# 城市街谷与上游阻挡建筑最不利间距的研究

周华元, 亢燕铭, 杨 方, 刘改玲, 钟 珂\*(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要:采用数值模拟的方法,研究了街谷内上风建筑与上游阻挡建筑的间距(D),即上游建筑间距,对街谷内空气流动特性和气态污染物分布规律的影响. 模拟结果表明,街谷内迎风区的气流速度基本不随 D 的变化而变化,而背风区和中心区的气流速度随着 D 的增加呈现先减小后增大的趋势,并在 D = 90m时,气流速度达到最小值.相应地,在 D = 90m时街谷内污染物浓度最高,表明 D 存在最不利值,在城市规划中应尽可能避免该间距.当D 大于 90m时, D 越大,污染物浓度越低,而 D 小于 90m时,D 越小,污染物浓度也越低,可以同时实现节约用地和减小交通污染的目的.

关键词:街道峡谷;上游阻挡建筑;交通污染物;间距;数值模拟

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)10-4125-08

Studies on the most unfavorable distance between the upstream building and the windward building in street canyons in urban area. ZHOU Hua-yuan, KANG Yan-ming, YANG Fang, LIU Gai-ling, ZHONG Ke<sup>\*</sup> (School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China). *China Environmental Science*, 2019,39(10): 4125~4132 Abstract: Numerical simulations were conducted to investigate the influence of the distance between the upstream building and the downstream building in street canyons (*D*) on characteristics of air flow and distributions of gaseous pollutants in the canyons. The simulation results showed that the wind velocities in the windward regions in the canyons did not change with the change of *D*. However, the wind velocities in the leeward and central regions decreased first and then increased with the increase of *D*, and the minimum value occurred when D = 90m. Correspondingly, the peak concentration of the pollutant in the canyons appeared at the same *D*, which indicated the most unfavorable value of *D* existed. In urban planning, it should be avoided as far as possible. When *D* was more than 90m, the larger the *D* was, the lower the pollutant concentration would be. When *D* was less than 90m, the smaller the *D* was, the lower the concentration would be, which could be benefit for both land-saving and traffic pollution reduction. Key words: street canyon: upstream building; traffic pollutant; distance; CFD

随着我国机动车保有量的不断提高,机动车尾 气对城市居民健康的威胁日益增大.特别是近年霾 污染治理过程中,交通污染被列为主要原因之一<sup>[1]</sup>. 为便于交通污染物快速扩散,在我国近年的城市规 划中,尽可能在建筑物之间设置公共绿地,增大部分 街道峡谷(以下简称"街谷")两侧相邻建筑的间距, 给居民提供更好的空气品质.考虑到城市区域土地 紧张的现状,这种措施不仅实施难度大,而且也没有 数据结果证明其有效性.

关于街谷微环境,在过去的三十余年里,已经开展了大量的研究工作.大致可以分为两类.一类主要关注传统街谷内部气流细节特征和污染物浓度分布的研究<sup>[2-9]</sup>,如 Hunter 等<sup>[2]</sup>分析了街谷尺寸对街谷中涡流形态的影响.董龙翔等<sup>[3]</sup>对地面点源释放的污染物在城市中的扩散过程进行了数值模拟,并通过敏感性数值试验定量分析了边界入口风速和风向扰动对城市内流场和污染物扩散的影响.另一类则针对街谷约束物,如高架道路、绿化带和树冠等对

街谷内流场和污染物扩散的影响进行分析<sup>[10-16]</sup>,如 Zhang 等<sup>[10]</sup>讨论了高架桥下深街谷内流场和污染物 分布的特征,Ng 等<sup>[11]</sup>采用数值模拟的方法研究了不 同高宽比下植被对孤立深街谷内空气质量的影响.

