

庭院乔木对 $PM_{2.5}$ 污染分布影响的模拟分析

屈海燕,宋迪,刘凌汉,王康

(沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究植物空间布局和植物尺度对 $PM_{2.5}$ 扩散的影响规律,增加对小空间空气质量的关注度,为筛选适合于场地条件的植物配置方案提供思路. 方法 以沈阳建筑大学校园的庭院为例,利用 FLUENT 模拟软件对校园庭院内植物的不同空间布局形式、不同尺度、不同垂直高度进行数值模拟分析. 结果 在校园东、西两侧教学楼一层架空的庭院内,截面高度是 1.5 m 时,植物选用条带状布局的庭院内部 $PM_{2.5}$ 的质量浓度低于选用三角状布局的庭院;3 种典型植物尺度的代表植物降低 $PM_{2.5}$ 质量浓度的次序为新疆杨、山楂、白蜡;随着垂直高度的增加, $PM_{2.5}$ 质量浓度逐步降低. 结论 条带状的植物布局更有利于 $PM_{2.5}$ 扩散;冠幅与树高的比值越小对 $PM_{2.5}$ 扩散影响越大.

关键词 $PM_{2.5}$;数值模拟;植物空间布局;植物尺度;扩散能力

中图分类号 TU 984.183

文献标志码 A

Simulation for the Effect of Courtyard Plants on $PM_{2.5}$ Pollution Distribution

QU Haiyan, SONG Di, LIU Linghan, WANG Kang

(School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The influence of plant spatial layout and plant scale on $PM_{2.5}$ diffusion was explored to increase the attention to air quality in small space and to provide a new idea for rationally screening plant allocation suitable for site conditions and based on particulate matter diffusion. The courtyard of Shenyang Jianzhu University taken as an example, the different spatial layout forms, scales and vertical heights of plants in the campus courtyard were simulated and analyzed by FLUENT simulation software. In the overhead courtyard on the east and west sides of the teaching building, when the cross-sectional height is 1.5 m, the mass concentration of $PM_{2.5}$ in the courtyard with strip layout is lower than the courtyard with triangle layout. The order of the representative plants of three typical plant scales to reduce the concentration of $PM_{2.5}$: *Populus alba* var. *pyramidalis* Bge. > *Crataegus pinnatifida* Bunge. > *Fraxinus chinensis* Roxb. . As the vertical height increases, the mass concentration of $PM_{2.5}$ gradually decreases. Strip-like plant layout is more conducive to $PM_{2.5}$ diffusion. The

收稿日期:2019-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(31470031);辽宁省自然科学基金项目(20180550535)

作者简介:屈海燕(1973—),女,教授,博士研究生,主要从事生态景观设计和景观工程方面研究.

smaller the ratio of crown width to tree height,the greater the influence on $PM_{2.5}$ diffusion.
Key words: $PM_{2.5}$; numerical simulation; spatial layout of plants; plant scale; diffusion capacity

近几年来,悬浮的可吸入颗粒物(Particulate Matter, PM)已经成为影响城市空气质量的主要污染物^[1]. 在大气中颗粒物主要以固体和液体两种形式存在. 通常将颗粒物按是否在空气中发生第二次化学反应,分为一次颗粒物和二次颗粒物. 将颗粒物按粒径大小分类,粒径小于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物称为细颗粒,用 $PM_{2.5}$ 表示. 国内外学者对 $PM_{2.5}$ 的研究主要从气象、化学、生态、城市规划设计^[2]等领域展开,关注的角度有 $PM_{2.5}$ 的化学组成成分^[3]、来源^[3]、时空分布差异^[4]、质量浓度与各气象要素间的关系^[5]以及对 $PM_{2.5}$ 的监测和模拟^[6-7]等. 张晶晶等^[8]将树木作为多孔介质,对3种典型建筑布局下 $PM_{2.5}$ 的扩散情况进行模拟. 杨李宁等^[9]应用 CFD 软件 PHOENICS 模拟了建筑与不同风向夹角的环境情况,以此解析建筑周边的污染情况. 周媛等^[10]运用数值模拟的方法综合分析了城市绿地规划方案与风速、污染物质量浓度以及地表温度的关系,并提出了最优的城市绿地空间结构优化方案. 郭振宇^[11]采用数值模拟和风洞实验相结合的方法,探究了城市街道峡谷内机动车尾气排放的 $PM_{2.5}$ 的对流扩散规律研究. A. McNabola 和 C. Gromke 等^[12-13]应用 CFD 和风洞实验法证实街道中央一条低矮植物墙体或灌木篱墙有

利于降低街道峡谷内空气污染物质量浓度等. 应用 CFD 技术模拟 $PM_{2.5}$ 扩散情况的相关研究起步稍晚,并且此前的研究较少涉及运用数值模拟的方法探究植物对 $PM_{2.5}$ 扩散的影响. 在相关规划领域已经证明,利用数值模拟技术分析区域风环境和空气污染物扩散状况是一种非常高效的研究方法. 笔者选取沈阳建筑大学庭院空间及其内部现状植物作为研究对象,应用数值模拟的方法,分析比较庭院内植物不同空间布局形式、植物不同尺度对 $PM_{2.5}$ 在庭院中扩散的影响.

