高密度城市中行道树布局方式对街谷风环境的影响

——基于多种街谷高宽比的 CFD 模拟

邓奇睿[1] 崔冬瑾[1] 李利孝[2]

1 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室 深圳大学建筑与城市规划学院 广东深圳 518060
2 深圳大学土木与交通工程学院 广东深圳 518060

摘要：【目的】揭示高密度城市中行道树布局方式对街谷风环境调节效果的情境依赖性及其气动机制，为基于气候适应性的城市行道树规划布局提供理论依据和实践参考。【方法】采用计算流体力学（CFD）方法，构建不同高宽比（H/W）的街谷模型，设置中央单排与两侧双排两种行道树布置形式，比较其对风速分布、行人层通风及建筑表面风压方面的影响差异。【结果】街谷围合度显著影响行道树的风环境调节能力：在 H/W 较低的浅街谷中，中央布置可提升行人层风速；在中等 H/W 条件下，两侧布置能有效平衡风速分布并减弱风压梯度；而在 H/W 较高的深街谷中，建筑遮蔽效应主导气流分布，绿化调节作用有限。【结论】行道树对风环境的调节能力明显受制于街谷高宽比。未来研究可聚焦于多目标耦合优化和模型精细化，并扩大研究尺度至街区，以更好地为高密度城市的绿化设计服务。

关键词：行道树；街谷；高宽比；风环境；绿化布局
DOI：10.12169/zgcsly.2025.07.25.0003

Impact of Street Tree Configuration on Street Canyon Wind Environment in High-Density Cities: A CFD Simulation Based on Various Height-to-Width Ratios

Deng Qirui[1] Cui Dongjin[1] Li Lixiao[2]

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: 【Objective】 This study is to reveal the context-dependent effects and aerodynamic mechanisms of street tree configurations on street canyon wind environment regulation in high-density cities, thereby providing a theoretical basis and practical references for climate-adaptive urban street tree layout planning. 【Method】 Computational Fluid Dynamics (CFD) method is employed to construct street canyon models with different height to width ratios (H/W) and two configuration patterns of street trees, i. e., central single-row and two-sided double-row, are adopted to compare their differential impacts on wind speed distribution, pedestrian-level ventilation, and wind pressure on building surface. 【Result】 The enclosure degree of street canyons significantly influences the street trees' capacity of wind environment regulation. In the shallow street canyons with low H/W level, the central single-row

收稿日期：2025-07-25
* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（52378026）
第一作者：邓奇睿（2000- ），男，硕士生，研究方向为城市绿化抗风与风环境优化。E-mail：2210325094@email.szu.edu.cn
通信作者：崔冬瑾（1987- ），女，博士，副教授，研究方向为绿色生态建筑、建筑环境空气动力学与污染物传播。E-mail：jena.djcui@szu.edu.cn

arrangement can enhance the wind speed at the pedestrian level; under medium H/W conditions, the two-sided double-row arrangement effectively balances the wind speed distribution and reduces the wind pressure gradient; in deep street canyons with relatively high H/W level, the building sheltering effect however dominates the airflow distribution, in which the regulatory role of greening is limited. 【Conclusion】 The street tree's capacity to regulate the wind environment is clearly constrained by the street canyon's H/W. Future research could focus on multi-objective coupled optimization and model refinement, and the research scale could be expanded to the block level, so as to better serve the green space design in high-density cities.

Keywords: street tree; street canyon; aspect ratio; wind environment; green space arrangement

街道作为城市建成环境的重要组成部分，承担着交通运输、商业活动和生态联系等功能，其空间品质直接关系到居民生活质量与城市韧性发展[1-2]。街谷是街道两侧建筑围合所形成的城市峡谷型空间，其内部的空气流动受到建筑体量、街道尺度、绿化设施等多种因素的综合影响[3-5]。街谷高宽比（H/W）是城市街道微气候研究中用于描述街道空间几何特征的一个关键参数，它指的是街道两侧建筑物的平均高度 H 与街道宽度 W 之间的比值，反映了街道空间的围合程度与通风潜力。研究表明，街谷内气流结构的优化不仅有助于提升通风换气效率，降低热岛效应和空气污染浓度，还能增强街道空间的热舒适性与生态安全性[6-8]。

在城市微气候调节因素中，行道树作为城市绿色基础设施的重要组成部分，其生态功能日益受到重视[9-12]。行道树不仅具备遮阴、美化和碳汇等功能，还在改善城市热环境、调节风速、缓解污染物浓度等方面具有显著作用[13-16]。特别是在高密度街区，合适的树种配置与空间布置对提升局地通风、保障行人热舒适性具有关键意义[17-18]。

现有研究多关注城市绿量与热环境、空气质量之间的宏观关联[19]，针对不同行道树布置方式对街谷风环境调节机制的量化研究相对不足。对不同街谷几何条件（如高宽比）下，树木布置对行人层风速分布、建筑表面风压变化等关键微气候指标的影响规律尚未形成系统认知[20-21]。此外，部分研究虽已尝试结合 CFD（computational fluid dynamics）模拟探讨树木对污染扩散的影响，但多数模型简化程度较高，对树木阻力、空间位置等参数考虑不足，难以真实还原建筑-树木复合系统对风环境的影响。

综上，本文以街谷高宽比为变量，系统比较中央单排布置与两侧双排布置两种典型行道树布局方式对街谷风环境的影响。研究拟通过 CFD 数值模拟方法构建多组街谷模型，从风速分布、行人层通风和建筑表面风压等维度出发，揭示树木与建筑之间的耦合作用及其对局地风环境的调节效应，为基于气候适应性的城市行道树规划布局提供理论依据和实践参考。