然而,现有大部分工作的研究均针对孤立街谷 展开.实际上,在城市中街谷不是孤立存在的,建筑之 间公共绿地的尺寸和上游阻挡建筑的存在显然会 对下游街谷内的流场产生影响.对此,有人对上游阻 挡建筑对街谷来流的阻挡作用进行了研究<sup>[17-19]</sup>.如 朱强等<sup>[17]</sup>研究了不同上游阻挡建筑布局下,行列式 和错列式街谷内气流速度和污染物浓度场特征.结 果表明,在行列式街谷中,若不考虑上游阻挡建筑的 存在,将会过高估计街谷内污染程度.因此,上游阻挡 建筑对街谷来流的阻挡作用不能被忽视.并且可以

\* 责任作者, 教授, zhongkeyx@dhu.edu.cn

收稿日期: 2019-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40975093,41275157);上海市教委 科研创新重点项目(14ZZ073)

推测,上游阻挡建筑与街谷上风建筑的间距(D),也会 对街谷内的污染物分布产生一定的影响.为更加准 确地预测街谷内空气环境质量并为城市规划设计 提供参考依据,本文将对此展开研究,以分析可能存 在的 D 的最不利取值.

本文拟采用计算流体力学的方法,根据已有实 验研究<sup>[20-23]</sup>及其实测结果选择合适的湍流模型,运 用验证后的数值计算方法,以上游阻挡建筑与街谷 上风建筑的间距为变量,研究其对街谷内部流场和 浓度场的影响.

# 1 计算模型与方法

1.1 模型建立与计算方法

街谷两侧都会有相邻建筑,其中下游相邻建筑 对街谷内的气流形态的影响可以忽略不计,故本文 仅研究上游相邻建筑(以下简称"上风建筑")对来 流的阻挡作用及其对街谷内部气流和污染物扩散 特征的影响.

图 1 是本文建立的街谷模型示意.为保证结果 的普适性,本文以规则的多层建筑物为研究对象,通 过 CFD 数值模拟,对街谷两侧的建筑物高度均为 20m 的情况进行分析.设临街建筑和上游阻挡建筑 的几何参数均为长 60m (*L*),宽 15m (*B*),高 20m (*H*), 街谷同侧相邻建筑的间距为 10m (*R*),街宽为 30m (*W*),上游建筑间距为*D*.临街建筑沿街谷长轴方向周 期性排列.为了更广泛地分析上游阻挡建筑与街谷 上风建筑的间距 *D* 对街谷内空气环境的影响,本文 中 *D* 在 15~200m 范围内,按一定规律取 10 个值,用 以分析 *D* 对交通污染物分布规律的影响.



使用 Gambit 2.4.6 软件建立模型和划分网格,使

用 Fluent 6.3.26 软件对计算域内流场(包括风速与湍流强度)和污染物浓度场进行三维数值模拟.为尽量减小因求解域有限产生的端部效应,上游阻挡建筑与计算域上游边界相距 5H,街谷下风建筑与计算域下游出口相距 15H,建筑顶端与计算域上方自由面相距 4H<sup>[24]</sup>.

已有研究<sup>[25]</sup>表明,街谷中进行数值模拟计算,标 准 *k-ε* 模型适合作为湍流模型,并采用有限容积法 离散控制方程<sup>[26-27]</sup>,采用二阶迎风差分格式控制方 程离散<sup>[28]</sup>,污染物的扩散方程采用 QUICK 格式.离 散化计算域后总网格数约有 3.3×10<sup>6</sup> 个.有关流动与 污染物输送的控制方程,其网格稳定性、可靠性分析 与描述方法以及其他参数选取的细节参见文献[29].

风向对街谷内的流场影响很大,进而影响街谷 内污染物的扩散.当风向与街谷轴线垂直时,最不利 于交通污染物的扩散<sup>[30]</sup>.因此,本文仅考虑来流风向 与街谷轴线垂直的情况.此时,街谷内流场分布呈周 期性变化规律,可采用镜像法在街谷两侧设置对称 面(Symmetry),简化计算,只需计算图 1(街谷模型)中 灰色区域.

计算域的其他边界条件设置如下:计算域内的 建筑表面及街谷地面设为无滑移条件,而求解域的 顶面设为滑移条件<sup>[28]</sup>.因计算域出口的空气流态可 视为充分发展湍流,故出口边界条件可设为自由出 流(Outflow).入口边界条件设置为速度入口(Velocity Inlet),并采用用户定义函数(UDF)设置自定义速度 廓线.自定义速度廓线设置如下.