1 建立数值模型

1.1 植物空间布局

1.1.1 校园庭院简介

沈阳建筑大学庭院处于校园教学区内,共由9个内庭院组成,整体呈规则式的方形网格状. 各内庭院均由东西南北四幢教学楼围合而成,呈规则式“口”字形. 各内庭院占地面积相近,长宽为 $80\ m \times 80\ m$. 由于一层两面架空的形式是沈阳建筑大学庭院的代表性空间,所以选取某一层两面架空的庭院作为笔者模拟空间. 此类型庭院的东、西两侧教学楼一层为架空形式,南、北两侧教学楼一层为实体结构(见图1). 教学楼共5层,高约26 m.

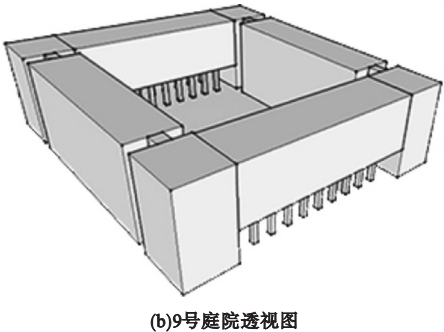
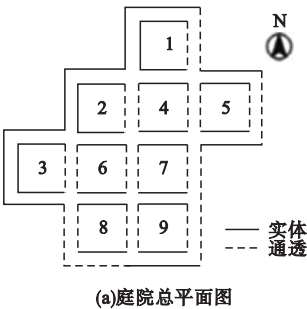


图1 模拟空间示意图
Fig.1 Simulated space schematic

1.1.2 植物三角状布局和条带状布局

沈阳建筑大学庭院内有两种典型植物空间布局形式,分别为三角状布局和条带状布局(见图2).其中三角状布局是沿庭院对角线展开(见图2(a)),条带状布局是按平行于南北教学楼、垂直于东西教学楼布置(见图2(b)).

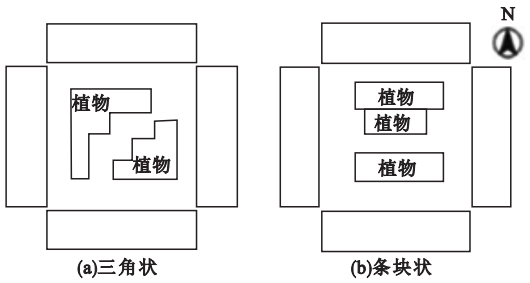


图2 植物空间布局方式

Fig. 2 Spatial layout of plants

鉴于乔木冠幅和树高是定义树木模型的两个主要数据,依据现场植株的测量数值,将沈阳建筑大学庭院内主要乔木树种按冠幅与树高之比是否等于1分为3类,比值约等于1的树种有山梨、苹果、海棠、山楂等;比值小于1的树种有银杏、新疆杨等;比值大于1的树种有白蜡、垂柳等.

1.2 数值模型建立

笔者建模时对各要素进行适当简化.建筑物忽略门窗和一层柱体,教学楼设定长宽高为80 m×16 m×26 m的长方体,一层有架空的教学楼在保持整体高度不变的情况下底部抬高5 m.在植物方面,乔木对气流扩散起到主要作用,草坪及低矮灌木对行人高度及以上位置PM_{2.5}的扩散影响较小^[14],因此,笔者在建模过程中只考虑乔木对PM_{2.5}扩散的影响.通常建模时乔木常被简化为长方体、四棱锥、四棱台3种形式^[15](见图3).对比此3种形式的乔木模型,在建模过程、计算时间、收敛性以及模拟效果.长方体几何模型的树冠形式不仅建模简单,而且具有计算时间短,收敛性好,模拟效果较好等优点^[15]

(见表1).所以,笔者在建模时也将采用简化的长方体来代替树冠模型的形式.

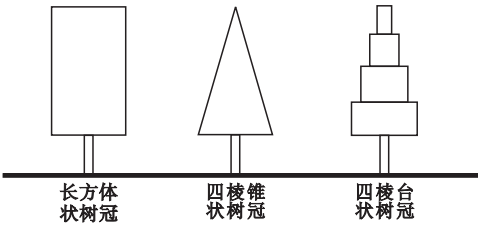


图3 植物树冠几何模型

Fig. 3 Geometric model of plant crown

表1 3种树冠几何模型模拟对比

Table 1 Comparison of three crown geometric models

树冠几何模型	建模过程	计算时间	收敛性	模拟效果
长方体	简单	短	很好	较好
四棱台	较复杂	较长	好	好
四棱锥	很复杂	长	好	一般

1.2.1 植物不同尺度模型

笔者将乔木冠幅与树高的比值约等于1的树种在建模时定义为3 m×3 m×3 m的正方体体块.小于1的树种在建模时定义为3 m×3 m×18 m的长方体体块.大于1的树种在建模时定义为6 m×6 m×5 m的长方体体块(见表2).

