数据进行空间插值, 实现风速场数据的可视化, 便于更直观地对比分析植物设置对街道峡谷迎风面和背风面二维风速场的影响。插值方法采用克里金插值法, 以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计, 考虑了空间属性在空间位置上的变异分布, 能够反映空间场的各向异性。

ENVI-met 模型是一个用于模拟城市街区尺度“实体表面-植物-空气”相互作用的高分辨率三维 CFD 模型^[14]。用 ENVI-met 模型设置 PM_{10} 污染源得到各实验组中的三维污染物浓度场, 对风洞实验的结果加以验

证,并分析污染物浓度与风速的依赖关系。ENVI-met 需输入气象参数、道路特征参数、污染物特征参数、植物特征参数及建模网格(表 2)。

表 2 ENVI-met 模型输入参数
Table 2 Input parameters of ENVI-met

类型 Style	参数 Parameters	取值 Values	来源 Access to source
气象 Meteorology	风速 Wind speed(10 m)	3 m/s	根据风洞实验结果及式 1 计算得到
	温度 Temperature	26.85 ℃	风洞实验
	湿度 Humidity(2 m)	50%	风洞实验
街道 Street	高宽比 Height/Width (H/W)	1	风洞实验
	高度 Height (H)	8 m	风洞实验
	宽度 Width (W)	8 m	风洞实验
	长度 Length (L)	40 m	风洞实验
污染 Pollutants	污染源 Pollution	PM ₁₀	ENVI-met 模型能模拟的最大粒径污染物
	源高 Sourceheight	0.3 m	一般交通排放源高度
	源强 Source intensity	11.3(μg s ⁻¹ m ⁻¹)	经验取值 ^[15]
植物 Vegetation	叶面积密度 LAD	0.2—2.0 m ² /m ³	根据风洞实验中的植物模型计算得到 ^[16] (图 2a 和图 3)
	树高 Tree height	6 m	风洞实验
网格 Grid	区域 Area	18 m×44 m×20 m	根据风洞试验模拟的街道大小及消除边界特征的模型需求建立
	像元 Pixel	1 m×1 m×1 m	模型可模拟的最精细像元
	粗糙度 Roughness	0.01	经验取值,城市环境常用的表面粗糙度 ^[17-18]

在模拟植物树冠形状时采用在不同高度赋予植物模型不同面积密度(LAD)值的方法建立柱形植物模型,并以此代表不同树冠形状的植物(图 3)。

采用 SPSS 21.0 分析污染物质量浓度与风速之间的相关关系,以及非参数分析即 Spearman 秩相关系数统计方法描述污染物质量浓度与风速之间的相关关系。

2 结果

2.1 风速场

将风洞试验及 ENVI-met 所得风速数据做标准化处理使得所有值落在区间[0,1]之间,对比风向垂直于街道峡谷时两种方法对照组的风速场。风洞试验迎风面和背风面的风速分布略有不同,但整体呈现出中间高、两端低的分布规律(图 4a)。街道峡谷两端($x=0$ cm 或 $x=40$ cm)的平均风速($v_e=1.79$ m/s)大约是街道中央

($x=20$ cm)平均风速($v_c=0.90$ m/s)的 2 倍。迎风面在街道峡谷中下部的风速较低,出现了一个明显的低风速区。背风面的低风速区则出现在靠近街道峡谷中央的两侧及街道峡谷中上部。

数值模拟的风速分布也基本呈现出中间高、两端低的分布规律,相较风洞试验结果而言背风面和迎风面下方的低风速区向相反的方向发生偏移(图 4b)。

2.2 树冠形状对风场的影响

将单株阔叶树模型和针叶树模型置于风洞设备进行测试,发现树冠形状影响着不同高度的树木周围风场。针叶树在行人高度对风的阻碍作用更强,而阔叶树在树冠中央高度对风的阻碍更强(图 5)。可见树木在冠幅大且茂密的冠层高度对风的阻碍作用更明显,锥形的针叶树在高度低的位置对风有较大阻碍,近似圆形