大气中风的湍流特性及风速的垂直分布与地形、地面的粗糙度密切相关<sup>[18]</sup>.因此,本文采用幂指数的风速廓线<sup>[31-32]</sup>

$$V_z / V_h = \left( z / h \right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:z 为任意高度,m; $V_z$  为该高度下的速度平均 值,m/s; $\alpha$ 为地面粗糙度指数,本文取 $\alpha = 0.28$ ;h 为参 考标准高度,m; $V_h$  为高度 h 处所测的参考标准风 速,m/s,定义建筑物高度 20m 为参考标准高度,则高 度 H=20m 处的屋顶风速为参考标准风速  $V_h$ .为模拟 近地面处不利的大气扩散条件下街谷空间中交通 污染物分布情况,设置屋顶风速为  $V_h = 2.0m/s$ ,易估 得求解域的 Reynolds 数的量级为 10<sup>5</sup>.

街谷空间内的污染源可视为连续发散的线源<sup>[33]</sup>,污染物均匀分布在一个宽10m、高0.5m,长度

(2)

与求解域相同的区域内,并位于街谷街道正中.污染物气体设为机动车的尾气主要成分 CO.为更直观明了地进行分析比较,定义无量纲浓度 C\*表征交通污染物浓度:

$$C^* = \frac{C_i \times L \times H \times V_h}{q_0}$$

式中: $C_i$ 为i点处的污染物浓度,kg/m<sup>3</sup>; $q_0$ 为污染物发散强度,kg/s.

1.2 数值计算方法的合理性验证

数值计算之前,首先需要对模型和计算方法进 行合理性验证.

**1.2.1** 流场的验证 在已发表的实验结果中,与本 文特征最接近的是 Li 等<sup>[20]</sup>的水槽实验,因此本文 利用该水槽实测数据对计算模型进行验证.

图 2 给出了街谷两侧建筑 1/2 高度处(z/H=0.5) 水平方向和垂直方向的无量纲速度分量沿街道宽 度方向的变化曲线.另外,图中还给出了 Liu 等的 LES 模型<sup>[21]</sup>和Li等的标准 k-c模型<sup>[22]</sup>的模拟结果.



#### 图 2 流场模拟值与实测值的比较



无量纲水平速度分量: 
$$u_x = u_x / v_{ref}$$
; 无量纲垂直速度分量:  $u_z^* = u_z / V_{ref}$ ; 无量纲宽度:  $W^* = x / W$ 

由图 2 可以看出,本文与另外两篇文献的模拟 结果都与实测数据吻合较好,其中均采用标准 k-s 模型的本文和文献[22]的计算结果更接近实测结果, 表明本文选择的湍流模型适当,采用的数值计算方 法可以较准确地预测街谷内流场.

1.2.2 浓度场的验证 除流场的验证外,本文的数 值模型还需要对街谷内的污染物浓度场进行验证. 本文采用 Meroney 等<sup>[23]</sup>的风洞实验结果进行比对 和校验,分别验证了入口风速为  $V_{ref} = 3m/s$  和  $V_{ref} = 5m/s$  的情况,结果如图 3 所示.



图 3 浓度场模拟值与实测值的比较

Fig.3 Comparisons of simulated concentration with test data

in street canyon					
		无量纲高度: z	* = z / H		
背风面:		模拟值	迎风面:		模拟值
	0	测量值		•	测量值

图 3 的结果表明,尽管实测值与模拟值之间存 在一些差异,但两者的变化规律基本相同,大部分模 拟值与实验值吻合较好.

从上述验证的过程来看,本文选择的数值模型 和数值计算方法能较好地预测街谷内的流场和速 度场.

