

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.002

微尺度城市冠层模型下的通风与放射性核素扩散特性

高 菡, 文雅冰, 赵福云

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 采用数值模拟方法研究了城市冠层形态对放射性核素迁移扩散特性的影响, 并引入速度比(VR)、空气龄(τ_p)、滞留时间(τ_c)和大气弥散因子(ADF) 4个指标评价城市冠层行人高度处放射性核素的流动和扩散状况。数值结果表明, 城市冠层形态的改变对主街道上的空气龄影响较小, 但对街道峡谷内的空气龄影响较大; 在较高建筑迎风侧下洗风的现象较强, 通风状况较好, 而在其背风侧存在气流停滞现象, 通风状况较差。放射性核素的迁移扩散主要受城市冠层形态的影响, 通风良好的街道峡谷不一定有较小的滞留时间, 而通风较差的街道峡谷也不一定有较大的滞留时间。受建筑群的机械扰流影响, 大气弥散因子明显降低, 当城市冠层为凸型和递增型时, 放射性核素在下游距离 450~900 m 区域内扩散效果最好。

关键词: 城市冠层形态; 放射性核素; 速度比; 空气龄; 滞留时间; 大气弥散因子

中图分类号: X591

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)05-0010-08

引文格式: 高 菡, 文雅冰, 赵福云. 微尺度城市冠层模型下的通风与放射性核素扩散特性[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 10-17.

Analysis of Ventilation and Radionuclide Diffusion Features Under the Micro-Scale Urban Canopy Layer Model

GAO Han, WEN Yabing, ZHAO Fuyun

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been carried out on the influence of urban canopy morphology on the migration and diffusion features of radionuclides by using the method of numerical simulation, with an introduction of such four indicators as the velocity ratio (VR), age of air (τ_p), retention time (τ_c) and atmospheric dispersion factor (ADF), for an evaluation of the flow and diffusion of radionuclides at pedestrian altitude in urban canopy. The numerical results indicate that changes in urban canopy morphology have a relatively small impact on the air age on the main streets, but have a greater impact on the air age within the street canyons. There is a stronger washing air on the windward side of higher buildings with a better ventilation, while there is airflow stagnation on the leeward side accompanied by a poor ventilation. The migration and diffusion of radioactive isotopes are mainly under the influence of the morphology of urban canopies. Street canyons with a good ventilation may not have a shorter residence time, while poorly ventilated street canyons may not necessarily have a longer residence time. Due to the influence of mechanical turbulence of buildings, the atmospheric dispersion factor is obviously reduced. When the urban canopy shows a protuberant and ascending tendency, the radionuclides are characterized with the best diffusion effect within an area of 450~900 m downstream.

Keywords: urban canopy layer morphology; radionuclide; velocity ratio; air age; retention time; atmospheric dispersion factor

收稿日期: 2023-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1867221); 湖南省重点研发计划基金资助项目(2022SK2084)

作者简介: 高 菡, 女, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为建筑环境流体动力学与建筑节能, E-mail: 15137167791@163.com

通信作者: 赵福云, 男, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为建筑环境流体动力学与建筑节能, E-mail: 381655419@qq.com

随着核能产业的不断发展,对核燃料的需求量日益增多,导致相应矿石特别是铀矿石的产量以惊人速度增长。19世纪时全世界的铀矿年产量为3 t,而20世纪40年代时铀矿年产量已达100 t,目前维持在5万 t左右^[1]。随着铀矿开采,铀尾矿排风井会不断地排放大量有毒物质,其中放射性核素氡是对环境污染和人体健康危害最为严重的气态物质^[2-3]。

在城市郊区,铀矿排风井处释放的放射性核素可能会在不同强度和方向背景风的作用下扩散至城市区域,而由于城市区域建筑的错综复杂布局,难以形成良好的通风环境,容易使得放射性核素散布在城市冠层内部,严重影响居民身体健康。

目前已经有大量的学者针对城市冠层内的气体流动和扩散进行了研究,如杨会等^[4]研究了二维峡谷中交通尾气的扩散规律,发现在均匀污染物释放情况下,峡谷迎风侧和背风侧的污染物浓度存在较大差异。Hang J.等^[5-6]对具有不同建筑高度三维街道峡谷内的通风状况和污染物稀释状况进行了研究,结果表明,相邻建筑具有一定的高度差更有利于外界空气进入街谷中。Mei S. J.等^[7]研究了风压和热压共同驱动下,不同街道高宽比对二维峡谷污染物迁移扩散的影响。然而这些研究中缺乏对放射性污染物的研究,放射性核素在迁移扩散过程中涉及大量的物理化学过程,数值模拟更为复杂^[8]。因此,本文拟采用计算流体力学的方法,研究放射性核素在不同形态下三维城市冠层内的迁移扩散特性。同时,为了更好地分析城市冠层内的流动状况,引入了速度比^[9]、空气龄^[10]、滞留时间^[11]和大气弥散因子^[12]等指标进行分析比较,以期为合理规划城市通风设计和放射性核素的扩散预测提供理论依据。