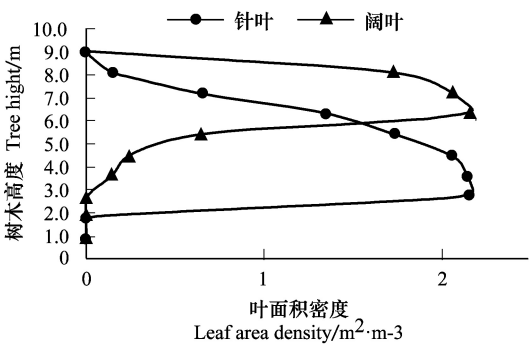


图 3 ENVI-met 模型中植物模型的叶面积密度(LAD)设置
Fig.3 Settings of tree models' leaf area density (LAD) in ENVI-met

的阔叶树在冠层中间高度对风的阻碍更强。

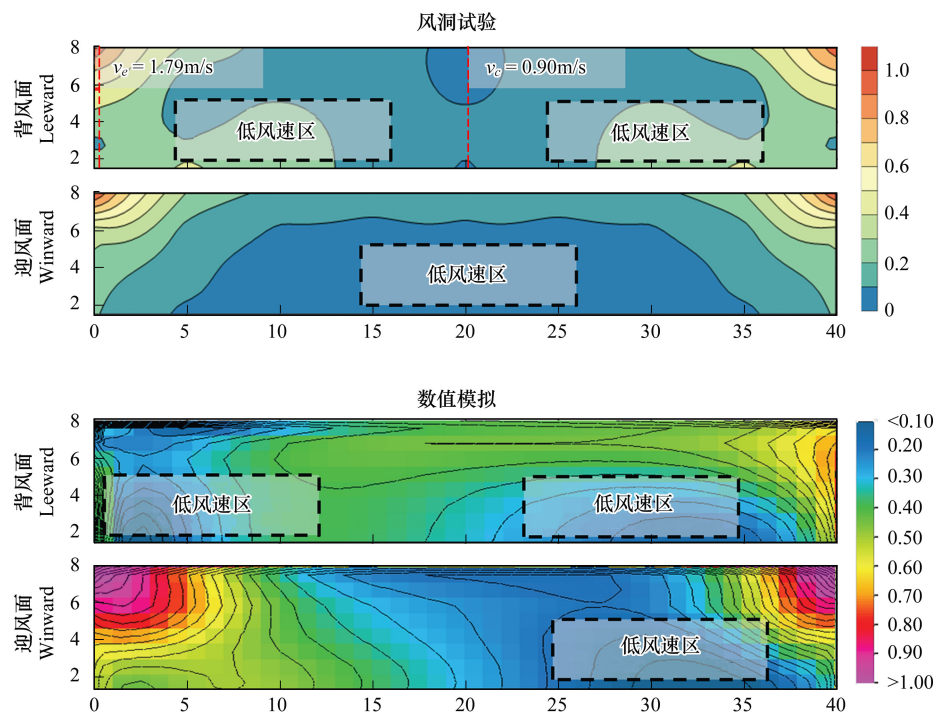


图4 对照组风速分布/(m/s)

