

聚焦树木特征及气象因素：城市街道峡谷风环境与污染物扩散的数值模拟剖析

高瑞泽, 赵磊*, 毕真, 杨洋, 刘志华

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年1月14日; 录用日期: 2025年5月10日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

在全球城市化进程加速的背景下, 城市热岛效应加剧、能源需求增长, 同时室外空气质量下降成为城市面临的严峻挑战。城市绿色基础设施中的道路绿地对改善城市环境有重要意义, 本研究聚焦于树木影响下城市街道峡谷内风环境与污染物扩散的问题。通过对道路及绿带类型进行系统归类, 以实地监测和数值模拟为研究手段, 详细分析相关研究中的污染物浓度指标、植物特征因子(如叶面积密度、植树布局、树冠形状等)及其他影响因子(气象因素等)。全面总结道路绿地对局地污染扩散的影响规律, 发现现有研究存在树木特性描述不准确、模型参数复杂且需不断修正、多因素叠加效应研究不充分、叶片微观结构对污染物减少影响研究少等问题。基于此, 明确未来研究应拓展研究对象, 综合考虑多种生态过程, 融合实地监测与数值模拟方法, 提高数据的精度和丰富度, 为优化城市街道峡谷树木种植、改善城市空气质量提供科学依据。

关键词

城市绿色基础设施, 数值模拟, 污染物浓度

Focusing on Tree Characteristics and Meteorological Factors: An Analysis of Numerical Simulations of Wind Environment and Pollutant Diffusion in Urban Street Canyons

Ruize Gao, Lei Zhao*, Zhen Bi, Yang Yang, Zhihua Liu

College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

*通讯作者。

文章引用: 高瑞泽, 赵磊, 毕真, 杨洋, 刘志华. 聚焦树木特征及气象因素: 城市街道峡谷风环境与污染物扩散的数值模拟剖析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 862-867. DOI: 10.12677/aep.2025.155097

Abstract

With the acceleration of global urbanization, the urban heat island effect has intensified, energy demand has increased, and the decline in outdoor air quality has become a severe challenge for cities. Road green spaces in urban green infrastructure are of great significance for improving the urban environment. This study focuses on the issues of the wind environment and pollutant diffusion in urban street canyons under the influence of trees. By systematically categorizing the types of roads and green belts, and using on-site monitoring and numerical simulation as research methods, this study analyzes in detail the pollutant concentration indicators, plant characteristic factors (such as leaf area density, tree planting layout, crown shape, etc.) and other influencing factors (meteorological factors, etc.) in relevant research. The impact of road green spaces on local pollution diffusion is comprehensively summarized. It is found that existing studies have problems such as inaccurate description of tree characteristics, complex model parameters that need to be continuously corrected, insufficient research on the superposition effects of multiple factors, and few studies on the impact of leaf microstructures on pollutant reduction. Based on this, it is clear that future research should expand research objects, comprehensively consider multiple ecological processes, integrate on-site monitoring and numerical simulation methods, improve the accuracy and richness of data, so as to provide a scientific basis for optimizing tree planting in urban street canyons and improving urban air quality.

Keywords

Urban Green Infrastructure, Numerical Simulation, Pollutant Concentration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

种植历程和经验表明,温室运行能耗是制约其生产效益和快速发展的瓶颈[1][2],如何解决能耗成本和热环境条件是温室产业发展的关键,因此研究开发新型蓄热加温技术,充分利用可再生的太阳能,提高能源利用率,实现温室热环境低成本调控,成为该领域的目标。随着新能源利用和节能技术的研究,相变储能材料和相变储能技术逐渐映入眼帘,被认为是最有潜力的储能方式[3][4],为解决温室高能耗问题提供一种新途径[5]。

本文综述了太阳辐射技术在温室中的应用,国内外关于温室相变储能技术的相关研究现状及对热环境调控的应用效果,由于温室独特的外形和建筑构造形式,相变储能材料多应用于温室墙体、温室内部及相变储能系统。相关应用研究在国外起步较早,无论是有机相变材料还是无机相变材料,各国学者都进行了广泛和深入的研究。