1 计算模型与方法

1.1 微尺度城市冠层模型

R. E. Britter等^[13]在研究中将控制城市区域内大气流动的范围划分为区域尺度(100~200 km)、城市尺度(10~20 km)和微尺度(≤ 2 km)3种尺度。本文基于微尺度条件建立了一个区域范围小于2 km的城市冠层模型。同时,为了获得建筑群形态对城市冠层内部流动和扩散特性影响的详细信息,本文还对城市冠层模型进行了简化处理。图1为本研究建立的微尺度城市冠层模型的几何示意图。假设模型高度与实际建筑高度的比例为1:1,因此选定建筑物的高度为 H (H 为根据研究变量选定的可调值),建筑物的长和宽均为 B ,取30 m,所有相邻建筑间构成的街道峡谷均相等,其宽度 W 为30 m。

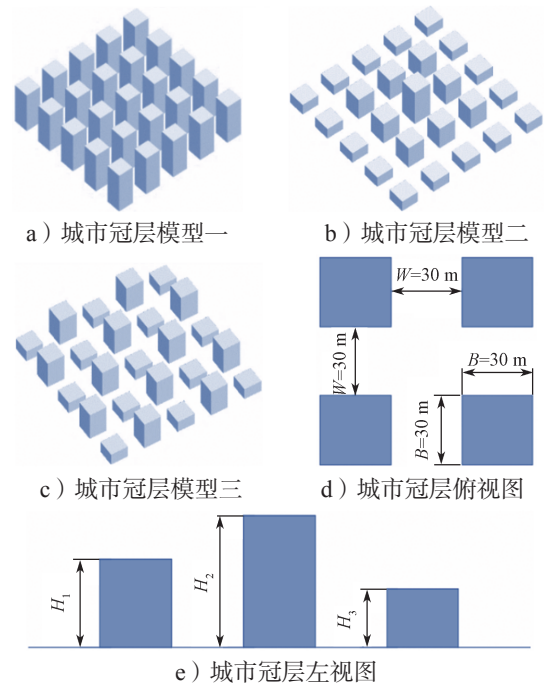


图1 微尺度城市冠层模型的几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of the micro-scale urban canopy layer model

本研究针对城市冠层形态的变化进行数值模拟,其建筑模型的几何参数如表1所示。

表1 建筑模型的几何参数

Table 1 Geometric parameters of building models

数值案例	建筑高度 H/m	建筑群平均高度 /m	城市冠层形态
工况1	30	30	平高型
工况2	18, 43	30	交错型
工况3	21, 43, 70	30	
工况4	24, 39, 54	30	凸型
工况5	27, 34, 46	30	
工况6	32, 27, 22	30	
工况7	34, 24, 14	30	凹型
工况8	36, 21, 6	30	
工况9	10, 20, 30, 40, 50	30	递增型
工况10	50, 40, 30, 20, 10	30	递减型

1.2 放射性核素氡的大气输运方程

放射性核素氡的大气弥散过程十分复杂,主要包括大气环境导致的对流扩散^[14]和干、湿沉积,还有其自身因素所导致的放射性衰变^[15]和重力沉降。根据气体输运的非克定律,可得到任意形态介质中的放射性核素氡的浓度变化方程,具体如下^[3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C dV = \int_V Q dV - \int_V C(\lambda + A + w_s) dV - \oint_S j_1 dS - \oint_S j_2 dS, \quad (1)$$

其中,由扩散和对流引起的核素氡的变化量如下:

$$\oint_S j_1 dS = -D \oint_S \text{grad } C dS, \quad (2)$$

$$\oint_S j_2 dS = \oint_S C U dS, \quad (3)$$

使用拉普拉斯算子和哈密尔算子,可得到如下放射性核素氡大气弥散的输运方程^[6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(C \cdot U) = D \Delta C + Q - (\lambda + A + w_s)C. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: C 为大气中氡的平均浓度; V 为氡通过某任意形状控制体的空气体积; U 为放射性核素氡在大气中的对流速度; D 为放射性核素氡在大气中的扩散系数; Q 为污染物源项; λ 为放射性核素氡的衰变常量,取值 $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; A 为雨水冲刷系数,取值 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; w_s 为重力沉降速率,取值 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; S 为氡通过扩散及对流迁移通过的面积; j_1 为扩散迁移氡量; j_2 为对流迁移氡量。

根据谢东等^[3]对实际铀矿排风井的测量,本研究建立了一个尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的铀矿排风井模型,对放射性核素氡的大气弥散过程作如下假设:

1) 铀尾矿排风井作为孤立的连续点源排放; 2) 铀尾矿排放口的尺寸较小,可近似为地面源排放; 3) 铀尾矿排风口处与环境没有热量交换。

1.3 计算域模型与数值方法设定

图2为本文设计的数值模型计算域几何示意图。

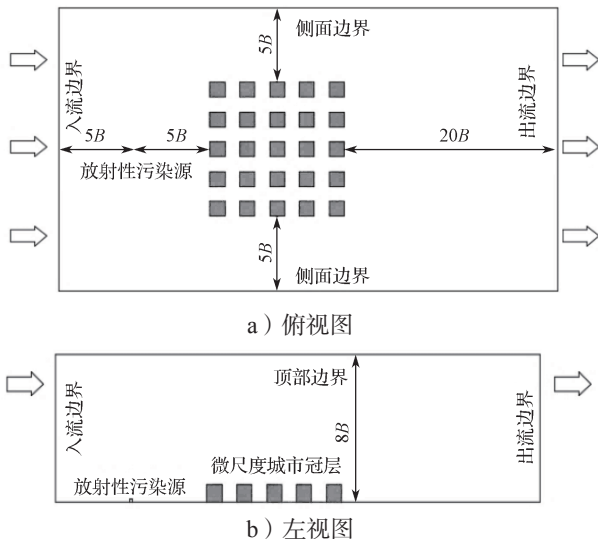


图2 数值模型计算域的几何示意图

Fig. 2 Geometrical diagram of the computational domain of the numerical model

本文基于日本建筑学会提出的 AIJ (architectural institute of Japan) 指南^[16]和薛笋笋等^[17]提出的风场模拟参数选取原则,取计算域上游入口距离城市冠层为 $10B$,冠层距离放射性核素污染源为 $5B$,计算域顶端与地面的垂直距离为 $8B$,侧面至城市冠层为

$5B$,为保证放射性核素在下游区域有充足扩散距离,设定计算域下游出口距离城市冠层为 $20B$;来流风向角 θ 为 0° 。

计算域边界条件很大程度上决定着数值模拟的准确性与可靠性。本文根据 M. J. Brown 等^[18]的风洞实验设定,采用垂直方向上的风廓线 (Velocity) 作为入流条件,其表达式如下:

$$U_0(z) = 3.0 \times (z/H)^{0.16}, \quad (5)$$

$$k(z) = u_*^2 / \sqrt{C_\mu}, \quad (6)$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{3/4} k^{3/2} (\kappa_v z). \quad (7)$$

式(5)~(7)中: C_μ 为标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型常数,且 $C_\mu=0.09$; u_* 为剪切速度,取 0.24 m/s ; κ_v 是冯卡门常数,取 0.41 ; k 为湍流动能; z 为竖直方向高度。

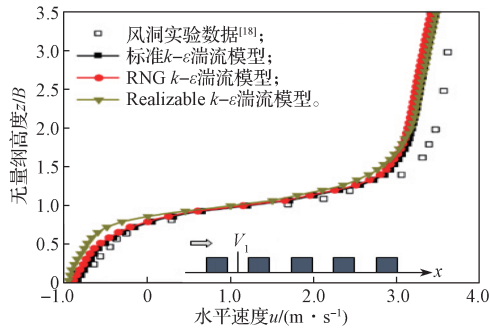
计算域的其他边界条件设定如下:建筑物表面和地面设为无滑移的固体壁面 (Wall),计算域侧面和顶部设为对称边界 (Symmetry),以确保平行流的实现。计算域出口流态可视为充分发展的湍流流动,因此设为自由出流边界 (Outflow),铀矿排风井处设置为恒流源项,大小为 8500 Bq/m^3 。

采用非均匀结构化网格对计算域模型进行划分,根据标准壁面函数法要求,近壁面处的网格 y^+ 值均保持为 $30 \sim 160$,经网格独立性验证后,确定了近壁面区域的最小网格尺寸为 0.3 m ,网格增长率为 1.1 ,计算域的总网格数为 $250 \text{ 万} \sim 300 \text{ 万}$ 。对于所有的控制方程,采用有限体积法进行离散化,同时使用 Couple 算法迭代求解压力-速度耦合方程。将控制方程中的对流项设置为二阶迎风格式来获得精确的数值解,所有方程的收敛残差均设置为 10^{-4} 。

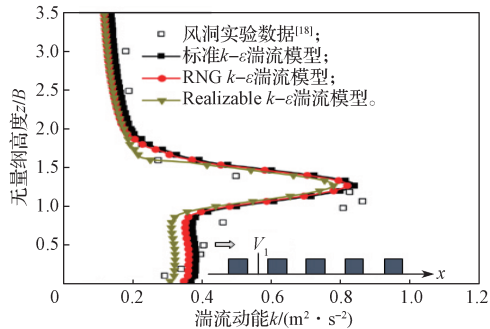
1.4 模型验证

数值计算本身不能够保证模拟结果的准确性和可靠性,必须要与风洞实验数据进行比较验证。本文采用 M. J. Brown 等^[18]在开路风洞实验中获得的结果进行模型验证,比较了街道峡谷中垂直剖面上的流向速度和湍流动能值。图3显示了第二个街道峡谷 $V_1 (x/H=8.5)$ 和第四个街道峡谷 $V_4 (x/H=12.5)$ 内垂直剖面上流向速度和湍流动能的变化趋势。由图可知,3种 $k-\varepsilon$ 湍流模型在垂直方向 $z/H < 1$ 的高度范围内,均能较好地预测流向速度和湍流动能的变化趋势,模拟结果和风洞数据吻合度较好;但在 $z/H > 1$ 的高度范围内,湍流动能的数值结果都低于风洞实际数据,这可能是由于模型上方流动不可测量造成的误差,故此高度范围内所有雷诺时均方法均低估了湍流动能值。从3种 $k-\varepsilon$ 湍流模型的对比中还可发现,标准 $k-\varepsilon$ 模型在模拟流向速度剖面 $\bar{u}(z)$ 和湍流动能剖面 $k(z)$ 更优