表2 3种典型植物尺度模型

Table 2 Table2 Three typical plant size models

代表树种名称	模型长宽高/ m	冠幅与树高比
山楂	3×3×3	1
白蜡	6×6×5	>1
新疆杨	3×3×18	<1

1.2.2 植物不同空间布局模型

通过长宽5 m×5 m的方格网确定两种植物空间布局,总种植面积相等且均为625 m²,乔木以相互间树冠搭种植为标准,树冠超出种植范围一半的舍弃,不足一半的保留.以此种方法建立三角状和条带状数值模型,两种形式仅植物布局不同,保证种植面积和植物绿量相同(见图4).

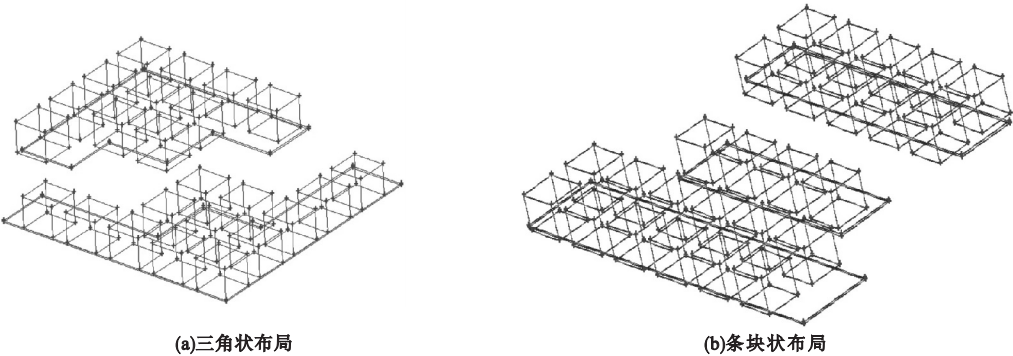


图4 植物不同空间布局建模示意图

Fig. 4 Modeling sketches for different spatial layout of plants

1.3 研究方法

利用 FLUENT 软件模拟沈阳建筑大学庭院内植物不同空间布局与植物不同尺度对 PM_{2.5} 扩散的影响. 在数值模型建立方面, 以保持原建筑物基本形态、植物空间布局形式、植物外部形态为原则, 先利用 AutoCAD 专业绘图软件建立平面图, 确定各建筑物和植物要素的位置, 再将平面图以 .sat 的格式导入 GAMBIT 软件进行模型三维建立和优化. 利用便携式手持 JC-M9 粉尘监测仪搭配希玛 AT816 风速仪结合沈阳地区风玫瑰图, 对沈阳建筑大学庭院 6、7、8 月的气象要素进行监测记录, 以获得 PM_{2.5} 质量浓度、平均温度、平均风速、主导风向的数据. 将监测的背景质量浓度作为数值模拟的来源(见表 3).

表3 模拟的重要气象要素参数

Table 3 Important meteorological parameters for simulation			
平均温度/℃	平均风速/(m·s ⁻¹)	平均气压/kPa	风向
26.78	3	101.13	南向

在计算域的选择上, 以保证气流的充分循环流动为原则, 模型最外围距离计算域的边界通常需要大于建筑高度的 3 倍. 而计算域的顶部距离建筑顶部大于建筑高度的 5 倍^[16]. 通过反复实验和计算得符合沈阳建筑大学单个庭院尺度模拟的计算域长宽高为 600 m×600 m×100 m 的长方体空间, 计算域能够满足气流的循环流动. 在求解模型方面,

选择标准 $k-\xi$ 两方程模型, 此模型应用范围广、精度合理是最常采用的求解模型^[17].

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟结果验证

笔者模拟时设置 2018-06-28T 14:00 时的实测当日气象条件即晴天, 温度为 26.78℃, 风速为 3 m/s, 主导风向为南风. 在庭院内任选 9 个监测点, 将监测的 PM_{2.5} 质量浓度与相应位置的模拟数据对比(见图 5).

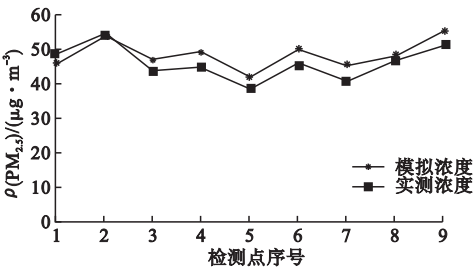


图5 模拟与实测质量浓度对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured mass concentration

从图 5 可以看出, 在相同位置处实地监测数据和数值模拟数据的 PM_{2.5} 质量浓度无显著差异, 能够满足模型模拟精度, 可认为模拟有效.

2.2 植物不同空间布局与不同尺度模拟分析

在成人呼吸高度 $h=1.5$ m, 山楂、白蜡、新疆杨, 三角状布局和条带状布局的 PM_{2.5} 水平空间的扩散模拟对比如图 6、图 7、图 8 所示.