1 研究方法

1.1 CFD 模型设置与场景构建

本研究基于 Gromke 等[20]的风洞实验构建缩尺比 1∶150 的街谷模型，参考住宅设计规范（GB50096-2011）及民用建筑设计统一标准（GB50352-2019）中对低、中、高层建筑的定义设置建筑高度。基准街道宽度设定为 W = 18 m，该宽度通常对应双向 4 车道的城市支路（每车道宽约 3.5 m）。建筑高度 H 取 9 m、18 m、36 m、54 m、72 m（对应高宽比 H/W = 0.5~4）。为规避边界效应，街道长度 L 满足 L/H ≥ 10。模型包含单排（中央布置）和双排树木方案，单排与双排布置均采用同一种常见行道树种进行简化，树高统一为 12 m，但冠幅宽度在模型中有所区分，主要出于布置位置和空间约束的考虑：单排树木布置在道路中央，无临近建筑物的空间限制，因此采用 9 m 冠幅模拟完全展开的自然状态；而双排树木更贴近道路两侧建筑布置，为避免冠幅与建筑立面重叠，冠幅宽度缩减为 3.6 m，以反映受街道空间围合度约束后的实际冠幅情况。这一设置旨在保持参数的现实合理性，并突出不同布置形式下的气流响应差异（图 1）。

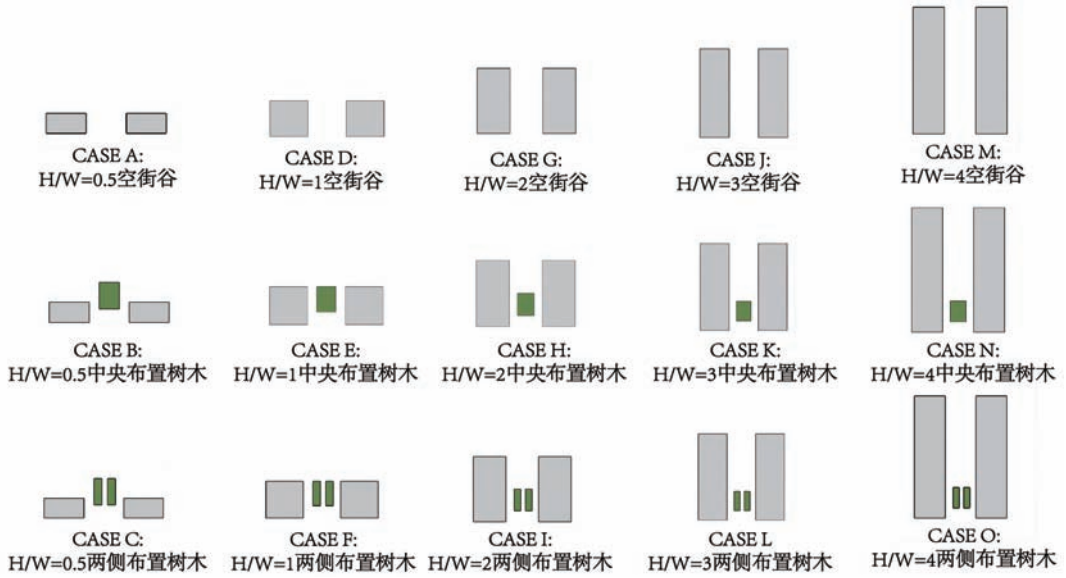


图 1　案例说明

1.2　CFD 网格划分与边界条件

计算域采用结构化六面体网格，总网格数约 30 万。为保证数值模拟精度，网格在关键区域进行局部加密，最小单元尺寸为 $\delta_x = 0.05H$，$\delta_y = 0.5H$，$\delta_z = 0.05H$（H 为缩尺后建筑高度，分别为 0.06 m、0.12 m、0.24 m、0.36 m、0.48 m）。经网格无关性验证后，采用该配置进行后续模拟。计算域根据 Gromke 等[20]的算例进行设置，从入口平面到街谷第一栋建筑的距离为 8H，从域顶部到建筑屋顶的距离为 7H，从流出平面到下游建筑的距离为 30H，计算域示意如图 2 所示。数值计算采用 FLUENT 2022R1 软件，选用标准 k-ε 湍流模型，SIMPLE 算法处理压力-速度耦合。对动量、湍动能与湍流耗散率项采用二阶迎风格式离散，当所有变量残差收敛至 10^{-6}时视为模拟收敛。

根据风洞实验，假设入口风速遵循幂律剖面，表达式如下：

$$U_Z = U_{REF}\left(\frac{Z}{Z_{REF}}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式（1）中：U_Z表示该高度处的风速；U_{REF}表示参考高度处的风速，根据风洞实验的结果 $U_{REF} = 4.7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$；$Z$ 表示该位置的高度；Z_{REF}表示参考高度，为 0.12 m；α 表示粗糙度指数，对应 D 类地貌数值为 0.3。

湍流动能 k 和耗散速率 ε 表达式如下：

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}\left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \tag{2}$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}\left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \tag{3}$$

式（2）（3）中：δ 表示边界层厚度；u_*表示摩擦速度，从风洞平均速度剖面的对数定律曲线拟合中得知速度为 0.52 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$；κ 表示 von Kàrmàn 常数，数值为 0.4；C_μ表示常数，数值为 0.09。

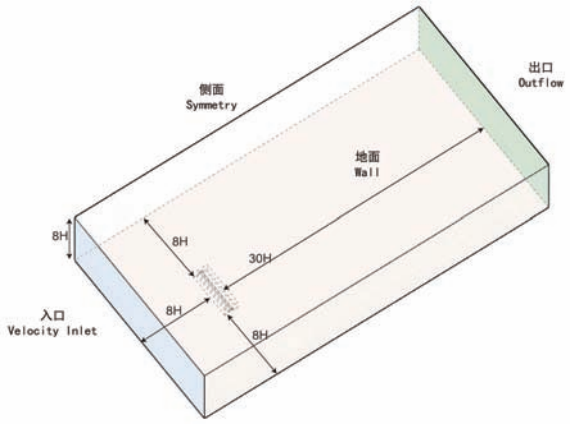


图 2　计算域示意

1.3　树冠多孔介质模型模拟验证

为简化树木复杂结构，本文采用多孔介质模型模拟树冠区的空气阻力特性。基于附加源项法，在动量、湍动能及湍流耗散率方程中引入与叶面积密度（LAD）和速度相关的源项，从而实现对空气流动的耗散表达。动量源项 S_i计算如下：

$$S_i = -\rho C_d LAD U_i U \tag{4}$$

式（4）中：ρ 表示空气的密度（$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$）；

C_d表示叶片阻力系数；LAD 表示叶面积密度（m^{-3}）；U_i表示 i 方向的速度分量（$m \cdot s^{-1}$）；U 表示速度大小（$m \cdot s^{-1}$）。