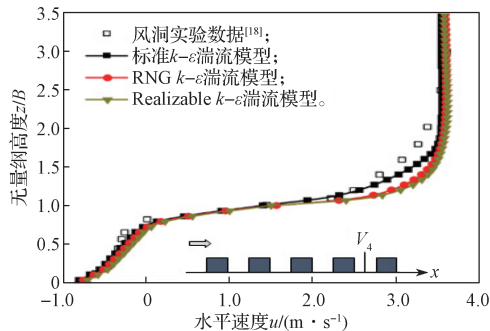
于 RNG 模型和 Realizable 模型, 因此本研究后续的数值计算中均基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。



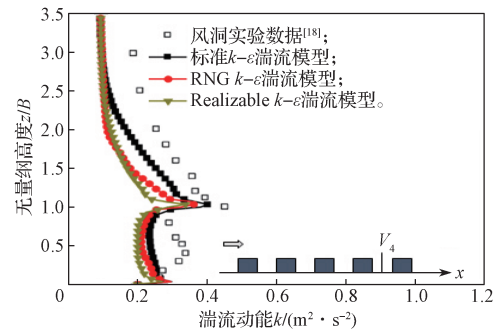
a) 第一个街道峡谷的水平速度与高度关系曲线



b) 第一个街道峡谷的湍流动能与高度关系曲线



c) 第四个街道峡谷的水平速度与高度关系曲线



d) 第四个街道峡谷的湍流动能与高度关系曲线

图3 数值计算与风洞实验结果比较

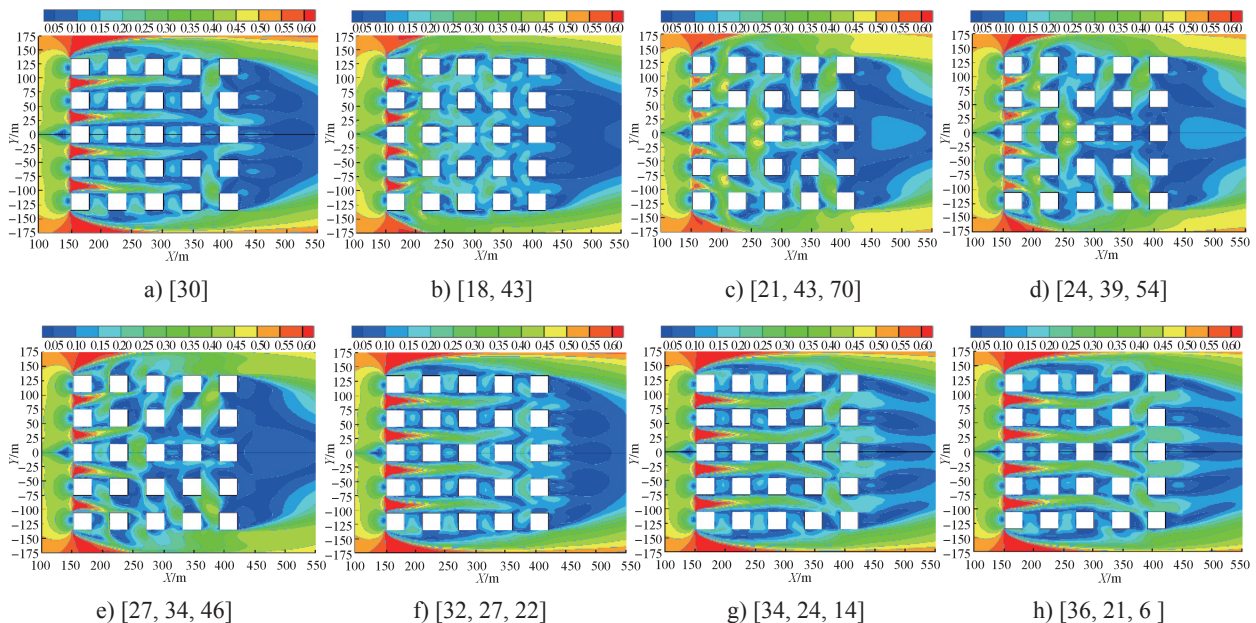
Fig. 3 Comparisons of numerical calculations and wind tunnel experimental results

2 模拟结果与分析

2.1 建筑群形态对城市冠层内气流分布的影响

速度比 VR , 是指在考虑周围建筑的影响下, 行人层高度处 ($Z=2\text{ m}$) 能感受到的可用风大小。速度比越大, 该区域的可用风量越大, 气流流动越强, 其表达式为 $VR=V_p/V_\infty$, 式中 V_p 为行人层高度风速; V_∞ 为顶部边界层风速。