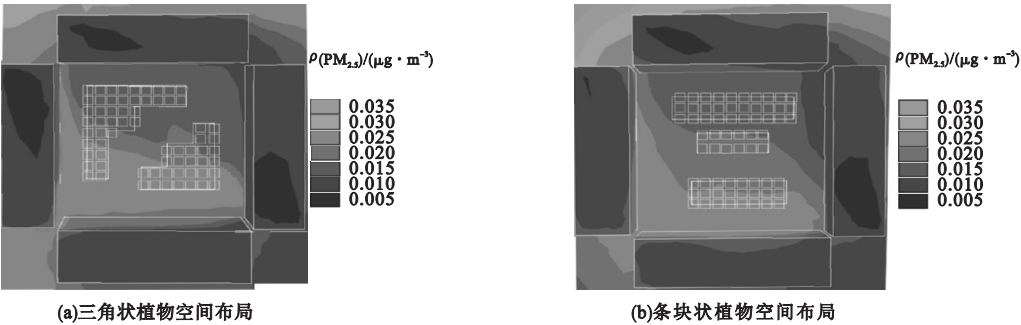


图 6 山楂不同布局的模拟对比

Fig. 6 Simulated contrast diagram of *Crataegus pinnatifida* Bunge. with different layouts

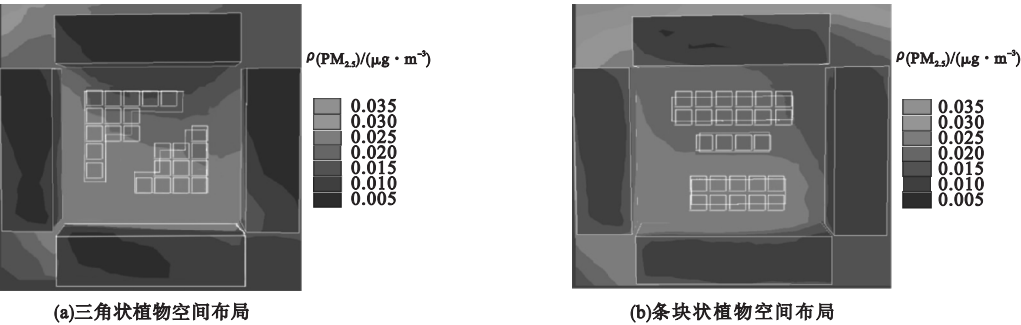


图 7 白蜡不同布局的模拟对比

Fig. 7 Simulated contrast diagram of *Fraxinus chinensis* Roxb. with different layouts

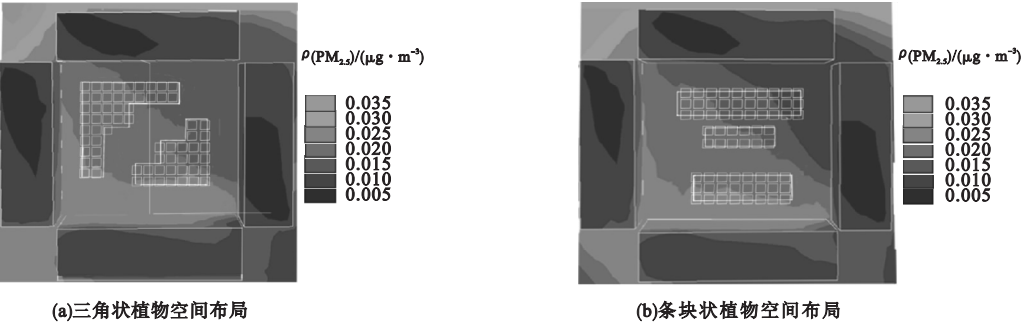


图 8 新疆杨不同布局的模拟对比

Fig. 8 Simulated contrast diagram of *Populus alba* var. *pyramidalis* Bge. with different layouts

2.2.1 植物不同空间布局模拟分析

保持植物尺度、种植面积、乔木绿量不变,仅改变植物空间布局形式,对所得 PM_{2.5} 水平空间的扩散图像进行分析. 植物空间布局形式三角状(见图 6(a)、见图 7(a)、见图 8(a))的庭院,其内部 PM_{2.5} 质量浓度均大于条带状布局(见图 6(b)、见图 7(b)、见图 8(b))形式的庭院. 原因是与围合庭院的教学楼东西两侧一层架空结构有关. 模拟空间内部的底端空气和外部气流主要通过东、西侧通透的一层进行交流. 当日实测气象条件

的主风向由南向北流动,当携带污染物的气流在风力作用下,首先会遇到北侧实体教学楼的阻挡,此时气流发生攀升越过楼体从上方流入庭院. 由于三角状的植物空间布局沿庭院内部对角线展开,植物组团在东南西北 4 个方向上均对气流造成阻挡,致使流入庭院内部的大部分颗粒污染物在庭院内发生沉降滞留. 相较于三角状的植物空间布局形式,条带状的植物空间布局平行于南北侧教学楼,垂直于东西侧教学楼,此种方式下,气流能够由东西侧流出,没有植物组团的阻挡,与

植物能够较少发生摩擦,所以沉降的颗粒物数量也会较少.3种植物的模拟结果均表明,就现状模拟条件下在1.5 m截面内植物条带状的空间布局对沈阳建筑大学庭院内 $PM_{2.5}$ 的扩散是有优势的.在研究植物对 $PM_{2.5}$ 扩散的影响时,一方面需考虑植物自身对污染颗粒物的阻滞,还需要考虑植物组团的空间布局形式对空气污染物扩散的影响.