Fig.4 Wind speed distribution of the control group

a: 风洞试验, b: 数值模拟; $\alpha = 90^\circ$

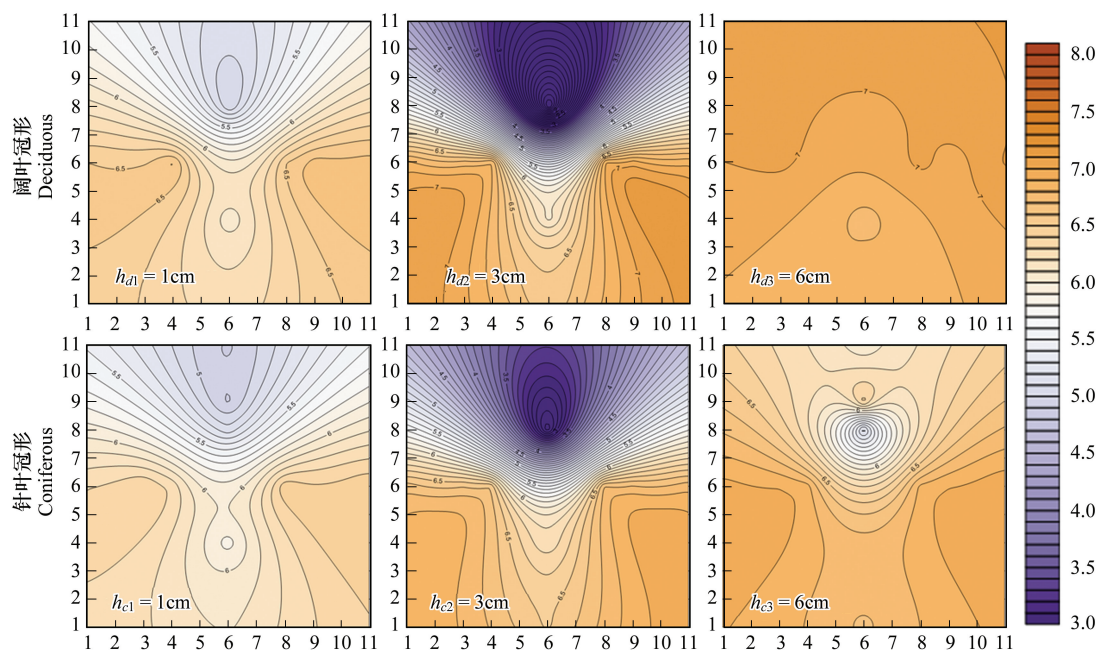


图5 不同树冠形状在不同高度的二维风场/(m/s)

Fig.5 Two-dimensional wind field of different crown profile in different height

2.3 绿化带设置的影响

2.3.1 绿化带设置对风场的影响

当 $\alpha = 90^\circ$ 时,街道两端的风速分布沿 $x = 20$ cm 轴线对称,街道峡谷内呈现出中间风速低、两端风速高,下部风速低、上部风速高的规律,迎风面的平均风速往往低于背风面(图 6)。阔叶冠形的设置相比针叶树冠形状更利于通风,中央绿化带的设置相比两侧绿化带更利于通风。

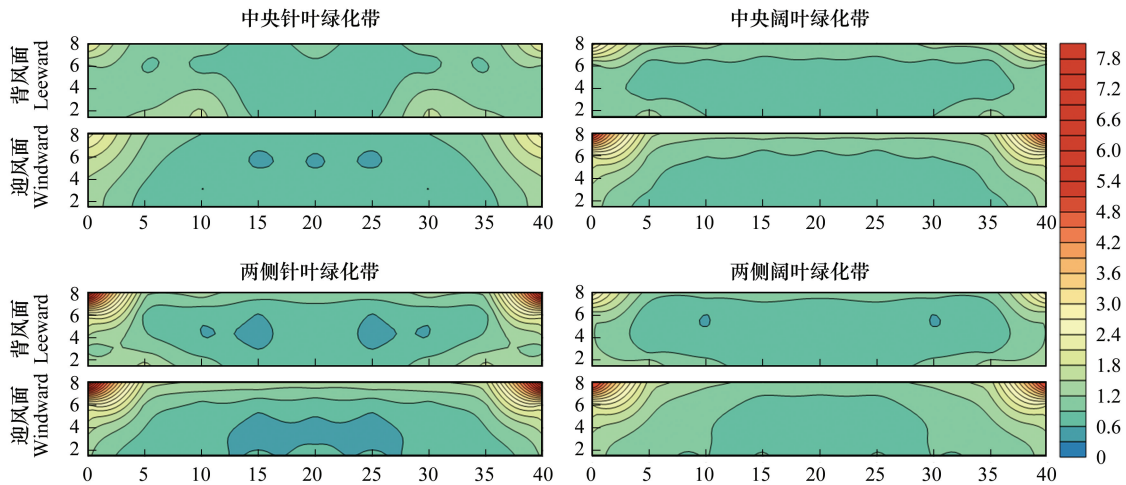


图 6 风洞试验背风面和迎风面的风速分布/(m/s) ($\alpha = 90^\circ$)