2. 树木的特征因素

树木对街道峡谷中气流和污染物扩散的影响包括叶面积密度、植树布局、树冠形状、树冠树干和树干是否连续等因素。显示了从一些研究中得出的调查因素。

研究人员[6][7]认为,局部气流的变化和街道上污染物的分布不能被忽视,这与大多数认为树枝直径

较小,在数值模拟研究中可以被忽略的研究不同。树木的形状对风场的阻尼效应有重要的影响。越来越多的研究对树冠的形状进行了细化,将其从原来的矩形形状改为其他规则形状(如圆形、三角形和圆锥体),直到它们能够粗略地描述树木的不规则形状。最后,树木的叶面积密度是一个重要的研究因素。在更准确地描述树木时,一些学者采用了叶面积密度曲线,考虑了叶面积密度随树高的变化。根据不同的叶面积密度来描述叶片密度,通常可以区分不同季节树木的影响[8][9]。

2.1. 树冠特征

树冠(叶)是树木生长和其他功能结构的基础。树冠的存在影响了街道[10]中的污染物浓度和气流。一般来说,实际树木的冠形具有显著的特征,主要取决于树木[11][12]的遗传特征和环境因素。气流在建筑物上方被剪切后,进入街道峡谷,在那里,由于树冠上的树叶的阻尼作用,空气以较低的速度流动。

Gromke 等人通过实验或数值模拟方法[13],探讨了树木对街道峡谷内风环境和污染物分布的影响。结果表明,圆柱形圆冠的形状直接影响其对气流的阻力效应,因此,污染物的扩散行为和圆柱形圆冠对降低 PM_{2.5} 的能力最好。然而,现有研究在树冠特征方面仍存在不足。多数研究在数值模拟时,往往忽略树冠实际特征,如叶片分布和实际冠形状的差异[14]-[16]。在树枝和树干中,不同的树种(凤凰树和斑毛树)的叶片分布不均匀和不连续,冠的宽度、体积和外部冠的形状也非常不同。因此,有必要进一步优化现有的植被阻力源模型,以预测或评价真实树木影响下街道峡谷内的风环境和污染物分布。他们认为,树冠特征(形状、大小和叶面积密度)的变化会影响到空气流量的分布。Qin [17]等通过拟合得到了树木的等高线曲线,并进一步分析了五种常见树木对大气颗粒扩散的影响。结果表明,银杏叶和中国叶有效地降低了行人高度的颗粒浓度。二者研究角度有所不同,这反映出在树冠特征影响研究中,既有对普遍规律的探索,也有对实际应用中具体树种效果的关注。

2.2. 树的布局

风环境和城市街道中污染物的扩散也取决于各方面的相互作用。其中一个更明显的影响是树的布局(树的密度)。从理论上讲,城市街道上的树木种植着非常不同的布局,包括树木的行数、树木之间的不同间距,以及不同的树种。这些因素影响了对城市街道峡谷中风环境和污染物分布的准确预测[2][5]。

Huang 等[18]研究了树冠对不同高度街道峡谷气流的影响。结果表明,高于建筑物的树冠可以有效地提高街道峡谷内的空气交换率。所以,街道峡谷中的污染物浓度很低。Wang 等人通过数值模拟研究了(主要)交错树枝[19]。Lin 等人通过数值模拟研究了典型的深街峡谷中树木的空间分布。研究发现,不均匀的树木布局方案,特别是街道中间没有种植树木的情况,可以有效减少两端街道的“风口效应”和中间街道的“风影效应”,从而改善街道峡谷中的风环境,提升行人的呼吸空气质量。Cui 等人认为,街道峡谷中绿化带数量的增加可以显著降低环境空气温度,但会降低街道峡谷中的平均空气流速,导致污染物浓度增加[20]。吴等人利用数值模拟的方法研究了韩国釜山的街道。街道宽度、方向和峡谷纵横比的变化对小气候和热舒适指数的影响更为显著,树木高度对街道环境的影响比其他树木配置因素更为显著。王等。通过数值模拟发现,植被与建筑物的间距对 PM_{2.5} 浓度分布有显著影响;均匀分布的树木对 PM_{2.5} 浓度的降低影响最小。Moayed 等人。讨论了树的布局。研究发现,在街道中心种植的树木比两排种植的树木对空气质量的改善更大,尤其是两排种植较高的树木使空气质量恶化了 10% [21]。张等人[14]给出了数值模拟结果,进一步证实了 Moayed 报告的结果。此外,树木的布局还会影响污染物浓度的分布和气温的分布。街道上的树木越多,对降低温度就越有利[22]。这些研究从不同维度探究树的布局影响,涵盖了树冠高度、空间分布、数量、与建筑物间距以及种植排数等多个方面,但各研究之间缺乏统一的标准和对比框架,难以直接判断不同布局因素在综合环境下的权重和相互作用关系。目前关于树的布局研究存在