## 2 模拟结果与分析

2.1 上游建筑间距 D 对街谷内气流特征的影响

图 4(a)和(b)分别给出 AA'横剖面(图 1)上街谷 内气流速度矢量图和湍流强度分布云图.从图 4(a) 中的流场可以看出,街谷上风建筑的迎风侧在无上 游阻挡建筑时,街谷上风建筑附近的气流由地面吹 向屋顶;而在有上游阻挡建筑情况下风向相反.由于 此风向的不同,导致街谷内部形成的涡流形态和风 速有一些差别.前者在街谷内产生了一个较小的涡, 靠近上风建筑和下风建筑处的风速较大;而后者产 生了一个较大的涡.不仅如此,在不同的 D 下,街谷内 涡的位置和大小也有一定区别,这些区别会对交通 污染物的扩散有一定的影响.从图 4(b)可以看出,虽 然在无上游阻挡建筑时,上风建筑的迎风侧上端湍 流强度最大;在有上游阻挡建筑时,该处湍流强度有 所减小,但是街谷内较低位置的湍流强度却基本无 变化.





为更加具体地比较 D 对街谷空间空气流动状态的影响,图 5 给出中心区 3 个典型位置处(图 1)气流速度沿高度方向分布的情况.

由图 5(a)可以看到,在 6m 高度以下, D = 200m 时街谷内气流速度较其他间距小, D = 75m 时街谷 内气流速度最大.而在 6m 高度以上, D = 200m 时街

谷内气流速度反而最大,因此 *D* 对街谷内的流场有 一定影响.由图 5(b)可以看到,*D* 对位置 *p*<sub>2</sub>的影响作 用较小,不同的 *D* 对应的气流速度在各高度处基本 相同.



Fig.5 Profiles of the wind speeds at the typical positions in the street canyons

另一方面,有上游阻挡建筑时,3 个考察点的速度分布的最小值都出现在街谷内部,最小值出现的高度因考察点位置不同而不同,并受到 D 的影响.无上游阻挡建筑时,速度最小值出现位置高度受考察点位置影响非常大.

湍流强度也是影响流场的主要因素之一,图 6 给出了中心区 3 个典型位置处(图 1)湍流强度沿高 度方向分布的情况.

从图6可以看到,无上游阻挡建筑下3个考察点的湍流强度均比有上游阻挡建筑下的湍流强度均. 有上游阻挡建筑的情况下,各个位置处湍流强度的规律基本相似,且都在近地面处增加的幅度较其他高度处大.虽然湍流强度在数值上稍有不同,但变化规律不随 D 的变化而变化,因此下文将主要分析街谷内风速随 D 的变化规律.

为了统计分析上游阻挡建筑与街谷上风建筑



图 6 街谷中典型位置处湍流强度沿高度方向分布曲线 Fig.6 Profiles of the turbulence intensity at the typical positions in the street canyons



图 7 街谷内平面区域划分



根据 CFD 模拟结果,得到每个取值点的信息,图 8 给出 3 个区域内气流速度的统计结果.



图 8(a)和(b)表明,在街谷的背风区和中心区,气 流速度受到 D 的影响较大,且都在 D = 90m 时气流 速度达到最小值.而在迎风区(图 8(c))中,气流速度 受到 *D*的影响较小,不同的 *D*下气流速度基本没有变化,但气流速度在 *D* = 60~135m 范围内也存在最小值.

比较图 8 的统计结果可以看出,无论 D 为何值时,有上游阻挡建筑的街谷内气流速度都比无上游阻挡建筑的街谷内气流速度要小,这将导致污染物扩散不畅,影响街谷内的空气品质.

为明确 D 对街谷内气流速度的改变作用,定义 街谷内气流速度的下降率η为:

$$\eta_{v_i} = \left| \frac{\nu_i - \nu_{0_i}}{\nu_{0_i}} \right| \times 100\%$$
(4)

式中: $\eta_{vi}$ 为 *i* 空间高度下的气流速度下降率; $v_i$ 为 *i* 空间高度下的平均风速; $v_{0i}$ 为无上游阻挡建筑情况下的平均风速.

图9给出了相对于无上游阻挡建筑时,在不同D 下街谷内气流速度的下降率.可以看出,上游阻挡建 筑的存在会使街谷内的风速下降 30%~50%,且在 D=75m 时下降率达到最大值.相比于中心区和迎风 区,背风区风速下降率高出 5%~10%左右.



图9 不同D时街谷内气流速度下降率



上游阻挡建筑对街谷内气流速度的影响将会 影响到街谷内机动车污染源的扩散特征.以下将对 街谷内污染物浓度分布进行分析.