Fig.6 Wind speed distribution of leeward side and windward side in each group

当 $\alpha = 0^\circ$ 时街道两侧人行道平面的风速分布基本相同,仅列出一侧。街道峡谷内的风速比 $\alpha = 90^\circ$ 时更大,沿街道走向有减小的趋势(图 7)。当冠形为阔叶时,中央绿化带设置对风速的阻挡作用更小;当冠形为针叶时,两侧绿化带设置利于街道峡谷上部形成较大风速。

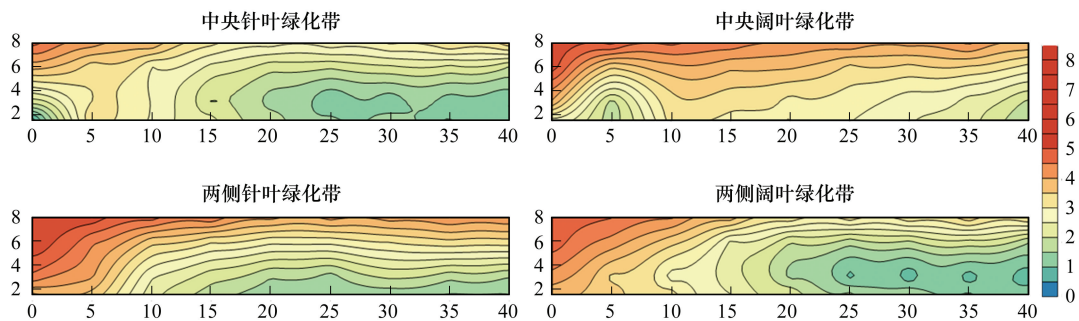


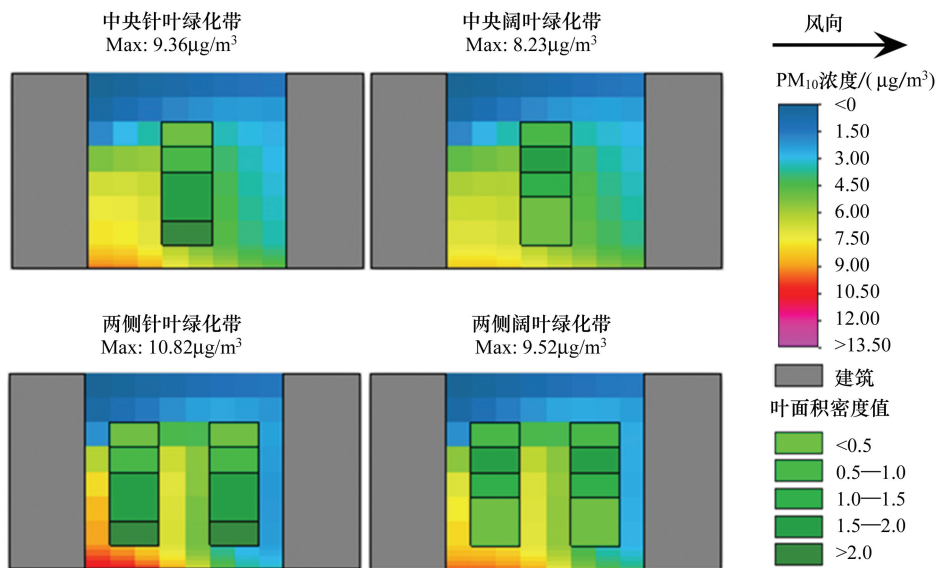
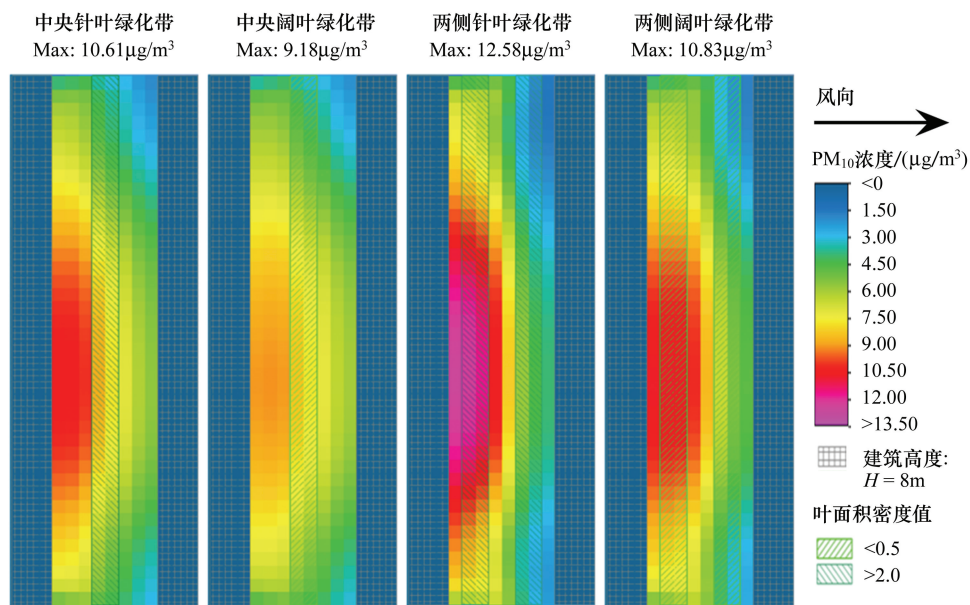
图 7 人行道面风速分布/(m/s) ($\alpha = 0^\circ$)