局限性。一方面,不同研究的实验条件和模拟参数差异较大,导致研究结果难以直接比较和整合。例如,部分研究在理想化的街道模型中进行,与实际城市街道的复杂性相差甚远;另一方面,多数研究仅考虑单一或少数几个布局因素,忽略了多因素之间的协同或拮抗作用。在实际城市环境中,树的布局往往是多种因素共同作用的结果,这种简化的研究方式限制了对树布局影响的全面理解,不利于为城市规划提供精准有效的指导。

3. 气象因素对绿植影响

3.1. 热环境

热环境街道峡谷的热环境影响着人体的热感和舒适度。同时,树木可以改善街道峡谷的热环境,降低人行道的风速[23]。现有的野外测量和研究表明,复杂的树冠可以防止太阳辐射到达地面,从而减少地面的蓄热效应。更重要的是,截获的能量增加了潜热通量,降低了气温,不同树种对空气温度梯度[24][25]有不同的影响。

Gu 等[26]将大涡模拟与植被阻力模型和热源模型耦合,提出了城市灌木丛街道峡谷风场的热动力学数学模型。仿真结果表明,与裸露的街道峡谷相比,引入植被的街道峡谷能减弱强度循环风场,减少顶部污染物的位移率,并在背风和迎风的绿色街道峡谷附近增加污染物浓度。同时研究了不同树木对街道峡谷热环境的影响。他们认为,叶面积指数、树高和树干高是改善或加剧街道热环境的主要控制因素。Zhou 等人[17]研究了在街道峡谷中存在树木时的气流特征。研究发现,植树后,街道峡谷内的风速不同程度地降低,在一定程度上提高了不合理的极端风速;植物对降低风速、稳定流场、提高行人区舒适性具有重要意义;植树可降低建筑物周围风速、墙体对流传热和建筑能耗。然而,不同树种的形态特征对太阳辐射具有不同的衰减能力,因此在调节热舒适性和提高污染物浓度方面的潜力也不同。此外,树木对建筑物的阴影作用引起的建筑物表面温度变化有助于降低行人和行人的辐射负荷。

在温室内部悬挂、内置相变材料能够降低室内温度波动,提升蓄热能力,相关研究均取得了较好的应用效果。温室内部空间较大,除立体式种植外,普通种植栽培温室空余空间较大,为相变储能技术的应用提供了空间位置,可在温室内部悬挂、地面摆放封装的相变材料。

3.2. 风速和风向

风洞实验和现场测量发现,风速和方向会影响街道污染物的扩散。随着风速的增加,树木的阻力降低,污染物在大气中的扩散更加强烈[27];相反,在较低的风速下,空气动力学效应更关键,导致湍流色散[10]。风向直接导致了街道上污染物浓度的显著变化,特别是当风是平行的时,而树木的影响占主导地位的[3]。与没有树的街道峡谷不同,当街道垂直于街道的风向时,街道上的污染物浓度就会更高。当有树木时,平行于街道的风向有利于污染物的扩散,而垂直于街道的风向为弱[4][24]。