2.2.2 植物不同尺度模拟分析

保持植物空间布局形式、种植面积、乔木绿量不变,仅改变植物尺度,对比图6(a)、7(a)、8(a)与6(b)、7(b)、8(b),无论植物是三角状空间布局还是条带状空间布局,3种植物尺度下的 $PM_{2.5}$ 质量浓度由大到小的排序均是白蜡、山楂、新疆杨.原因是不同的植物尺度对 $PM_{2.5}$ 在空气中扩散的影响程度是不同的.白蜡木冠层致密、叶子较小且叶与叶之间的孔隙度小、分枝点较低,气流不易流通.当携有污染物的气流在庭院内流动时,宽大的冠幅、密实的枝叶会对气流的扩散产生较强烈的阻力作用,致使颗粒污染物发生沉降的同时也极大降低了风速,造成颗粒物的

滞留使得庭院内部 $PM_{2.5}$ 浓度高.山楂多为亚乔,树高和冠幅均比一般大乔低,其相应的分枝点也较低.结合实际树形,在 $h=1.5\text{ m}$ 截面内白蜡的枝叶量虽少于低矮的山楂,但白蜡叶小密实度大且截面面积远大于山楂,所以当气流流经山楂的组团时,树木对气流的阻滞能力相比白蜡要低,更有利于庭院内部颗粒污染物的扩散,使得其 $PM_{2.5}$ 的质量浓度小于山楂.新疆杨的冠幅小树的高度高、枝下分枝点也高.相较山楂,在 $h=1.5\text{ m}$ 截面内,新疆杨无树冠,而山楂的枝叶量远大于此截面下新疆杨的枝叶量,且新疆杨的截面面积也小于山楂,所以,新疆杨更易于气流流通, $PM_{2.5}$ 浓度低于山楂.因此,在 $h=1.5\text{ m}$ 截面下,以山楂、白蜡、新疆杨为代表的不同植物尺度对 $PM_{2.5}$ 消减作用由高到低的排序为新疆杨、山楂、白蜡.

2.3 不同垂直高度模拟分析

选取每层楼成人呼吸的高度作为研究庭院不同垂直高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度的代表高度,分别为 $h=1.5\text{ m}$ 、 $h=5\text{ m}$ 、 $h=11\text{ m}$ 、 $h=15\text{ m}$ 、 $h=21\text{ m}$.3种植物的树冠特征的模型如图9所示.