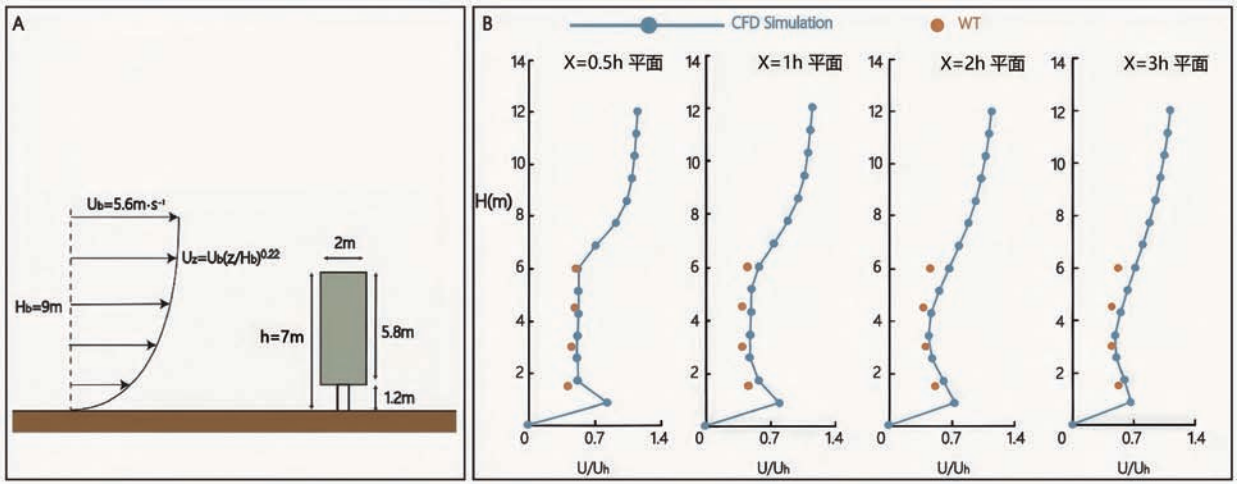
由于气流经过树木时还会产生一定复杂的湍流。考虑树冠对湍流的影响程度，在被简化为多孔介质的树冠层内部的湍动能方程与湍动能耗散率方程中的源项中添入气流对树冠层的影响，表达式如下：

$$S_k = \rho C_d LAD(\beta_p U^3 - \beta_d Uk) \quad (5)$$

$$S_\varepsilon = \rho C_d LAD \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 4}\beta_p U^3 - C_{\varepsilon 5}\beta_d Uk) \quad (6)$$

式（5）（6）中：S_k、S_ε分别表示湍动能源项与湍动能耗散率源项，即树冠对湍动能和湍动能耗散率的影响；ρ 表示空气的密度（$kg \cdot m^{-3}$）；C_d表示叶片阻力系数；LAD 表示叶面积密度，取 1.17 m^{-3}，参考典型落叶乔木配置；β_p、β_d表示经验常数，分别取 1.0 和 4.0；U 表示速度大小（$m \cdot s^{-1}$）。

为验证多孔介质模型的有效性以及 UDF 方程的准确性，本文利用日本建筑学会提供的云外平原住宅区松树周围的空气分布测量实验数据验证树冠多孔介质模型，测量数据可在官方网站（https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/indexehtm）查询。比较 CFD 模拟与测量得到的 $\frac{U}{U_h}$、$\frac{k}{U_h^2}$结果，空间变化趋势与测量结果吻合（图 3）。



注：A 为日本建筑学会提供的实验示意；B 为 CFD 验证结果示意。

图 3 模型验证

1.4 CFD 模拟验证及分析

1.4.1 CFD 模拟验证

模拟有效性通过对比 Gromke 等[20]无树木方案流场数据确认，使用本研究设置的 H = 18 m 的方案与其无树木方案下的街谷内部的 Y/H = 0 平面的归一化垂直速度云图进行对比（图 4）。两种方案下的归一化垂直速度 w^* 均在迎风侧为负值，在背风侧为正值，分布趋势相吻合。因此认为模拟有效。

1.4.2 风速分析法

街谷内风速分析采用归一化速度进行，并将 $U^* < 0.005$ 的区域定义为局部低风速区。归一化处理的表达式如下：

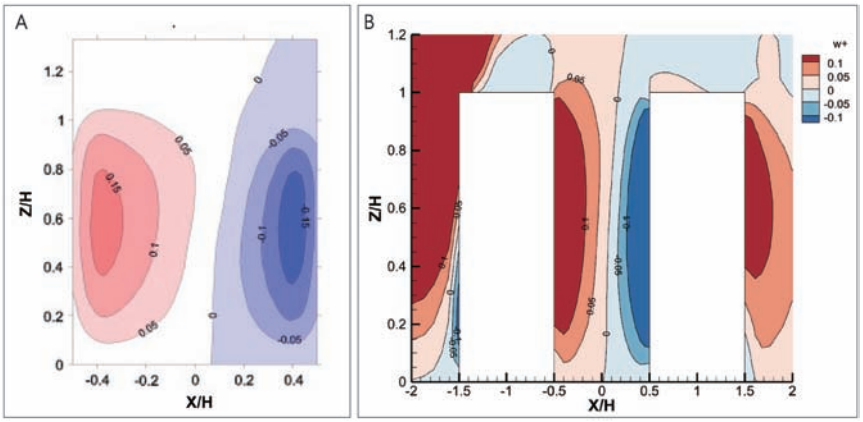
$$U^* = \frac{U}{u_{REF}} \quad (7)$$

式（7）中：U 表示计算点处的速度；u_{REF}表示参考高度处的风速数值为 4.7 $m \cdot s^{-1}$；U^* 表示归一化处理后的速度。

由于树木对气流影响较大的区域位于街谷底部，因此拟对行人层平面 Z = 0.01 m（对应现实中 Z = 1.5 m）处的风速进行归一化分析。在处理时选择不受干扰时的行人层高度处的风速为参考风速，计算得到其值为 2.23 $m \cdot s^{-1}$。表达式如下：

$$U^+ = \frac{U}{u_{REF}} \quad (8)$$

式（8）中：U 表示计算点处的速度；u_{REF}参考高度处的风速数值为 2.23 $m \cdot s^{-1}$；U^+表示归一化处理后的速度。



注：A 为 Gromke 等[20]的研究成果；B 为本案例的模拟结果；X/H，Z/H 分别表示 X、Z 轴上的相对位置。

图 4　案例验证

2　结果与分析

2.1　风场

2.1.1　街谷内风速

提取 XZ 平面上，Y = 0 m 处的平面切片作为分析对象，图 5 展示 H/W = 0.5、1、2、3、4 条件下，空街谷、中央布置及两侧布置 3 种模式对街谷垂直剖面风速分布的影响：随 H/W 增加，街谷内部气流结构逐渐演化，树木的风速削弱效应在不同街道形态下表现出明显的空间差异。

