

南北向街谷内热不稳定流场日变化规律的模拟研究

张云伟¹, 许 雯¹, 王晴茹¹, 苏军伟¹, 黄 宇², 顾兆林¹

1. 西安交通大学 地球环境科学系, 西安 710049

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

摘要: 城市街谷内热不稳定流动是促进污染物扩散的重要影响因素之一。本文基于街谷内热平衡分析, 结合大涡模拟方法, 研究了一个南北走向的城市街谷内温度、风场的日变化特征, 并分析了壁面对流换热及长波辐射对街谷内环境的影响。结果显示: 壁面对流换热是影响街谷内温度、风场的主要因素, 而长波辐射的影响非常小, 长波辐射引起街谷内空气温度升高不足对流换热影响的 10%, 而其对平均风速和脉动量的影响更是在 2% 和 1% 以内; 街谷内空气温度从早上开始逐渐增加, 到 15:00 的时候达到最大, 可达 311 K (38°C); 上午时段, 迎风面壁面热浮力减弱街谷内风速, 街谷底部和迎风墙侧的脉动量根均方值较大, 而下午时段街谷顶部的脉动量根均方值达到最大。街谷内不同位置和不同时段内, 通过建筑材料选择和表面结构设计, 适当调控建筑壁面的温度, 可以促进街谷内温度分布和空气流通改善。

关键词: 城市街谷; 热平衡模型; 日变化过程; 数值模拟

Simulation on diurnal variation of thermal unsteady flow in a north—south orientated street canyon

ZHANG Yunwei¹, XU Wen¹, WANG Qingru¹, SU Junwei¹, HUANG Yu², GU Zhaolin¹

1. Department of Earth and Environmental Sciences, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Thermal unsteady flow in urban street canyon is one of the important factors to promote the dispersion of pollutants. As the diurnal variation of solar radiation, wall heating patterns inside urban street canyons changed, and hence influenced the air flow and pollutant dispersion characteristics. Better understanding the diurnal variation of thermal unsteady flow inside urban street canyons would be helpful for air pollution mitigation by, e.g., reasonable urban planning. *Materials and methods* Based on the heat balance model and the large eddy simulation method, numerical simulations were conducted to investigate the air flow and pollutant dispersion characteristics and diurnal variation features in a north—south orientated street canyon. *Results* The wall heat transfer was shown to be the main factor affecting air temperature and wind

收稿日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-12-18; 网络出版: 2020-12-29

Received Date: 2020-05-06; Accepted Date: 2020-12-18; Online first: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977182, 41861144021); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG1844); 陕西省自然科学基础研究计划 (2019JM-387)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41977182, 41861144021); Open Foundation of the State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG1844); Basic Research Plan of Natural Science of Shaanxi Province (2019JM-387)

通信作者: 顾兆林, E-mail: guzhaolin@mail.xjtu.edu.cn

Corresponding Author: GU Zhaolin, E-mail: guzhaolin@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 张云伟, 许 雯, 王晴茹, 等. 2021. 南北向街谷内热不稳定流场日变化规律的模拟研究 [J]. 地球环境学报, 12(3): 322–332.

Citation: Zhang Y W, Xu W, Wang Q R, et al. 2021. Simulation on diurnal variation of thermal unsteady flow in a north—south orientated street canyon [J]. Journal of Earth Environment, 12(3): 322–332.

field in the street canyon, and the effects of long wave radiation was very weak. The air temperature increase caused by long wave radiation was less than 10% of that induced by convective heat transfer, while the effects of long wave radiation on average wind velocities and the turbulent fluctuation were less than 2% and 1%, respectively. Air temperature increased from morning to 15 : 00, could up to 311 K (38°C), and then decreased. In the morning, the windward wall thermal buoyancy reduced the wind speed in the street canyon, and turbulence near the road and building walls was larger; while in the afternoon, turbulence at the top of the canyon of maximum value. **Discussion** In the morning, the dispersion of vehicle exhausted inside a north—south orientated street canyon would be efficient in the lower part of the canyon, as the turbulence near the road and building walls were large. While in the afternoon, the escaping coefficient of pollutant on top of the canyon would be larger, but the inside canyon dispersion of pollutant was worse. **Conclusions** Appropriately adjusting the wall temperature from designing the materials and structures of building wall would improve the air temperature and air ventilation in urban street canyons. In the morning, as the increasing of air temperature, the thermal unsteady flow inside the urban street canyon would promote the dispersion of vehicle exhausts. **Recommendations and perspectives** Tree plantings in city avenues were generally expected to improve the thermal comfort conditions. And then, the influence of tree plantings on air flow and the diurnal variation characteristics should be investigated in our future works.