Fig.7 Wind speed distribution of the pavement

2.3.2 绿化带设置对 PM_{10} 分布的影响

当风向垂直于街道峡谷走向时:在两侧针叶绿化带设置下街道峡谷背风面 PM_{10} 质量浓度最大,最大值达 $10.5 \mu g/m^3$;在中央阔叶绿化带设置下街道峡谷背风面 PM_{10} 质量浓度最小,最大值仅 $7.5 \mu g/m^3$ (图 8)。各绿化带设置组在迎风面对 PM_{10} 质量浓度的影响不明显,平均值均低于 $3 \mu g/m^3$ 。树木颜色的由深到浅依次表示叶面积密度由 2.0 到 $0.5 m^2/m^3$,图 8 左列表示针叶树木,右列表示阔叶树木。

当风向垂直于街道峡谷走向时,对比呼吸带高度(1.5 m)的 PM_{10} 质量浓度分布:中央绿化带设置下 PM_{10} 质量浓度比两侧绿化带更低,阔叶冠形设置下 PM_{10} 质量浓度比针叶冠形设置更低(图 9)。这种污染物分布规律在街道背风面尤为显著。行人的污染暴露规律为:两侧针叶绿化带(约 $13.5 \mu g/m^3$) > 两侧阔叶绿化带

图8 街道中央纵剖面 PM_{10} 浓度分布Fig.8 PM_{10} concentration distribution of street central profile图9 行人高度(1.5m) PM_{10} 浓度分布Fig.9 PM_{10} concentration distribution of pedestrian level (1.5m)

(约 $10.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 中央针叶绿化带 (约 $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 中央阔叶绿化带 (约 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

3 讨论

3.1 模型有效性验证

使用风洞实验数据与 ENVI-met 模型模拟结果进行对比,以验证风速场的一致性。两种模拟方法中街道峡谷两端风速都远大于中央风速,这是由于街道两端存在角区涡流^[19],加速了空气流动。迎风面中下部低风速区和背风面下部两个低风速区的出现与街道峡谷内的爬跃流有关^[20]。然而,ENVI-met 模拟结果中迎风面和背风面下方的低风速区向相反的方向发生偏移,造成这种偏移的原因在于 ENVI-met 考虑了模拟区域的

地理特征,能够模拟地转风的影响,在不对称分布的水平风压作用下街道峡谷内的风速分布整体发生了偏移^[21]。尽管在地转偏向力的作用下数值模拟的低风速区发生了偏移,但是风洞试验法和数值模拟法在街道峡谷迎风面及背风面的风速分布规律仍然类似,证明了 ENVI-met 数值模型法与风洞试验法对风场模拟的结果具有一致性。