在 H/W = 0.5 的开敞街谷中，建筑高度低于树木，树冠与建筑间形成狭窄通道，气流受压后在该区域形成局部高风速带，底部风速也有所增强。中央布置的增速效果强于两侧布置，该增强虽提升了通风能力，但加剧了风速分布不均，局部高风区可能影响行人舒适性，因此宜采用两侧布置引导气流分布（图 5A ~ C）。

当 H/W = 1 时，建筑高度与树木高度相当，截面接近方形，建筑与绿化共同形成连续障碍，树木布置显著降低整体风速并均匀风速分布。中央布置显著削弱上方气流进入，在中部形成大面积低风区；两侧布置则保留部分通风通道，但边界处气流仍受扰动，风速等值线出现偏移。若以弱风均匀为目标，可优先两侧布置并控制树冠密度与高度，确保主风方向存在通风走廊（图 5D ~ F）。

由图 5G ~ I 可知，当 H/W = 2 时，随建筑高度增加，整体风速明显降低。空街谷内风速呈“中部低、两侧高”的分布特征。植树后，树冠区风速进一步减弱，街谷底部风速亦下降。两侧布置在树木周围形成局部扰动，但整体通风效果依然有限。

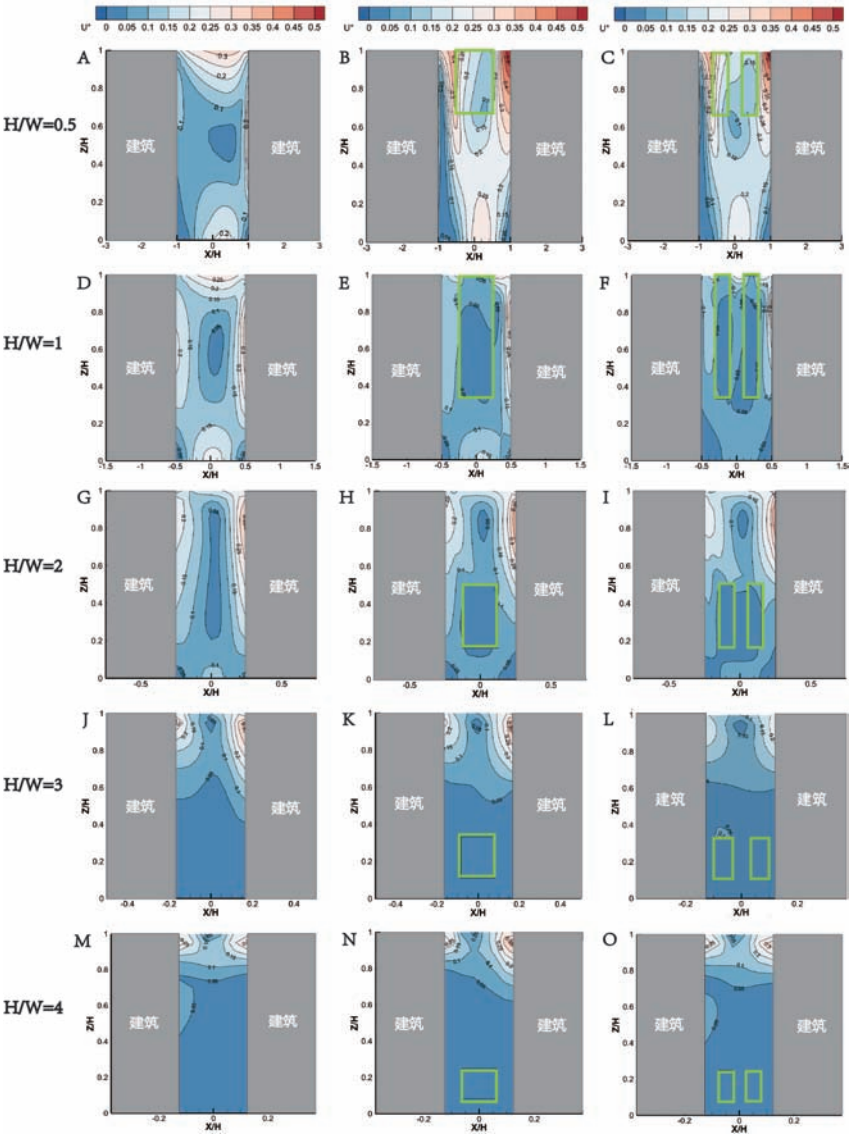
在 H/W = 3、4 的深街谷中，街谷趋于封闭，空街谷下近地层风速接近静止。无论中央或两侧布置，风速均维持低值，表明建筑高度已成为通风的主要限制因素（图 5J ~ O）。

2.1.2　行人层风速

提取 XY 平面上，Z = 1.5 m 高度处的平面切片作为分析对象，在 H/W = 0.5 的浅街谷中，街谷两端形成了明显的局部高风速区，而在背风侧的中央及两端则可观察到局部低风速区。引入树木布置后，原有的高风速区显著减弱，背风侧低风速区的范围扩大，并且街谷中部区域的风速整体上升，尤以中央布置树木的提速效果优于两侧布置（图 6A ~ C）。

在 H/W = 1 时，空街谷的归一化风速分布与 H/W = 0.5 类似，同时街谷中心出现一个椭圆形的风速增强区（图 6D ~ F）。当街谷中布置树木后，该椭圆形增速区消失，街谷两端的高风速区也被抑制，街谷中心整体风速下降，尤以两侧布置的减速效果更为显著，使整体风速分布更加均衡。