图4为不同建筑群形态下行人层高度处的速度比云图。由图4可以看出, 来流风在不同形态下的城市冠层内部形成了差异较大的气流分布。与等高型的城市冠层相比, 含有建筑高度变化的城市冠层在不同区域出现了相似的速度比分布情况。主要表现为在较高建筑前方的街道峡谷内存在较大的速度比, 可能是较高的建筑会对来流风形成较强的形状阻力, 气流被迫向街道峡谷下方流动, 因此在较高建筑前方出现强烈的下洗风现象, 增强了气流流动。



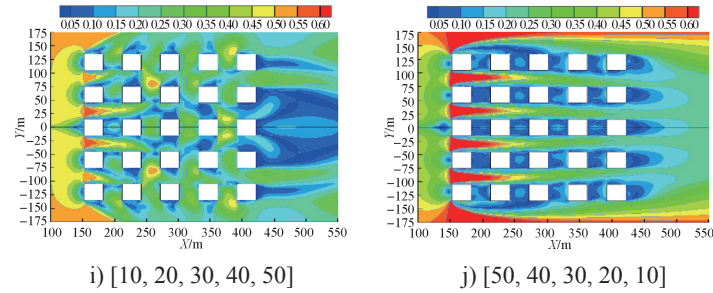


图 4 不同形态下行人层高度处的速度比云图

Fig. 4 Cloud map of velocity ratio at different heights of descending pedestrian layers in different forms

由图 4 还可看出,在较高建筑后方则出现了相反的气流分布现象,这些区域往往存在较小的速度比,形成弱风区。这可能是较高建筑后方街道峡谷内向上流动气流与来流风碰撞导致的气流停滞现象。

2.2 建筑群形态对城市冠层内通风状况的影响

空气龄 τ_p ,是指一个气团在进入某流域到达流域中的某点所用时间,也可以表示为外部洁净空气到达指定位置的时间。空气龄越小,表示该区域的通风状况越好,反之通风状况越差。

τ_p 的计算式为 $\tau_p = \bar{c}/S_p$, 式中 $\bar{c}$ 为污染物时均浓度; S_p 为污染物的初始释放强度。

不同建筑群形态下,主街道上的空气龄变化趋势如图 5 所示,图中凸型城市冠层取工况 3,凹型城市冠层取工况 8,后同。由图可知,在 6 种建筑群形态下,凸型城市冠层主街道上的空气龄最大,递增型和递减型城市的最小。与等高型的城市冠层相比,凸型城市冠层主街道上的空气龄最大,增长了 29.4%,其余形态下的空气龄最大分别降低了 12.0% (交错型)、24.2% (凹型)、24.7% (递增型)、27.2% (递减型)。同时,分别对比了凸型和凹型城市冠层的 3 种建筑高度下的空气龄,比较发现,增大建筑群的高度差可以降低主街道上的空气龄,但总体降低的程度较小。