胡塞因扎德等人对考虑到树木的城市地区空气质量进行了研究,发现降低入口风速可以增加污染物[28]的浓度。Zhang 等人以路边植被和街道峡谷为研究对象。他们根据每个调查区域的区域平均标准化 PM 浓度,评估了植被对污染物的影响。结果表明,在三个风向[29]中,垂直风的植被影响最好,而斜风的植被影响最差。在不对称的街道峡谷中,当风向垂直于街道时,由于两侧建筑物高度的不同,将会有上下起伏的台阶。树木的存在会干扰气流,增加污染物浓度[26]的峰值和分布。现有研究大多基于简化的气象条件,难以真实反映实际情况。另一方面,研究中对树木与风速、风向之间的相互作用机制探讨不够深入,仅停留在现象描述层面,缺乏对微观物理过程和流体力学原理的深入分析,不利于准确预测和有效控制污染物扩散。

4. 结论与展望

通过数值模拟研究树木影响下城市街道峡谷中风环境和污染物扩散的研究较为成熟。现有的树描述数学模型可以描述一些树的特征。目前的研究在指导城市街道峡谷树木种植方面仍存在诸多困难，主要是因为(1) 未能准确描述树木特性限制了数值模拟中反映树种差异的能力；(2) 数学模型的相关参数比较复杂，特别是需要根据试验或现场测量来确定阻力系数和叶面积密度，湍流模型中包含的经验参数仍需不断修正；(3) 街道峡谷中多种复杂因素的影响尚未得到充分的研究，包括热、化学、生物学、风向、树种等因素的叠加效应；(4) 关于叶片表面微观结构对污染物减少的影响的研究较少。

未来的研究重点是(1) 实际情况下的数值模拟，包括自然街道峡谷形态、自然气象条件、树种差异等，(2) 在数学模型中进一步考虑树木的污染物沉降、去除、热效应，使数值模拟能够完全描述树木对街道峡谷污染物分布、分散和吸收过程的影响。

参考文献

- [1] 孙心心, 邹志荣, 王宏丽. 新型复合相变墙温室性能实测分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 168-170.
- [2] Lin, J., Kroll, C.N., Nowak, D.J. and Greenfield, E.J. (2019) A Review of Urban Forest Modeling: Implications for Management and Future Research. *Urban Forestry & Urban Greening*, **43**, Article 126366. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126366>
- [3] Abhijith, K.V. and Gokhale, S. (2015) Passive Control Potentials of Trees and On-Street Parked Cars in Reduction of Air Pollution Exposure in Urban Street Canyons. *Environmental Pollution*, **204**, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.013>
- [4] Buccolieri, R., Santiago, J., Rivas, E. and Sanchez, B. (2018) Review on Urban Tree Modelling in CFD Simulations: Aerodynamic, Deposition and Thermal Effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, **31**, 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.003>
- [5] Yang, H., Chen, T., Lin, Y., Buccolieri, R., Mattsson, M., Zhang, M., *et al.* (2020) Integrated Impacts of Tree Planting and Street Aspect Ratios on CO Dispersion and Personal Exposure in Full-Scale Street Canyons. *Building and Environment*, **169**, Article 106529. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106529>
- [6] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., *et al.* (2008) AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, 1749-1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- [7] Anderson, E., Veeravalli, S.V. and Fischer, P.F. (2012) Anisotropic Adaptive Simulation of Turbulent Flows around Complex Geometries. *Computational Physics*, **49**, 1701-1707.
- [8] OpenCFD and OpenFOAM. (2011) <https://www.openfoam.com/>
- [9] Ansys (2009) Ansys Fluent 12.0 Theory Guide. ANSYS, Inc.
- [10] CD-Adapco (2013) User Guide, STAR-CCM+Version 7.04. CD-Adapco.
- [11] Envi-Met (2018) Envi-Met, Basics of Envi-Met Model. <https://www.envi-met.com/>
- [12] Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P.O. and Petrova-Antonova, D. (2022) Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. *Atmosphere*, **13**, Article 1640. <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>
- [13] Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S. and Ruck, B. (2008) Dispersion Study in a Street Canyon with Tree Planting by Means of Wind Tunnel and Numerical Investigations—Evaluation of CFD Data with Experimental Data. *Atmospheric Environment*, **42**, 8640-8650. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.019>
- [14] Sun, D. and Zhang, Y. (2018) Influence of Avenue Trees on Traffic Pollutant Dispersion in Asymmetric Street Canyons: Numerical Modeling with Empirical Analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **65**, 784-795. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.014>
- [15] Luo, X.L. and Gu, Z.L. (2007) Study of Aerosol Dispersion in Urban Street Canyon Based on DPM Model. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, **24**, 578.
- [16] Tan, Z., Dong, J., Xiao, Y. and Tu, J. (2015) Numerical Simulation of Diurnally Varying Thermal Environment in a Street Canyon under Haze-Fog Conditions. *Atmospheric Environment*, **119**, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.034>
- [17] Zuo, L., Zhou, T., Xu, C., Chen, S., Chen, Y. and Liu, S. (2022) Research on PM10 Diffusion and Distribution of Moving