当 H/W 增大至 2 时，街谷风场发生了明显变化：两端的高风速区不再显现，行人层内归一化风速 U^+ 的最高值约为 0.6，街谷中部出现一条长条状风速增强带（$U^+ \approx 0.2$），而大部分区域的 U^+ 值均低于 0.1。布置树木后，风速整体进一步降低，风场变得更加均匀。从风速调节角度来看，树木对风速大小的影响较小，但对提升风场均匀



注：A～O 案例说明见图 1。

图 5 街谷内归一化风速 U^* 云图

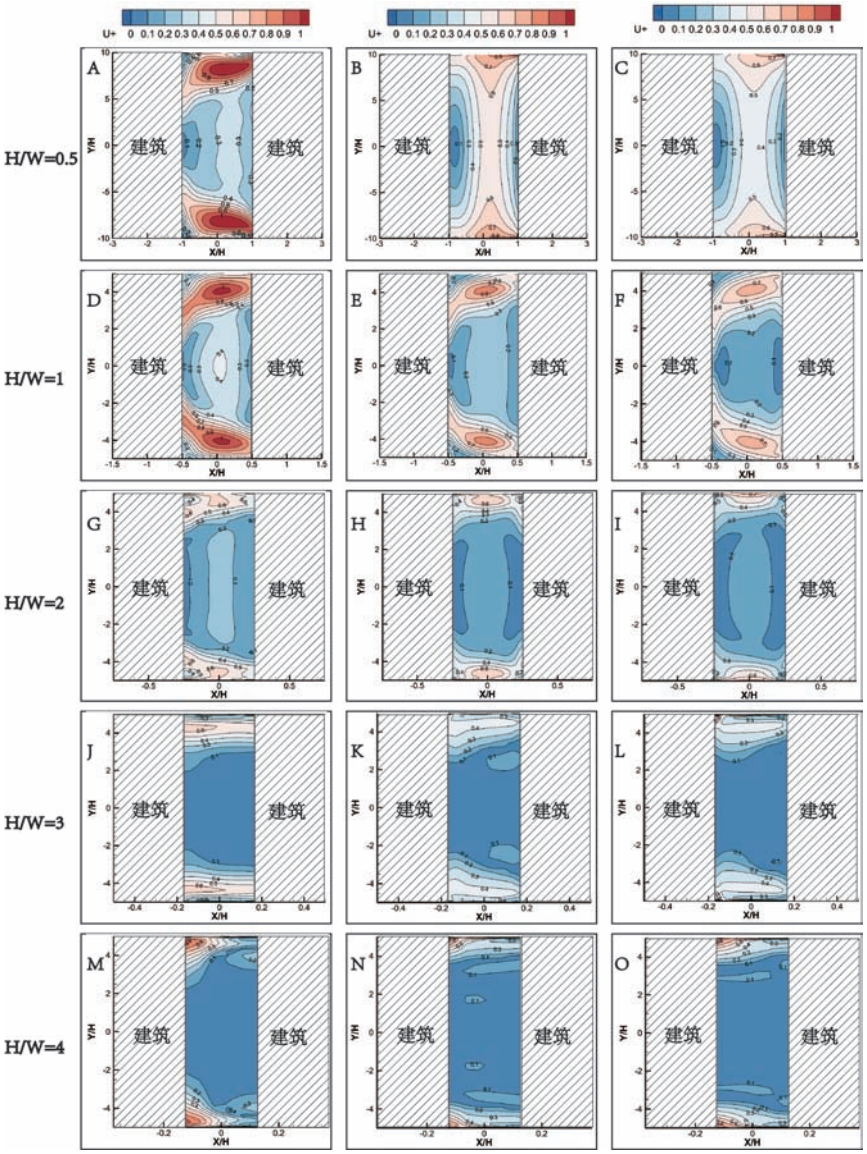
性仍具有一定作用，其中两侧布置的均风效果优于中央布置（图 6G～I）。

在 H/W＝3、4 的深街谷中，树木布置对两端风速的抑制作用更为明显，风速变化范围收缩，梯度变得更加平缓，行人层平面内整体风速分布更为均匀，但在部分区域仍可能出现局部风速增强现象（图 6J～O）。

2.2 风压

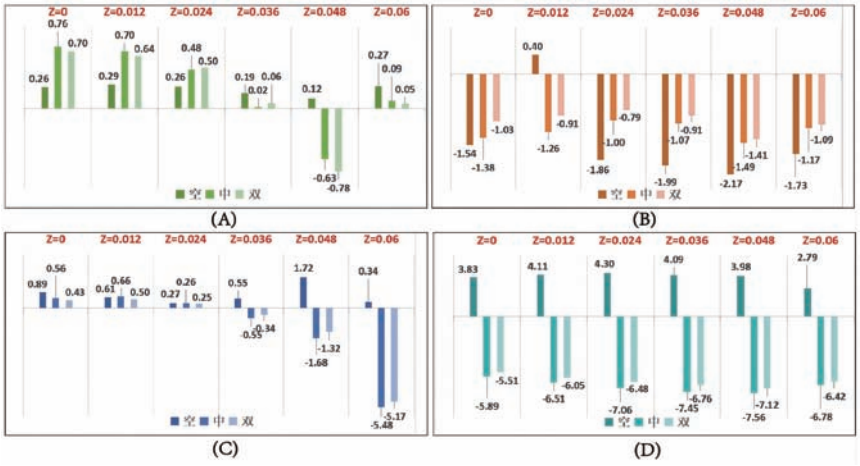
为探究不同高宽比下树木布置对街谷风压分布的影响，本文在各组工况中选取迎风侧与背风侧的中轴线、边线上 Z/H＝0、0.2、0.4、0.6、0.8、1（分别对应 Z＝0、0.012、0.024、0.036、0.048、0.06 m）6 个高度点进行定量对比，分析树木对特定位置风压的调节效应。

当 H/W＝0.5 时，树木布置均导致背风侧中轴线在 Z/H<0.5 高度段的风压增大，其中 Z＝0 时，中央布置的风压是空街谷时的 2.92 倍，双侧布置的风压则是空街谷时的 2.69 倍；随着高度升高，风压增幅减小，至 Z/H＝0.4 时双侧布置的增幅反超中央布置。在背风侧边线位置，树木布置在大部分高度点显著减小风压绝对值。迎风侧中轴线分析显示，Z/H<0.5 时树木布置有效降低风压，中央布置在 Z＝0 处的减幅为 37%，双侧布置的减幅则高达 52%，减压效果随高度增加而减弱（图 7）。