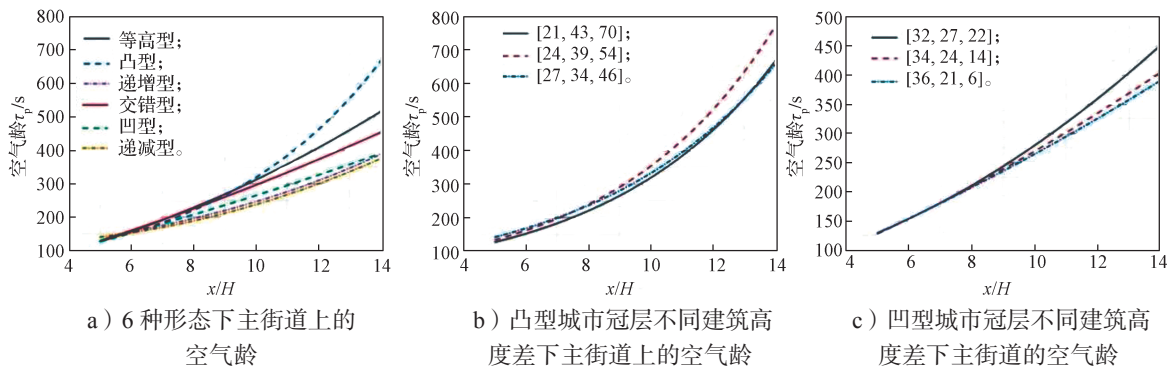


图 5 不同形态下主街道上的空气龄变化曲线比较

Fig. 5 Comparison of air age change curves on main streets in different forms

图 6 给出了不同建筑群形态下街道峡谷内的平均空气龄变化情况。

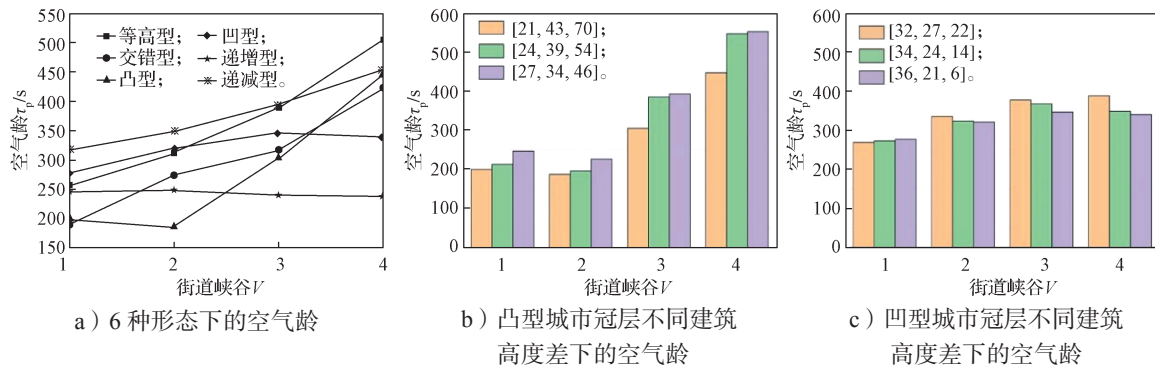


图 6 不同形态下街道峡谷内的空气龄变化比较

Fig. 6 Comparison of air age changes in street canyons in different forms

图 6 中结果表明,通过改变建筑群的形态,不同街道峡谷处会出现差异较大的空气龄值。空气龄较大

的区域一般出现在较高建筑物的背风侧,这与前面提到的弱风区有关,因此存在较差的通风状况。相反,较高建筑迎风侧的通风状况较好。在6种建筑群形态中,递增型城市冠层街道峡谷内的通风状况是最好的,这是由于下洗风现象促进了每个街道峡谷内的通风换气能力。等高型和递减型城市冠层街道峡谷内的通风最差。一方面,因为建筑高度发生变化有利于外界气流进入街道峡谷;另一方面,由于较高建筑物位于上游,阻挡了空气进入各个街道峡谷内部。

2.3 建筑群形态对城市冠层内放射性核素滞留时间的影响

滞留时间 τ_c ,是指污染物从进入某一区域或者在该区域生产开始到离开该区域的时间,较大的滞留时

间表征较慢的污染物去除速率。

$$\text{平均污染物浓度 } \theta \text{ 的表达式为 } \theta = \frac{1}{V_0} \iiint \bar{c} dx dy dz,$$

式中 V_0 为街道峡谷的体积。

$$\text{滞留时间 } \tau_c \text{ 的表达式为 } \tau_c = \theta / S_p。$$

不同建筑群形态下的街道峡谷滞留时间如图7所示。当建筑阵列出现高度变化时,不同区域的气流分布会极大程度影响街道峡谷内放射性核素的扩散,导致不同街道峡谷内核素滞留时间存在明显差异。在区域一($y = -15 \sim 15$ m)内,沿流动方向上各个街道峡谷内的核素滞留时间逐渐递减,且不同建筑阵列形态下的核素滞留时间较为接近(见图7a)。

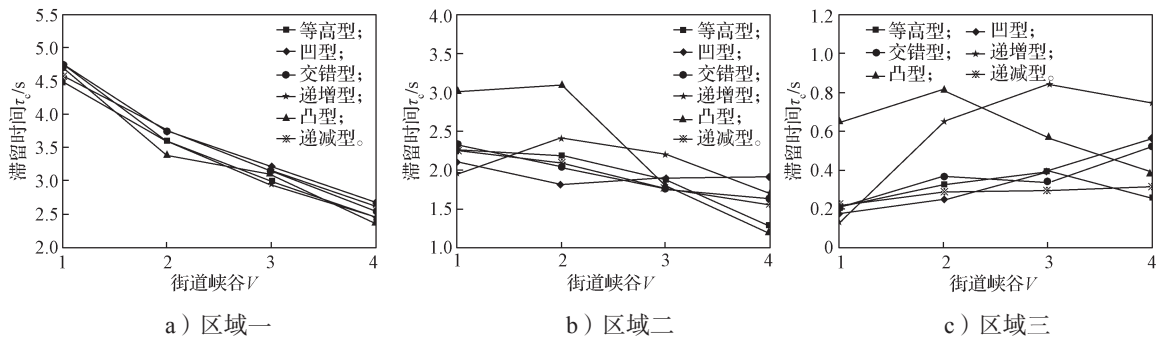


图7 不同形态下街道峡谷内的核素滞留时间比较

Fig. 7 Comparisons of retention time in street canyons in different forms

在区域二($y = 45 \sim 75$ m)和区域三($y = 105 \sim 135$ m)内,沿流动方向上各个街道峡谷内的核素滞留时间受建筑阵列形态的影响较大(见图7b和c)。数值结果表明,在等高型的城市冠层中,核素滞留时间在第二或第三个街道峡谷中最大。交错形态的城市冠层中,相邻街道峡谷内的核素滞留时间大小差异明显,在较高建筑迎风侧的街道峡谷内有较小的滞留时间,而在较高建筑背风侧有较大的核素滞留时间。这与速度比的分布规律一致,说明风的可用性越大,对放射性核素的稀释扩散效果越好。凸型和凹型城市冠层中沿流动方向上各个街道峡谷内的核素滞留时间大小变化正好相反,凸型建筑阵列中沿流动方向上的核素滞留时间为先增大后减小的变化趋势,在第二个街道峡谷中有最大的滞留时间;而凹型城市冠层中沿流动方向上的核素滞留时间为先减小后增大的变化趋势,在第二个街道峡谷中有最小的滞留时间。同样地,递增型和递减型城市冠层的核素滞留时间也有类似的现象。