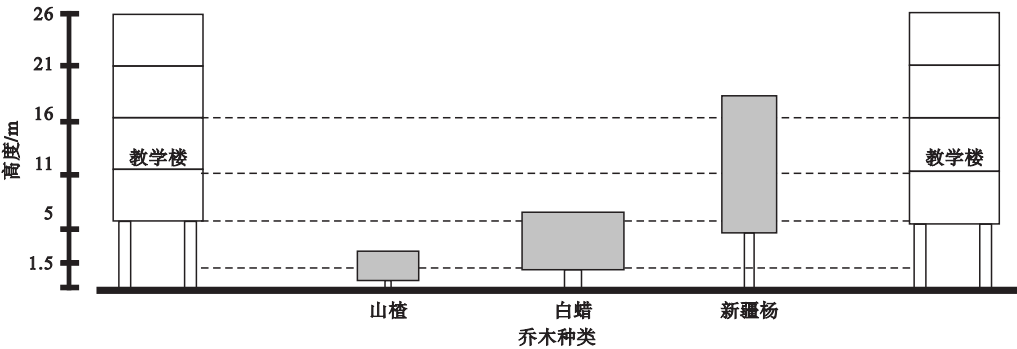


图9 庭院不同垂直高度植物示意图

Fig.9 Schematic map of different vertical heights in courtyard

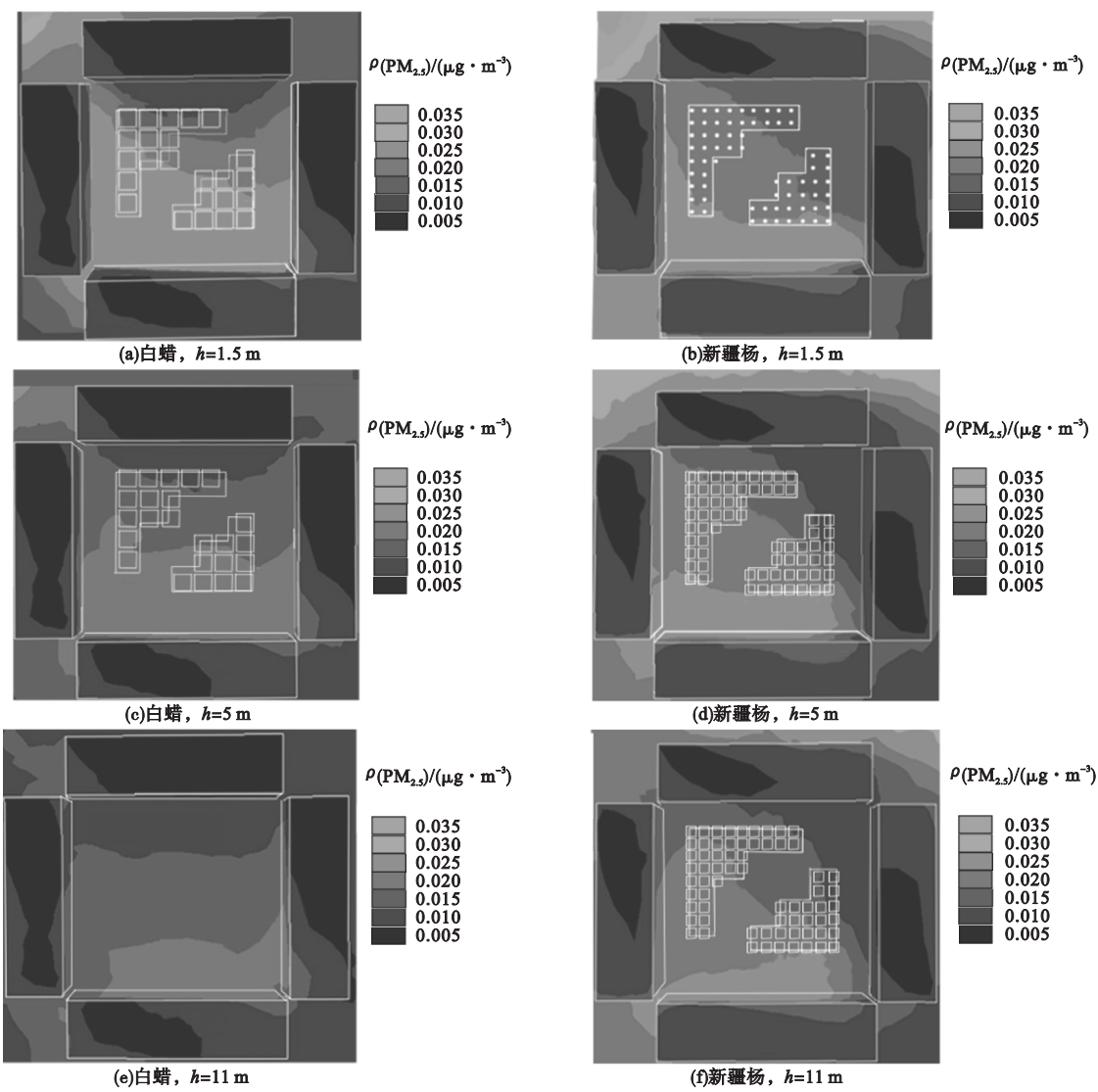
因山楂的植物高度较低,不利于探究较高处植物对 $PM_{2.5}$ 扩散的影响,所以笔者只对白蜡和新疆杨两种植物进行模拟(见图10).从图10可以看出,1.5 m高度下是污染物质量浓度最高、是污染物扩散最为连续的高度. $PM_{2.5}$ 质量浓度随高度的增高而逐渐降低.其中图10(a)、图10(c)、图10(e)、

图10(g)、图10(i)是种植白蜡的模拟结果.①在 $h=1.5\text{ m}$ 截面内,白蜡底部枝叶量少,对气体颗粒物扩散影响力弱,有利于扩散,但是此截面高度最为接近污染源,初始质量浓度高加之扩散距离短,过程中因自重发生的沉降少,所以到达此截面时质量浓度依然保持较高数值.②在 $h=5\text{ m}$ 截面内,主要截得

白蜡的冠部枝叶量大,不利于颗粒物扩散,但此截面距离污染源比 $h = 1.5\text{ m}$ 截面远,初始浓度相对较低,所以 $h = 5\text{ m}$ 截面的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小于 $h = 1.5\text{ m}$ 截面. ③在 $h = 11\text{ m}$ 、 $h = 15\text{ m}$ 、 $h = 21\text{ m}$ 高度截面内无植物影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值的差异主要与距离污染源的远近有关.

图 10 (b)、图 10 (d)、图 10 (f)、图 10(h)、图 10(j)是新疆杨的模拟结果. ①在 $h = 1.5\text{ m}$ 截面内,新疆杨主要依靠树干影响颗粒物扩散,影响力小,但是该截面离污染源最近,所以 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最大. ②在 $h = 5\text{ m}$ 、 $h = 11\text{ m}$ 、 $h = 15\text{ m}$ 截面内均依靠新疆杨的枝叶影响扩散,影响力远大于树干,但

是 3 种高度的截面与污染源的 距离均大于 $h = 1.5\text{ m}$ 截面,所以 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均小于 $h = 1.5\text{ m}$ 截面. 此外,因截面内植物的影响可认为相同,唯一区别就是距离污染源的远近,随着截面高度的不断升高,与污染源的 距离逐渐增加,到达较高位置处所需的扩散时间也就越久,期间颗粒物因自重发生的沉降也就越多,到达目标截面时流体中所携带的 $\text{PM}_{2.5}$ 也就越少,所以 3 个截面下的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也逐渐降低. ③在 $h = 21\text{ m}$ 时,此截面高度下,离污染源距离最远,且无植物阻滞,颗粒污染物随气流的扩散效果最好,其 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度也就最小.