- Vehicle in Street Canyon Based on Dynamic Mesh. *Transportation Engineering*, **10**, Article 100151. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100151>
- [18] Huang, Y., Li, M., Ren, S., Wang, M. and Cui, P. (2019) Impacts of Tree-Planting Pattern and Trunk Height on the Airflow and Pollutant Dispersion Inside a Street Canyon. *Building and Environment*, **165**, Article 106385. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106385>
- [19] Wang, H., Furtak-Cole, E. and Ngan, K. (2022) Estimating Mean Wind Profiles Inside Realistic Urban Canopies. *Atmosphere*, **14**, Article 50. <https://doi.org/10.3390/atmos14010050>
- [20] Cui, D., Li, X., Liu, J., Yuan, L., Mak, C.M., Fan, Y., *et al.* (2021) Effects of Building Layouts and Envelope Features on Wind Flow and Pollutant Exposure in Height-Asymmetric Street Canyons. *Building and Environment*, **205**, Article 108177. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108177>
- [21] Moayedi, S.H. and Hassanzadeh, S. (2022) An LES Study of Aerodynamic Effect of Trees on Traffic Pollutant Dispersion in an Ideal Street Canyon. *The European Physical Journal Plus*, **137**, Article No. 797. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03004-y>
- [22] Lu, K. and Peng, Z. (2023) Impacts of Viaduct and Geometry Configurations on the Distribution of Traffic-Related Particulate Matter in Urban Street Canyon. *Science of The Total Environment*, **858**, Article 159902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159902>
- [23] Xu, W.J., Xing, H. and Yu, Z. (2012) Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon. *Environmental science*, **33**, 532-538.
- [24] Issakhov, A. and Tursynzhanova, A. (2022) Modeling of the Effects of Porous and Solid Barriers along the Road from Traffic Emissions in Idealized Urban Street Canyons. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 60759-60776. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17192-0>
- [25] Issakhov, A., Tursynzhanova, A. and Abylkassymova, A. (2022) Numerical Study of Air Pollution Exposure in Idealized Urban Street Canyons: Porous and Solid Barriers. *Urban Climate*, **43**, Article 101112. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101112>
- [26] Su, J., Wang, L., Gu, Z., Song, M. and Cao, Z. (2019) Effects of Real Trees and Their Structure on Pollutant Dispersion and Flow Field in an Idealized Street Canyon. *Atmospheric Pollution Research*, **10**, 1699-1710. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.07.001>
- [27] Uehara, K., Wakamatsu, S. and Ooka, R. (2003) Studies on Critical Reynolds Number Indices for Wind-Tunnel Experiments on Flow within Urban Areas. *Boundary-Layer Meteorology*, **107**, 353-370. <https://doi.org/10.1023/a:1022162807729>
- [28] Dalir, K.H. and Mahdiyeh, N. (2014) Cultural Considerations in the Identification, Monitoring and Control of Pollution Sources and Its Environmental Impacts on Urban Spaces. 654-661. <http://sjournals.com/index.php/SJR/article/view/1602/0>
- [29] Steffens, J.T., Wang, Y.J. and Zhang, K.M. (2012) Exploration of Effects of a Vegetation Barrier on Particle Size Distributions in a Near-Road Environment. *Atmospheric Environment*, **50**, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.051>