注：A～O 案例说明见图 1。

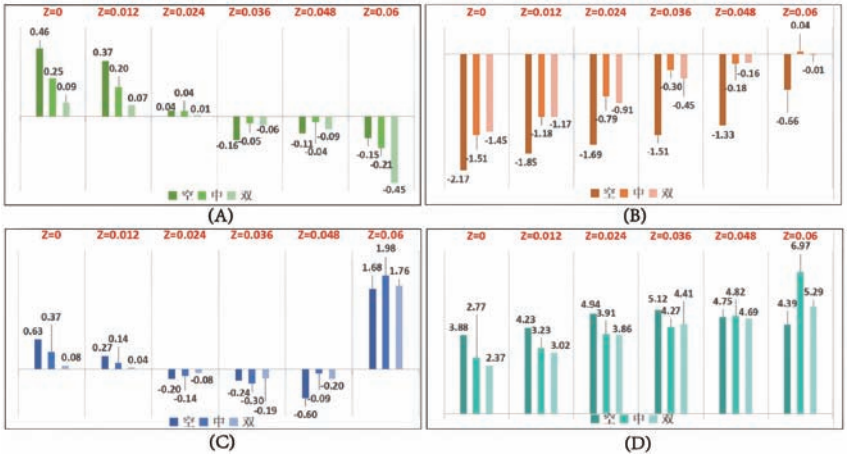
图 6　行人层平面归一化风速 U^+ 云图



注：A 背风侧中轴线；B 背风侧边线；C 迎风侧中轴线；D 迎风侧边线；柱状图单位为 Pa。

图 7　H/W = 0.5 风压对比

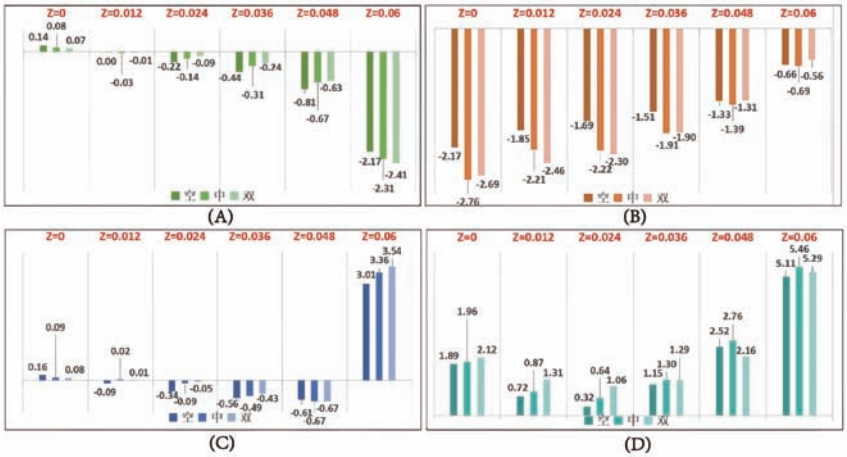
当 H/W = 1 时，背风侧中轴线的风压分布趋势与空街谷类似。Z/H < 0.5 时，风压随高度递减，树木布置进一步降低风压，双侧布置的减压幅度达 80%左右；而 Z/H>0.5 时，3 种布置均呈负压，中央布置风压绝对值最小，两侧布置次之；Z/H = 1 时，布置树木显著增加风压绝对值。背风侧边线同样表现出布置树木显著降低风压绝对值的效果。迎风侧中轴线在整体上与空街谷风压分布一致，布置树木可有效减小风压绝对值，双侧布置表现更优；但在 Z/H = 0.6 时中央布置风压最大，而 Z/H = 1 时布置树木的风压绝对值均超过空街谷。迎风侧边线上树木布置大致表现为减压趋势，但在 Z/H = 0.8 与 1 时中央布置的风压最大（图 8）。



注：A 背风侧中轴线；B 背风侧边线；C 迎风侧中轴线；D 迎风侧边线；柱状图单位为 Pa。

图 8 H/W = 1 风压对比

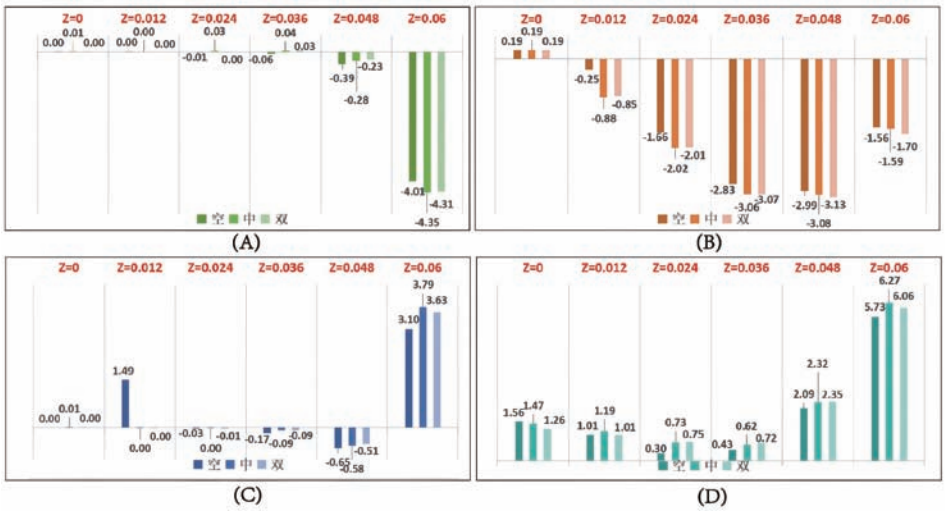
当 H/W = 2 时，背风侧和迎风侧的边线位置在大部分高度上均显示出布置树木会整体增加风压绝对值。Z/H < 0.5 时，风压绝对值排序为空街谷<中央布置<双侧布置；Z/H>0.5 时中央布置风压绝对值仍最高，而空街谷与双侧布置在不同点位交替居于第二位。中轴线分析显示，树木布置整体呈现减压效果，但在 Z/H = 1 处反而使风压绝对值高于空街谷（图 9）。