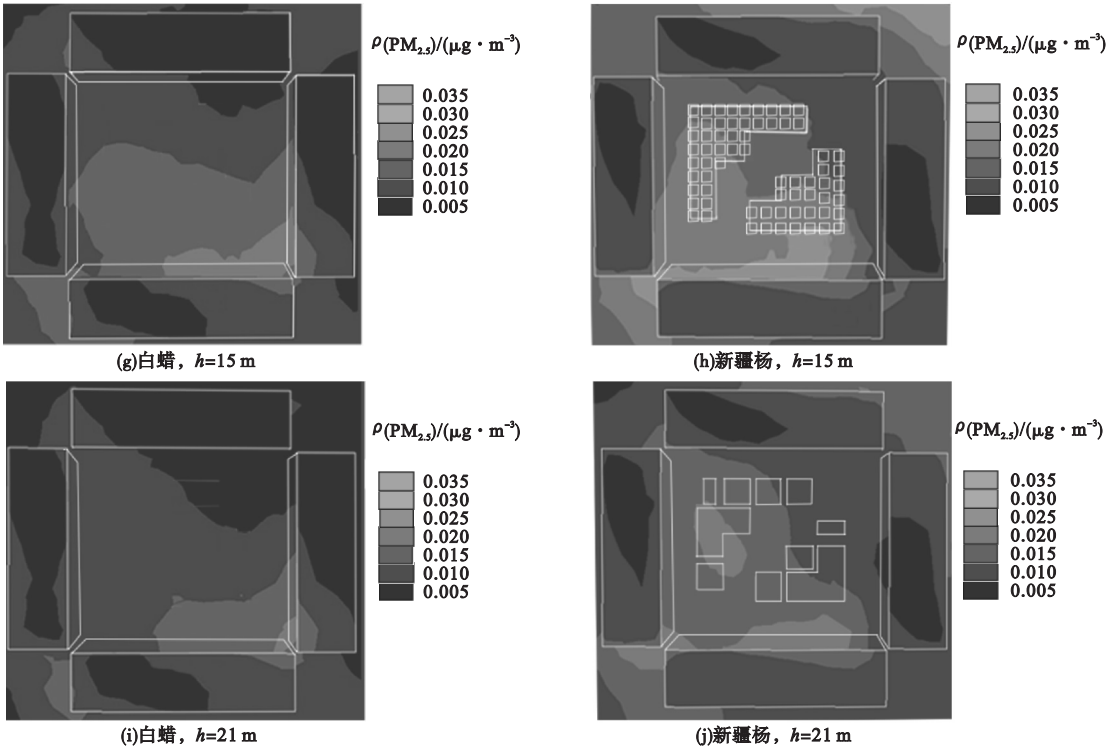


图 10 白蜡和新疆杨不同垂直高度下 $PM_{2.5}$ 质量浓度

Fig. 10 Mass concentration of $PM_{2.5}$ at different vertical heights of *Fraxinus chinensis* Roxb. and *Populus alba* var. *Pyramidalis* Bge.

根据图 10 也可得出,在污染物质量浓度分布区域方面,随着截面高度的增加,分布区域由最开始大面积的高浓度连续区域变为线段式分布,继而线段式分布状态开始逐渐减少,最终会呈现局部点状或斑状分布。

3 结 论

(1) $PM_{2.5}$ 的扩散与植物的空间布局形式和植物尺度有着密切的相关. 在基于颗粒物扩散的植物配置方案设计时,应结合场地现状,从植物空间布局和植物尺度两方面考虑种植方案,筛选扩散效果良好的设计,从而改善区域空气质量。

(2) 沈阳建筑大学庭院内东、西两侧教学楼一层架空的环境,垂直高度为 1.5 m 时,植物选用条带状布局形式的庭院内部 $PM_{2.5}$ 的浓度低于植物选用三角状布局的庭院。

(3) 相同植物空间布局形式下,对 $PM_{2.5}$ 消减能力由高到低的排序为新疆杨,山楂,白蜡。

(4) $PM_{2.5}$ 浓度的垂直分布上,符合污染物浓度在距离污染源较近处浓度高的规律. $PM_{2.5}$ 颗粒在扩散过程中,其质量浓度与距离污染源的远近成反比. 此外当流体遇到植物阻滞时,流动的速度也会降低,从而会进一步导致 $PM_{2.5}$ 颗粒的沉降和积聚,造成局部质量浓度高的现象。

参考文献

[1] 李绥,朱蕾,石铁矛,等. 城市街区可吸入颗粒物污染防治规划策略[J]. 城市发展研究, 2014(1) : 42 - 45.
(LI Sui,ZHU Lei,SHI Tiemao,et al. Planning strategy for prevention and control of particulate matter pollution in urban blocks [J]. Urban development research, 2014 (1) : 42 - 45.)
[2] 雷雅凯,段彦博,马格,等. 城市绿地景观格局对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 分布的影响及尺度效应[J]. 中国园林,2018(7) : 98 - 103.
(LEI Yakai, DUAN Yanbo, MA Ge, et al. Influence of urban green space landscape pattern on $PM_{2.5}$ and PM_{10} distribution and scale effect [J]. Chinese garden, 2018 (7) : 98 - 103.)