图8显示了凸型和凹型城市冠层中建筑高度差对街道峡谷核素滞留时间的影响。

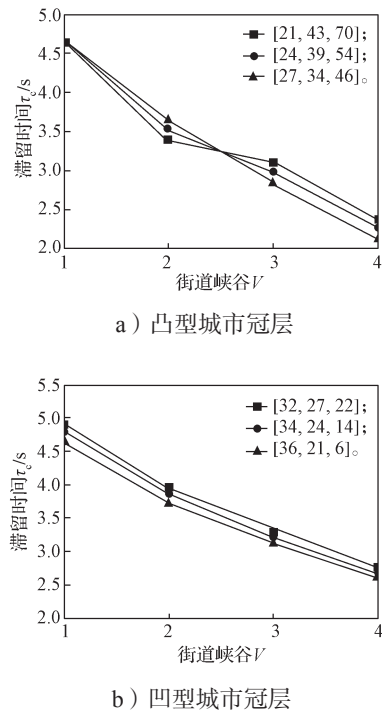


图8 建筑高度差对滞留时间的影响

Fig. 8 Influence of height difference of buildings on residence time

由图 8 可看出,凸型城市冠层中各个街道峡谷内的核素滞留时间随着相邻建筑高度差的增加而增加,凹型城市的结果则相反。城市冠层中污染物的稀释扩散不仅取决于通风状况,还与其迁移路径有关。放射性核素的散布区域极大程度上取决城市冠层的内部环境。在较高建筑迎风侧的街道峡谷内虽然存在较小的空气龄分布,但却有较大的污染物滞留时间,这说明城市冠层的几何形态是影响放射性核素迁移扩散的主要因素。

2.4 建筑群形态对放射性核素大气弥散因子的影响

大气弥散因子 ADF , 指放射性核素经大气扩散以后,下游区域某点处的浓度与源强之比。本文采用归一化的方法处理了 CFD 模型中的放射性核素的计算浓度,定义大气弥散因子 ADF 表达式如下:

$$ADF = \frac{1}{q_v \cdot C_0 \cdot V} \iiint \bar{c} dx dy dz。$$

式中: C_0 为污染物初始浓度; q_v 为放射性核素氢释放源处的体积流量。

不同城市冠层形态的大气弥散因子见表 2。

表 2 不同城市冠层形态的大气弥散因子比较

Table 2 Comparison of atmospheric dispersion factors in different urban canopy forms

城市冠层形态	建筑高度 /m	大气弥散因子 /(10 ⁻⁴ s·m ⁻³)					
		150 m	300 m	450 m	600 m	750 m	900 m
等高型	30	6.25	2.60	1.73	1.32	1.070	0.900
交错型	18, 43	6.11	2.59	1.74	1.25	0.972	0.807
	21, 43, 70	6.14	2.58	1.47	1.01	0.823	0.707
凸型	24, 39, 54	6.15	2.47	1.41	1.01	0.833	0.721
	27, 34, 46	6.21	2.52	1.54	1.11	0.906	0.776
	32, 27, 22	6.50	2.73	1.86	1.39	1.120	0.943
凹型	34, 24, 14	6.15	2.59	1.79	1.33	1.070	0.895
	36, 21, 6	6.19	2.78	1.81	1.34	1.060	0.887
递增型	10, 20, 30, 40, 50	5.88	2.42	1.59	1.04	0.843	0.716
递减型	50, 40, 30, 20, 10	5.86	2.61	1.80	1.33	1.060	0.879

由表 2 可知,大气弥散因子随下游距离的增加而减小,但减小的趋势逐渐变缓。在下游距离为 150 m 处有相对较大的 ADF 值,而在其下游距离为 300 m 处的 ADF 值约降低了 2/5。这是因为当下游距离为 300 m 时,放射性核素的大气弥散过程受到建筑群的机械扰流作用,湍流流动加强,增强了放射性核素的迁移与扩散。在下游距离为 450~900 m 范围内,放射性核素的大气弥散过程只受到建筑群尾流区的影响,对来流风的扰动减弱,因此大气弥散因子的降低程度逐渐变缓。对比 6 种城市冠层形态下的 ADF 值,可以发现,在下游距离 450~900 m 范围内,凸型和

递增型城市冠层的大气弥散因子最小,凹型和递减型城市冠层的大气弥散因子最大。这说明当城市冠层中心区域存在较高建筑物或沿流动方向上建筑物高度逐渐递增时,其尾流影响区域广泛,放射性核素的迁移扩散相对更好。

3 结论

1) 不同城市冠层下,在较高建筑迎风侧存在下洗风现象,气流流动强烈;相反,在较高建筑背风侧存在气流停滞现象,气流流动较弱。

2) 建筑群形态的改变对城市冠层内主街道上的空气龄影响较小,但对街道峡谷内的空气龄影响较大。在较高建筑前方的街道峡谷内通风状况较好,而在较高建筑后方的街道峡谷内通风状况较差。