3.2 污染物浓度与风速的相关性

污染分布与风速有密切的依赖关系。一般而言,空气污染物会随着气流分散,风速越大的位置空气流通和交换情况越好,污染物浓度越小。过去的研究中常用线性关系来反映污染物浓度与风速之间的相关关系^[17],然而实际中的风向和风速是持续变化的,加之污染源位置不同、排放强度不同、行人及车辆的扰动等因素,用简单线性相关关系描述二者的依赖关系有局限性。本研究对 ENVI-met 模型输出的所有网格中的 PM_{10} 质量浓度进行正态性检验,结果不符合正态分布。污染物质量浓度与风速之间的相关关系不是简单线性相关,采用非参数分析即 Spearman 秩相关系数统计方法能够规避 Pearson 相关分析只适用于描述线性相关关系的缺点,更客观地反映两个风速与污染物质量浓度的共变趋势^[22]。统计分析的结果显示 PM_{10} 质量浓度与对应的风速呈显著负相关关系(Spearman 秩相关系数为 -0.780 , $P < 0.01$),表明较大风速更利于加快 PM_{10} 扩散、降低 PM_{10} 质量浓度。

3.3 树冠形状的效应

在水平方向上,各高度层的冠幅大小和树冠孔隙度影响影响气流的水平运动(图 5);在垂直方向上,针叶树上端体积更小,有更多的空间供给街道峡谷上部的空气交换(图 8)。因此为了降低街道峡谷的行人污染物暴露,应尽量选择阔叶冠形的树木保证街道峡谷下部的空气流通。

用数值模型在植物模型不同高度赋予不同 LAD 值的方法可以体现出不同树冠形状对街道峡谷内污染分布影响的差异。街道峡谷中的植物冠层体积往往是街道峡谷体积的 4%—14%^[23],植物是街道峡谷局域微环境中的重要组成部分。Endalew 等^[24]采用风洞法检验树木冠层内部的气流流动细节,证明在 CFD 模型中忽略树木冠层结构的影响的确会造成湍流计算的严重偏差。可见准确模拟树冠形状能够提高数值模型的精度,这对于街道峡谷湍流模拟研究至关重要。

3.4 绿化带位置的效应

在街道中央设置一列绿化带比在街道两侧设置两列绿化带更能有效降低行人污染物暴露风险(图 9)。之前的研究中曾得到过类似的结论:McNabola 等^[5]及 Gromke 等^[6]分别用 CFD 模型和风洞试验的方法证明了在街道峡谷中央设置低矮边界墙及灌木篱墙能显著降低背风面人行道处的污染物浓度。原因在于街道峡谷中央连续排列的植物会改变从上空进入街道峡谷的气流方向,使原本直接经过交通污染流向背风面的气流向街道峡谷上空流动,将街道峡谷近地面的污染物带出相对封闭的街道环境,从而改善街道峡谷背风面的空气质量。

3.5 研究的局限性

首先,风洞试验所布设的样点数量有限,插值结果不能完全代替观测数据。在迎风面和背风面分别选择 36 个呈网格分布的样点,插值结果受样点位置和样点密度影响,在今后的工作中可以适当提高样点密度,在有一定数量的观测数据的基础上,插值结果才会更逼近真实值^[25]。其次,本试验未对街道峡谷中的热力作用做详细研究,仅将扩散过程简单视为绝热过程。在实际情况中,街道峡谷地面源污染物的扩散过程受热力因素的影响比较大,如街道峡谷内的自然对流引起的扩散。再次,本研究考虑的绿化带设置方式有限,在今后的研究中应设置更多数量更接近实际情况的绿化带进行对比研究。最后,本研究忽略了气象因子的影响。除了风为颗粒污染物疏散提供条件外,气压^[26]、总辐射量^[27]、温湿度^[28]等因素也与颗粒污染物浓度之间有一定的相关性。

4 结论

(1)提出了一种新的树冠形状模拟方法,即在数值模型(植物模型)中不同高度赋予不同 LAD 值,可以有

效提高典型街道峡谷内污染状况的模拟精度。

(2) 树冠形状形成的复杂细小湍流会改变街道峡谷中的风环境和污染物分布。为了改善街道峡谷行人水平的污染物暴露, 应选择低层冠幅和孔隙度小的阔叶冠形树木, 以保证街道峡谷下方的空气流通。