2.2 上游建筑间距 D 对污染物浓度分布的影响

图 10 给出了 AA'横剖面(图 1)的街谷污染物分 布和流线.

从图 10(a)可以看出,无上游阻挡建筑时,污染物 在涡流的作用下主要堆积在街谷背风区建筑附近 和中心区近地面.当 *D* = 45m(图 10(b))时,污染物向 街谷中心区的涡流中心聚集.而当 *D* 增大到 200m



图 10 街谷横剖面 AA'(x = 15m)上的浓度场 Fig.10 Pollutant concentration distributions on plane AA' (x = 15m)

造成以上区别的原因是不同的 D 对应的流场 不同.当上游阻挡建筑距离街谷较远(如图 10(c))时, 上游阻挡建筑对来流的阻挡作用接近于无上游阻 挡建筑的情况,因此浓度场又近似于无上游阻挡建 筑的情况,向街谷背风区的地面聚集.

根据图 7 中划分的三个区域,从数值模拟结果 中提取相应区域的污染物无量纲浓度,统计结果如 图 11 所示.



对比图 11 可以看出,背风区污染物浓度最高,迎

风区污染物浓度最低.这是由于街谷中形成了顺时 针涡流,迎风区得到的是新鲜空气,因此污染物浓度 最小;而背风区得到的是受污染空气,因此污染物浓 度最大.

另外,在背风区(如图 11(a))中,虽然不同 D 下 风速变化较大,但由于处在污染源下游,直接受到 污染物的扩散影响,污染物浓度在各 D 下基本一致, 不受 D 大小的影响.而在迎风区(如图 11(c))中,虽 然风速在各 D 下基本一致(图 8(c)),但由于受到中 心区回流的影响,中心区风速在 D = 90m 处存在风 速最小值,因此污染物浓度在 D = 90m 处存在一个 最大值.

为估算其他上游阻挡建筑与街谷上风建筑的 间距 D 下交通污染物的浓度,采用 Origin 程序拟合 3 个区域内污染物浓度的平均值,拟合采用三次多 项式:

 $y = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3$  (5) 根据误差最小原则,得到拟合结果,如图 12 所示.



图 12 3 个区域内污染物浓度拟合结果 Fig.12 Fitting results of pollutant concentrations in three regions

由图 12 可以看出,在中心区和迎风区内,交通污染物浓度均在 D=90m 左右达到最大值,而背风区浓度在各 D 下浓度基本不变.

3个区域的拟合函数分别为: 背风区:

$$y = 88.77 + 0.14x -$$

$$2.59 \times 10^{-3} x^{2} + 1.10 \times 10^{-5} x^{3}$$
(6)

中心区:

$$y = 47.97 + 0.57x -$$
  
3.30×10<sup>-3</sup>x<sup>2</sup> + 5.59×10<sup>-6</sup>x<sup>3</sup>  
抑风区: (7)

$$y = 8.92 + 0.74x -$$

(8) $6.14 \times 10^{-3} x^2 + 1.43 \times 10^{-5} x^3$ 

上述 3 个区域的拟合度 R<sup>2</sup>分别为: R<sup>2</sup>=0.92; R<sup>2</sup> =0.95: R<sup>2</sup>=0.99.说明拟合线可以很好反映出街谷内 交通污染物随 D 的变化规律.根据公式,可以估算其 他 D 的浓度.

为明确 D 对街谷内污染物浓度的改变作用,定 义街谷内污染物浓度的增长率 $\eta_{Ci}$ 为:

$$\eta_{\rm Ci} = \frac{C_i - C_{0i}}{C_{0i}} \times 100\% \tag{9}$$

式中:n<sub>Ci</sub>为 i 空间高度下的污染物浓度增长率;C<sub>i</sub>为 i 空间高度下的平均无量纲浓度;Coi 为无上游阻挡 建筑情况下的平均无量纲浓度.



图 13 给出了相对于无上游阻挡建筑时,在不同 D 下街谷内污染物浓度的增长率.图中可以看出,不 同的D会对3个统计区域的污染物浓度产生不同的 影响,对中心区影响最大,对背风区影响最小,在迎风 区和中心区,大部分 D 下污染物浓度增长率在 70% 左右,且不随 D 分布呈单调变化.而背风区的增长率 仅在10%左右.