注：A 背风侧中轴线；B 背风侧边线；C 迎风侧中轴线；D 迎风侧边线；柱状图单位为 Pa。

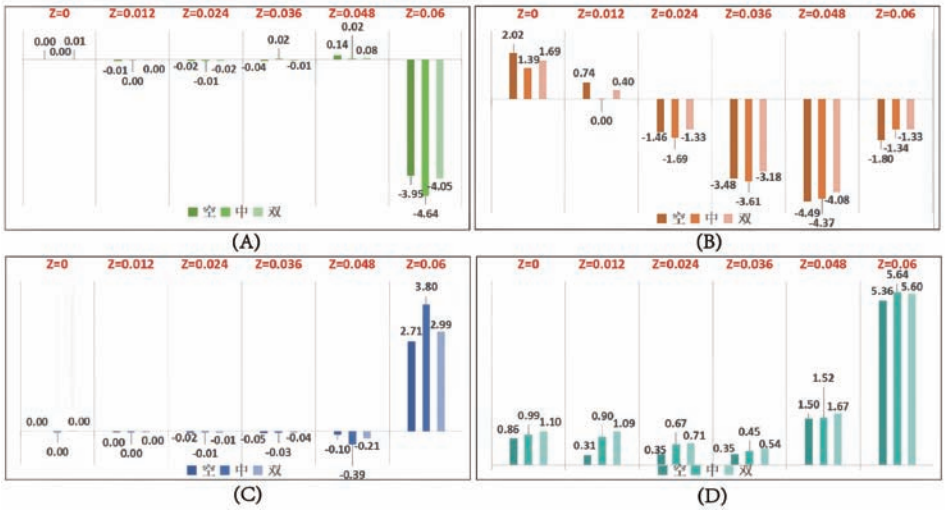
图 9 H/W = 2 风压对比

当 H/W = 3 与 H/W = 4 时，风压的正负分布在布置树木时与空街谷大体一致，局部存在明显扰动。在中轴线上 Z/H = 1 的位置，布置树木均增加了风压绝对值，排序为中央布置>双侧布置>空街谷；而在边线上，Z/H = 1 处的风压排序为空街谷>中央布置>双侧布置。整体来看，深街谷中树木布置对风压起局部调节作用，但总趋势仍以减小风压为主（图 10~11）。



注：A 背风侧中轴线；B 背风侧边线；C 迎风侧中轴线；D 迎风侧边线；柱状图单位为 Pa。

图 10　H/W = 3 风压对比



注：A 背风侧中轴线；B 背风侧边线；C 迎风侧中轴线；D 迎风侧边线；柱状图单位为 Pa。

图 11　H/W = 4 风压对比

从各高宽比的定量分析可以看出，树木布置对街谷风压分布具有显著的调节作用。背风侧中轴线在浅街谷（H/W = 0.5）中易出现风压增大，尤其在近地面区域；而边线位置更多表现为减压。在深街谷中，树木对风压的影响更复杂，常在局部区域形成突变。中央布置在部分情况下可能带来不利的增压，而双侧布置则在大多数情形下具备更为稳定的减压作用。

2.3　风速与风压关联性

结合风速与风压分布结果（表 1）可见，街谷内气流运动与建筑表面风压呈现空间耦合关系。在浅街谷（H/W = 0.5）中，通风能力较强，气流在树木与建筑间形成加速区，呈现迎风侧减压、背风侧略微增压的情况，此时中央布置易在中轴线形成局部增压，而两侧布置则可在保持通风的同时有效削弱压力梯度。中等高宽比（H/W = 1、2）条件下，双侧布置使得风压梯度更缓和，体现出较好的通风—减压协同效应。深街谷（H/W = 3、4）中，整体风速显著衰减，风压分布趋于均衡，树木布置对气流扰动和压力调节的作用有限，仅在局部区域形成差异。

综上，街谷几何形态主导了风速与风压的相互响应机制：浅街谷中需兼顾通风效率与风安全，通过控制树冠密度与布置位置避免局部高压区，在深街谷中应结合其他建筑或通风设计策略共同优化，以实现街谷风环境的整体改善。

表 1 不同 H/W 和树木布置条件下风速与风压表现

H/W	树木布置方式	街谷内风速变化	风压变化
0.5	中央布置	建筑与树冠间形成加速通道,底部风速增强,通风效率提升但分布不均	不同位置的变化不同
	双侧布置	依旧形成加速通道,整体风速略低于中央布置,分布更均匀	不同位置的变化不同,压力绝对值总体低于中央布置
1	中央布置	风速显著减弱,上方气流受阻,树冠区域中部形成低风区	总体呈现减压
	双侧布置	风速分布相对均匀	总体呈现减压,变化幅度小于中央布置
2	中央布置	整体风速下降,树冠区域形成显著低风区	中轴线总体呈现减压,边线呈现增压
	双侧布置	整体风速下降,街谷底部出现风速扰动	中轴线总体呈现减压,边线呈现增压
3、4	中央布置	风速衰减显著,底部接近静风,树木影响有限	风压与无树木接近,存在局部扰动
	双侧布置	风速变化微弱,仅在边界形成轻微扰动	风压与无树木接近,扰动幅度更小

3 讨论

本研究基于多组 CFD 模拟结果系统分析了不同高宽比的街谷中树木布置方式对风速与风压分布的调节机制，核心发现是树木布置对风环境的影响存在明显的情境依赖性。风速变化受街谷的围合形式与树木布置方式的双重影响。在浅街谷（H/W = 0.5）中，由于建筑高度较低且空间开敞，树木与建筑之间形成的夹缝状通道强化了局部通风，模拟显示风速极值可增大 60%。这一现象是流量近似恒定前提下，截面积减小导致的流速提升（连续性方程）与静压降低（伯努利原理）共同作用的结果，与压缩流效应[22]相吻合。尽管增强了通风，但这种风速突变可能导致行人风舒适度恶化，因此，在此情境下应注意行道树的冠幅尺寸。