(3) 对于树冠连续的乔木绿化带, 其位置的不同将导致街道峡谷中涡流结构的差异。街道中央绿化带设置比两侧绿化带设置更利于降低行人的污染暴露风险。

(4) 在街道峡谷中央设置阔叶树冠绿化带最利于降低行人污染暴露风险, 是城市道路绿化带建设的最佳选择。

致谢: 本研究获得北京林业大学丁国栋教授及王胧、赛克在风洞试验中给予帮助, 中山市气象局劳钊明在数值模型使用上给予指导, 特表感谢。

参考文献 (References):

- [1] Ng W Y, Chau C K. Evaluating the role of vegetation on the ventilation performance in isolated deep street canyons. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 50(1/4): 98-110.
- [2] Yu C, Hien W N. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2): 105-120.
- [3] 简银鼎, 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.
- [4] Gromke C, Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon-Experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(16): 3287-3302.
- [5] McNabola A, Broderick BM, Gill LW. A numerical investigation of the impact of low boundary walls on pedestrian exposure to air pollutants in urban street canyons. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(2): 760-769.
- [6] Gromke C, Jamarkattel N, Ruck B. Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 2016, 139: 75-86.
- [7] Mochida A, Tabata Y, Iwata T, Yoshino H. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11): 1667-1677.
- [8] Hofman J, Bartholomeus H, Janssen S, Calders K, Wuyts K, Van Wittenberghe S, Samson R. Influence of tree crown characteristics on the local PM₁₀ distribution inside an urban street canyon in Antwerp (Belgium): A model and experimental approach. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2016, 20: 265-276.
- [9] 周姝雯, 唐荣莉, 张育新, 马克明. 城市街道空气污染物扩散模型综述. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1039-1048.
- [10] Yli-Pelkonen V, Setälä H, Viippola V. Urban forests near roads do not reduce gaseous air pollutant concentrations but have an impact on particles levels. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 158: 39-47.
- [11] Tong Z, Baldauf RW, Isakov V, Deshmukh P, Max Zhang K. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 920-927.
- [12] 周洪昌, 吴晓琰. 街道峡谷湍流流动的风洞试验与数值计算. *空气动力学学报*, 1998, 16(4): 411-418.
- [13] 国世友, 周振伟, 刘春生. 用风廓线指数律模拟风速随高度变化. *黑龙江气象*, 2008, 25(S1): 20-22.
- [14] Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 1998, 13(3/4): 373-384.
- [15] 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.
- [16] 王锦地, 李小文. 树冠叶面积体密度和叶面积指数的间接估值方法研究. *环境遥感*, 1995, 10(4): 288-297.
- [17] Nikolova I, Janssen S, Vos P, Vrancken K, Mishra V, Berghmans P. Dispersion modelling of traffic induced ultrafine particles in a street canyon in Antwerp, Belgium and comparison with observations. *Science of the Total Environment*, 2011, 412: 336-343.
- [18] Hofman J, Samson R. Biomagnetic monitoring as a validation tool for local air quality models: A case study for an urban street canyon. *Environment International*, 2014, 70: 50-61.
- [19] Gromke C, Ruck B. On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 131(1): 19-34.
- [20] Oke T R. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 1988, 11(1): 103-113.
- [21] 杨小山, 赵立华. 城市风环境模拟: ENVI-met 与 MISKAM 模型对比. *环境科学与技术*, 2016, 39(8): 16-21.
- [22] 李军, 孙春宝, 刘咸德, 董树屏, 郭婧, 王焱, 安欣欣, 刘锋. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 663-669.
- [23] Gromke C, Blocken B. Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 2015, 196: 176-184.
- [24] Endalew A M, Hertog M, Delele M A, Baetens K, Persoons T, Baelmans M, Ramon H, Nicolai B M, Verboven P. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30(2): 356-368.
- [25] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 唐涛, 唐明. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2154-2163.
- [26] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 李炬, 马雁军. 北京地区 PM₁₀ 质量浓度与边界层气象要素相关性分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4): 607-612.
- [27] 李凯, 张承中, 周变红. 西安市采暖期 PM_{2.5} 污染状况及其与气象因子的相关分析. *安徽农业科学*, 2009, 37(20): 9603-9605.
- [28] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 郑晓欣. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析. *生态学报*, 2016, 36(24): 7897-7907.