因此,在 D=90m 以内, D 越小,污染物浓度越低. 针对目前面临的土地紧张问题,若着重考虑交通污 染物的影响,则上游建筑间距 D 不宜过大,应采用较 小的 D.

#### 3 结论

3.1 对于街谷内的背风区和中心区而言,气流速度 受到 D 的影响较大,并都在 D = 90m 时气流速度达 到最小值.而在迎风区中,不同 D 下气流速度基本没 有变化,受D的影响较小.

3.2 上游阻挡建筑对气流的阻挡效应,会导致街谷 内污染物浓度增大,背风区的增长率在 10%左右,在 迎风区和中心区,大部分 D 下污染物浓度增长率在 70%左右.

3.3 街谷内污染物浓度随着 D 的增加呈现先增大 后减小的趋势,并在 D=90m 时,污染物浓度达到最 大值.因此,当城市规划着重考虑减小交通污染时, D不宜过大.D在90m以内时,D越小,污染物浓度 越低.

### 参考文献:

- [1] 申 俊.PM2.5 污染对公共健康和社会经济的影响研究 [D]. 武汉: 中国地质大学.2018. Shen J. Research on Public Health and Socio-economic Impacts of PM2.5 Pollution [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [2] Hunter L J, Watson I D, Johnson G T. Modelling air flow regimes in urban canyons [J]. Energy and Buildings, 1991,15(3):315-324.
- [3] 董龙翔,左洪超,杨 宾,等.边界入流风场扰动对模拟城市大气扩散 的影响 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3210-3219. Dong L X, Zuo H C, Yang B. Influence of boundary inflow wind fluctuation on simulated urban atmospheric diffusion [J]. China Environmental Science, 2017,37(9):3210-3219
- [4] 王 乐,张云伟,顾兆林.动态风场及交通流量下街道峡谷内污染物 扩散模拟 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2161-2167. Wang L, Zhang Y W, Gu Z L. The numerical simulation of pollutant dispersion in street canyons under dynamic wind field and traffic flux conditions [J]. China Environmental Science, 2012,32(12):2161-2167
- [5] 杨 方,钟 珂,亢燕铭.街道峡谷对称性对污染物扩散的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 706-713. Yang F, Zhong K, Kang Y M. Effects of street geometric

configurations on the pollutant dispersion around the canyons [J]. China Environmental Science, 2015,35(3):706-713.

- [6] Carpentieri M, Robins A G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015,145:61-74.
- [7] Yang F, Gao Y, Zhong K, et al. Impacts of cross-ventilation on the air quality in street canyons with different building arrangements [J]. Building and Environment, 2016,104:1-12.
- [8] Ai Z T, Mak C M. CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: Evaluation of three computational settings [J]. Building and Environment, 2017,114:293-306.
- [9] Di Bernardino A, Monti P, Leuzzi G, et al. Pollutant fluxes in two-dimensional street canyons [J]. Urban climate, 2018,24:80-93.
- [10] Zhang K, Chen G, Wang X, et al. Numerical evaluations of urban design technique to reduce vehicular personal intake fraction in deep street canyons [J]. Science of the Total Environment, 2019,653:968-994
- [11] Ng W Y, Chau C K. Evaluating the role of vegetation on the ventilation performance in isolated deep street canyons [J].

International Journal of Environment and Pollution, 2012,50(1-4): 98-110.