- [3] LIACOS J W, KAM W, DELFINO R J, et al. Characterization of organic, metal and trace element PM_{2.5} species and derivation of freeway-based emission rates in Los Angeles, CA[J]. Science of the total environment, 2012, 435/436:159-166.
- [4] 刘志丹,樊鹏飞,段明辉,等.基于观测数据空间化的北京市 PM_{2.5} 时空分异[J]. 环境工程, 2016, 34(3):80-85.
(LIU Zhidan, FAN Pengfei, DUAN Minghui, et al. Spatial and temporal differentiation of Beijing PM_{2.5} based on spatialization of observation data [J]. Environmental engineering, 2016, 34(3):80-85.)
- [5] 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[J]. 生态学报, 2016, 36(5):1391-1399.
(CHEN Bo, LU Shaowei, LI Shaoning. Changes of PM_{2.5} concentration in different urban weather conditions in Beijing urban forests[J]. Journal of ecology, 2016, 36(5):1391-1399.)
- [6] 陈芳,周志翔,郭尔祥,等.城市工业区园林绿地滞尘效应的研究:以武汉钢铁公司厂区绿地为例[J]. 生态学报, 2006(1):34-38.
(CHEN Fang, ZHOU Zhixiang, GUO Erxiang, et al. Study on the dust retaining effect of garden green space in urban industrial area: taking the green space of wuhan iron and steel company as an example [J]. Journal of ecology, 2006(1):34-38.)
- [7] 屈海燕,陆秀君.沈阳市3条街道绿带 PM₁₀、PM_{2.5} 浓度特征及影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4):57-62.
(QU Haiyan, LU Xiujun. Analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration characteristics and influencing factors in green belt of three streets in Shenyang city [J]. Journal of northwest forestry university, 2017, 32(4):57-62.)
- [8] 张晶晶,邹慧芬,李绥,等.树木作为多孔介质吸附颗粒物的模拟研究[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(8):20-22.
(ZHANG Jingjing, ZOU Huifen, LI Sui, et al. Simulation study on the adsorption of particles by trees as porous media [J]. Construction technology development, 2016, 43(8):20-22.)
- [9] 杨李宁,毛伟,付祥钊.基于通风网络模型的自然通风效果评价方法研究:以重庆某办公楼为例[J]. 制冷与空调, 2015, 15(3):6-12.
(YANG Lining, MAO Wei, FU Xiangzhao. Research on evaluation method of natural ventilation effect based on ventilation network model: taking an office building in Chongqing as an example [J]. Refrigeration and air conditioning, 2015, 15(3):6-12.)
- [10] 周媛,初亚奇,石铁矛,等.基于 CFD 对沈阳不同绿地景观格局大气环境效应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3):529-537.
(ZHOU Yuan, CHU Yaqi, SHI Tiemao, et al. Analysis of atmospheric environment effect of different greenland landscape patterns in Shenyang based on CFD [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2016, 32(3):529-537.)
- [11] 郭振宇.城市街道峡谷内机动车尾气排放的 PM_{2.5} 的对流扩散规律研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2013.
(GUO Zhenyu. Study on convective diffusion law of PM_{2.5} of motor vehicle exhaust in urban street canyon [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2013.)
- [12] MCNABOLA A, BRODERICK BM, GILL L W. A numerical investigation of the impact of low boundary walls on pedestrian exposure to air pollutants in urban street canyons [J]. Science of the total environment, 2009, 407(2):760-769.
- [13] GROMKE C, JAMARKATTEL N, RUCK B. Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons [J]. Atmospheric environment, 2016, 139:75-86.
- [14] 林波荣.绿化对室外热环境影响的研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
(LIN Borong. Study on the impact of greening on outdoor thermal environment [D]. Beijing: Qinghua University, 2004.)
- [15] 梁朋云.树木对建筑小区风环境影响的模拟研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2011.
(LIANG Pengyun. Simulation study on the influence of trees on the wind environment of building communities [D]. Handan: Hebei Engineering University, 2011.)
- [16] 韩沐辰. CFD 在绿色建筑室外风环境评价中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
(HAN Muchen. Application research of CFD in green building outdoor wind environment assessment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [17] HUANG H, AKUTSU Y, ARAI M, et al. A two dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis [J]. Atmospheric environment, 2000, 34(5):689-698.
- [18] 宋汶娟.基于 CFD 理论的建筑风环境研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2017.
(SONG Wenjuan. Research on building wind environment based on CFD theory [D]. Handan: Hebei Engineering University, 2017.)
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)