相比之下，中等高宽比（H/W = 1、2）街谷表现出树木调节作用最显著的特征。在该条件下，街道具备一定的围合性但仍保留较强的通风通道，树木对风速与风压场均具有复合性调控作用。与空街谷相比，树木的布置有效缓和了风速以及风压的梯度，这不仅能改善行人尺度的风舒适度，也印证了合理的绿化布置能在一定程度上抑制立面构件的疲劳载荷。然而在深街谷（H/W = 3、4）中，建筑高度形成显著遮蔽，风速整体衰减超过 60%，气流主要沿建筑顶部掠过，符合 Oke[23]提出的掠射流型。在此场景下，树木对风速的影响较有限，仅表现为局部微扰。这明确表明，当建筑高度过高时，绿化难以单独承担改善风环境的任务，必须与建筑设计策略协同推进。

尽管本研究探讨了关键的物理机制，但仍存在局限性，可作为后续学者的研究起点。首先，使用的多孔介质模型对树木几何与动态特性的处理存在不足，缺乏对树种、冠幅密度和季节性变化的考虑，可能低估了树木对湍流和动量交换的真实影响。其次，评估目标较为单一，且研究集中于理想化的规则街谷，对街区等复杂形态的适应性有待检验。鉴于此，后续研究可在多目标优化和模型精细化两个方向深化拓展，同时研究尺度可扩展至街区。

4 结论

研究发现，街谷中的树木对风环境的有效调控能力存在明显的几何边界限制：在中、浅街谷中（H/W = 0.5、1、2），树木能通过改变气流路径与扰动风压分布，有效优化通风与局部微气候；然而，当街谷过深（H/W = 3、4）时，由于建筑形成的掠射流型导致整体风速衰减明显，绿化对风场的影响则趋于弱化。同时，研究明确了树木布置方式的影响差异，即中央布置更适用于以增强通风为导向的主干道，而两侧布置能有效均衡风速分布，适用于人流密集的区域。

研究提出了基于街谷高宽比的树木布置策略，以寻求通风强化与舒适性提升之间的科学权衡。研究表明，在低矮开敞街道中，规划者需警惕树木对风速极值的强化作用，采取针对性设计以防范风威胁。此外，本研究证明了合理配置树木可作为一种被动防御手段。通过调控风压场，树木能有效减小迎风侧的正压峰值，进而降低建筑外立面构件所承受的瞬时风致载荷，对于保障建筑安全具有实际意义。综上所述，街道绿化不仅是城市景观营造的重要组成部分，更可被视为优化风热环境和保障建筑外立面安全的重要技术手段。

鉴于当前 CFD 模型对树木几何与动态特性处

理的局限性，以及本研究评估目标的单一性，未来的研究可聚焦于多目标耦合优化和模型精细化。建议可将风环境分析与热湿传递及污染物扩散模型结合，建立基于季节动态和不同树种生理参数的综合评估体系。同时，可探索绿化与建筑底层风道设计的协同策略，并扩大研究尺度至街区，以量化树木布置对区域通风廊道的影响。这些研究将有助于把街谷绿化设计从经验性指导提升到基于物理机制和多目标优化的精确设计水平，更好地服务于城市的可持续发展。

参考文献

[1]GEHL J.Cities for people[M].Washington,DC:Island Press,2010.

[2]JACOBS J.The death and life of great american cities[M].New York:Random House,1961.

[3]OKE T R.Street design and urban canopy layerclimate[J].Energy and Buildings,1988,11(1/2/3):103-113.

[4]CUI D J,SU C,HANG J,et al.Effects of vertical greening on the thermal environment and energy consumption in different street canyons[J].Sustainable Cities and Society,2024,117:105979.

[5]CUI D J,LIANG G Z,TAO R J,et al.Investigation of ventilation performance in the multi-story building with various envelope features:scaled outdoor experiments[J].Building Simulation,2025,18(3):515-530.

[6]BUCCOLIERI R,SANDBERG M,DI SABATINO S.City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries[J].Atmospheric Environment,2010,44(15):1894-1903.

[7]AN L,HANG J,ZHAO Y J,et al.Cooling effects of tree transpiration:a CFD simulation study on heterogeneous tree canopy configurations(TCCs)[J].Sustainable Cities and Society,2025,126:106374.

[8]HANG J,LI Y G,SANDBERG M,et al.The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas[J].Building and Environment,2012,56:346-360.

[9]孙梦思,周晓青,黄希桂,等.基于激光扫描和形貌等效的行道树风荷载模拟[J].深圳大学学报(理工版),2024,41(2):127-135.

[10]蒋应红.国内外城市行道树综述[J].中国市政工程,2020(6):4-6,109.

[11]徐赛,李松,丁茗童.基于 i-Tree 模型的行道树生态系统服务价值[J].中国城市林业,2024,22(3):41-49.

[12]周姝雯,高菲,马克明.基于 ENVI-met 模型的北京市典型道路行道树树种优化研究[J].中国园林,2020,36(6):141-144.

[13]ABHIJITH K V,KUMAR P,GALLAGHER J,et al.Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments-a review[J].Atmospheric Environment,2017,162:71-86.

[14]ZHAO Q S,SAILOR D J,WENTZ E A.Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,32:81-91.

[15]张灵艺,秦华.城市道路行道树绿带对 $PM_{2.5}$ 的滞尘效应及其变化分析[J].中国园林,2015,31(5):106-110.

[16]吴永波,薛建辉.城市行道树的研究现状及展望[J].中国城市林业,2005,3(2):54-56.

[17]ZHANG T L,FU X T,QI F,et al.Optimizing pedestrian thermal comfort in urban street canyons for summer and winter:Tree planting or low-albedo pavements?[J].Sustainable Cities and Society,2025,120:106143.

[18]CUI D J,ZHANG Y,LI X Y,et al.Effects of different vertical façade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons[J].Urban Forestry & Urban Greening,2022,72:127582.

[19]NG E,CHENG V.Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong[J].Energy and Buildings,2012,55:51-65.

[20]GROMKE C,BUCCOLIERI R,DI SABATINO S,et al.Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-Evaluation of CFD data with experimental data[J].Atmospheric Environment,2008,42(37):8640-8650.

[21]SALIM S M,CHEAH S C,CHAN A.Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings:Comparison between RANS and LES[J].Building and Environment,2011,46(9):1735-1746.

[22]TIETJENS O G.Applied hydro- and aeromechanics:based on lectures of L.Prandtl[M].ROSENHEAD L,translated.New York:Dover Publications,1957.

[23]OKE T R.Boundary Layer Climates[M].2nd ed.London:Routledge,1987.