- [12] 冯寒立,赵敬德,翟 静.高架覆盖的街谷内可吸入颗粒物的浓度分布 [J]. 环境工程学报, 2017,11(8):4669-4676.
  Feng H L, Zhao J D, Zhai J. Concentration diffusion of particulate matter in street canyon covered with elevated road [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(8):4669-4676.
- [13] 钟 珂,亢燕铭,王翠萍,等.城市绿化对街道空气污染物扩散的影响
  [J]. 中国环境科学, 2005,25(S1):6-9.
  Zhong K, Kang Y M, Wang C P, et al. Influence of afforestation of cities on urban road air pollutants diffusion [J]. China Environmental Science, 2005,25(S1):6-9.
- [14] 王友君, 亢燕铭, 陈勇航. 建筑和绿化对街谷空气污染物扩散的影响
  [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2012, 38(6): 740-744, 770.
  Wang Y J, Kang Y M, Chen Y H. Influence of buildings and tree planting on air pollutants diffusion in street canyon [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2012, 38(6): 740-744, 770.
- [15] Huang Y, Zhou Z A. numerical study of airflow and pollutant dispersion inside an urban street canyon containing an elevated expressway [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2013,18(1): 105-114.
- [16] Gu Z L, Zhang Y W, Lei K B. Large eddy simulation of flow in a street canyon with tree planting under various atmospheric instability conditions [J]. Science China Technological Sciences, 2010,53(7): 1928–1937.
- [17] 朱 强,亢燕铭,杨 方,等.上游建筑对街道峡谷内流场和污染物分 布特征的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(1):45-54.
  Zhu Q, Kang Y M, Yang F, et al. Impacts of upstream buildings on the flow fields and pollutant distributions in street canyons [J]. China Environmental Science, 2015,35(1):45-54.
- [18] Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H, et al. Air ventilation impacts of the "wall effect" resulting from the alignment of high-rise buildings
   [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(32):4982–4994.
- [19] 刘改玲,陈晓萌,钟 珂.背景风速对上游有阻挡建筑的街谷环境的 影响 [J]. 建筑热能通风空调, 2017,36(6):39-43.
  Liu G L, Chen X M, Zhong K. Impacts of background wind speed on the flow fields and pollutant distributions in street canyons [J]. Building Energy & Environment, 2017,36(6):39-43.
- [20] Li X X, Leung D Y C, Liu C H, et al. Physical modeling of flow field inside urban street canyons [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008,47(7):2058–2067.
- [21] Liu C H, Barth M C, Leung D Y C. Large-eddy simulation of flow and pollutant transport in street canyons of different buildingheight-to-street-width ratios [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004,43(10):1410-1424.

- [22] Li X X, Liu C H, Leung D Y C. Development of a k-e model for the determination of air exchange rates for street canyons [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(38):7285-7296.
- [23] Meroney R N, Pavageau M, Rafailidis S, et al. Study of line source characteristics for 2–D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons [J]. Journal of wind Engineering and industrial Aerodynamics, 1996,62(1):37–56.
- [24] Liu C H, Wong C C C. On the pollutant removal, dispersion, and entrainment over two-dimensional idealized street canyons [J]. Atmospheric research, 2014,135:128–142.
- [25] Chen L, Hang J, Sandberg M, et al. The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models [J]. Building and Environment, 2017,118:344-361.
- [26] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

Wang F J. Computational fluid dynamics analysis - CFD software principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

- [27] 陶文铨.数值传热学(第2版) [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
   Tao W Q. Numerical Heat Transfer (Second Edition) [M]. Xi'an:
   Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [28] 杨 方.街区与建筑室内空气环境耦合特征的研究 [D]. 上海:东 华大学, 2015.
  Yang F. Investigations on the coupling exchange between outdoor wind flow in street canyon and indoor air flow inside buildings [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [29] Wang Y, Zhong K, Zhang N, et al. Numerical analysis of solar radiation effects on flow patterns in street canyons [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2014,8(2):252–262.
- [30] Vardoulakis S, Fisher B E A, Pericleous K, et al. Modelling air quality in street canyons: a review [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(2): 155–182.
- [31] Leung K K, Liu C H, Wong C C C, et al. On the study of ventilation and pollutant removal over idealized two-dimensional urban street canyons [C]// Building Simulation. Tsinghua Press, 2012,5(4):359– 369.
- [32] Barratt R. Atmospheric Dispersion Modelling An Introduction to Practical Applications [M]. London: Earthscan Publication, 2001.
- [33] Chang C H, Meroney R N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001,89(14/15):1325–1334.

作者简介:周华元(1995-),男,上海人,东华大学博士研究生,主要从事城 市大气环境与室内空气品质研究.发表论文 2 篇.

39卷