3) 放射性核素的迁移扩散主要受城市冠层形态的影响较大,较高建筑迎风侧的峡谷内存在较大的滞留时间。峡谷内滞留时间与空气龄不一定存在正相关关系,即通风良好的街道峡谷不一定有较小的滞留时间,而通风较差的街道峡谷也不一定有较大的滞留时间。

4) 在城市冠层区域,受建筑群的机械扰流影响,大气弥散因子明显降低。在下游距离 450~900 m 区域,当城市冠层为凸型和递增型时,在尾流作用影响下,放射性核素的迁移扩散相对更好。

参考文献:

- [1] 李 强, 陈 擎, 王继斌, 等. 世界铀资源现状与我国核电发展资源保障的对策建议 [J]. 中国矿业, 2023, 32(3): 1-9.
LI Qiang, CHEN Qing, WANG Jibin, et al. Current Situation of Uranium Resources in the World and Suggestions on Resource Guarantee of Nuclear Power Development in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(3): 1-9.
- [2] 郭秋菊. 北京大学辐射防护科研组环境放射性核素研究进展 [J]. 科学通报, 2023, 68(9): 1104-1111.
GUO Qiuju. Research Progress on Environmental Radionuclides by the Radiation Protection Research Group, Peking University[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(9): 1104-1111.
- [3] 谢 东, 王汉青, 刘泽华, 等. 铀矿通风尾气中气态放射性核素氡大气扩散数值模拟 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 829-834.
XIE Dong, WANG Hanqing, LIU Zehua, et al. Numerical Simulation of Atmospheric Dispersion of Gas Radioactive Nuclides Radon from Uranium

- Ventilation Shaft Exhausts[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2013, 44(2): 829–834.
- [4] 杨 会, 张 茜, 朱 辉. 二维城市街谷机动车污染物扩散数值模拟 [J]. *桂林航天工业学院学报*, 2017, 22(4): 375–381.
- YANG Hui, ZHANG Qian, ZHU Hui. Numerical Simulation of Vehicle Pollutant Diffusion in Two-Dimensional Urban Streets and Valleys[J]. *Journal of Guilin University of Aerospace Technology*, 2017, 22(4): 375–381.
- [5] HANG J, LI Y G, SANDBERG M. Experimental and Numerical Studies of Flows Through and Within High-Rise Building Arrays and Their Link to Ventilation Strategy[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(10): 1036–1055.
- [6] 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.
- [7] MEI S J, LIU C W, LIU D, et al. Fluid Mechanical Dispersion of Airborne Pollutants Inside Urban Street Canyons Subjecting to Multi-Component Ventilation and Unstable Thermal Stratifications[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 1102–1115.
- [8] 陈迎锋, 张 奎, 商学利, 等. 某场所放射性核素场内扩散规律分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(11): 1572–1578.
- CHEN Yingfeng, ZHANG Kui, SHANG Xueli, et al. An Analysis of the Radionuclide Diffusion Rule at a Radioactive Site[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(11): 1572–1578.
- [9] SHA C Y, WANG X M, LIN Y Y, et al. The Impact of Urban Open Space and ‘Lift-Up’ Building Design on Building Intake Fraction and Daily Pollutant Exposure in Idealized Urban Models[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1314–1328.
- [10] 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.
- [11] CHENG W C, LIU C H, LEUNG D Y C. Computational Formulation for the Evaluation of Street Canyon Ventilation and Pollutant Removal Performance[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(40): 9041–9051.
- [12] 王 炫, 杜风雷, 王德忠, 等. 核电厂大型自然通风冷却塔对气载流出物扩散的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1695–1703.
- WANG Xuan, DU Fenglei, WANG Dezhong, et al. Impact of Large Natural Draft Cooling Tower on Atmospheric Dispersion of Airborne Effluent from Nuclear Power Plant[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1695–1703.
- [13] BRITTER R E, HANNA S R. Flow and Dispersion in Urban Areas[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 35: 469–496.
- [14] LEELÖSSY Á, LAGZI I, KOVÁCS A, et al. A Review of Numerical Models to Predict the Atmospheric Dispersion of Radionuclides[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 182: 20–33.
- [15] LEELÖSSY Á, MOLNÁR F, IZSÁK F, et al. Dispersion Modeling of Air Pollutants in the Atmosphere: A Review[J]. *Central European Journal of Geosciences*, 2014, 6(3): 257–278.
- [16] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 1749–1761.
- [17] 薛笋笋, 郭建侠, 汤志亚, 等. 基于 CFD 的单个建筑物风场模拟参数选择 [J]. *气象科技*, 2014, 42(4): 712–718.
- XUE Zhengzheng, GUO Jianxia, TANG Zhiya, et al. Parameters Selection in CFD-Based Wind Field Simulation for an Isolated Building[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(4): 712–718.
- [18] BROWN M J, LAWSON R E, DECROIX D S, et al. Comparison of Centerline Velocity Measurements Obtained Around 2D and 3D Building Arrays in a Wind Tunnel[J/OL]. [2023–08–05]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc716934/m2/1/high_res_d/783425.pdf.
- (责任编辑: 廖友媛)