Key words: urban street canyon; heat balance model; diurnal variation; numerical simulation

近三十年来, 我国的城市化发展十分迅速, 截至2016年底, 我国城镇化率已达到57.35%, 比2000年提高了21.15% (国家统计局, 2016)。然而, 一系列城市环境问题开始凸显, 如城市热岛效应、空气污染严重等, 已经严重阻碍了城市经济及社会发展 (Shao et al, 2006), 并影响了城市居民的身体和心理健康。随着高密度城市建设的快速发展, 一系列的城市规划建设问题逐渐出现, 如建筑定位、建筑群体组合方式不合理, 绿地、水体面积大量减少等。这些问题会使城市原有的自然下垫面改变, 同时城市空间布局不合理还会使城市的通风状况不断恶化, 以及城市人为热的排放等都会对城市居民的热舒适感造成严重影响 (Zhang and Gu, 2013)。城市街谷主要由道路和道路两侧建筑物组合而成, 与其周围建筑作为城市冠层的基本单元, 是城市大气边界层的重要组成部分, 具有显著的街谷微气候特征 (顾兆林和张云伟, 2011, 2014)。街谷热环境的形成原因除了气候条件之外, 还与街谷形态和下垫面热物性有关, 不仅直接决定了人们在户外空间的热舒适性, 同时还会影响街谷内的空气流动和污染物扩散规律 (赵敬源和刘加平, 2007; Gromke and Ruck, 2007; Gu and Zhang, 2010; 陈凡涛等, 2016; 苏军伟等, 2016; Li et al, 2017; Huang et al, 2019; Dai et al, 2020)。城市街谷作为来往车辆

尾气的主要排放场地, 同时又是居民日常活动场所之一, 其内部的空气流动与污染物的扩散与分布规律一直是国内外学者研究的热点问题。

影响街谷内热环境的现实因素有街谷高宽比、街谷走向、固体表面反射率、人为热、街谷内绿化植被等 (顾兆林和张云伟, 2014)。在受热街谷内, 空气流动主要受两大因素驱动。一是街谷顶部的背景来流, 驱动街谷内产生涡流; 另一个就是热浮力流, 主要是由于建筑物表面和地面的温度高于周围空气的温度, 在壁面附近产生向上的浮力流引起的, 而热浮力对街谷内流场的影响较为复杂。

Memon et al (2010) 通过CFD模拟研究了街谷在不同壁面受热的情况下, 来流风速和街谷形状因子对街谷内空气温度的影响。结果表明: 迎风墙受热、地面受热和背风墙受热这三种壁面受热情况都使得街谷内平均空气温度与街谷深度呈正相关, 与自由来流风速呈负相关。同时, 街谷地面受热和背风墙受热促使街谷内空气环流的强度增加; 而迎风墙受热情况下, 由于反方向的二次漩涡的产生, 使得街谷内空气环流减弱。

Allegrini et al (2013) 对四种不同的街谷表面受热情况 (即迎风墙受热、地面受热、背风墙受热和三表面均匀加热) 进行了模拟, 分别比较了四种情况下街谷内的湍动能和风速大小。研究结

果指出：在低雷诺数的情况下，街谷内流场强度从大到小依次是地面受热、三表面均匀加热、背风墙受热和迎风墙受热；且相对于其他壁面受热情况，三表面均匀加热情况下，街谷内的湍动能最大，最高湍动能出现在街谷顶部的剪切层内，其次是在迎风墙侧。

Tan and Dong (2015) 采用商业软件 ANSYS FLUENT 模拟研究了街谷在不同壁面受热情况下，街谷内污染物扩散与分布的规律。结果显示：迎风墙受热情况下，污染物主要聚集在迎风墙侧的底部，并随着二次漩涡旋转，该二次旋涡会限制污染物向外扩散；背风墙和地面受热的情况下，街谷内污染物的分布规律基本一致，都是随着主漩涡传输，并且在背风墙侧堆积，并且在此情况下，街谷内漩涡膨胀到街谷顶部，有利于污染物扩散。

已有研究表明街谷内受热及温度分布对街谷内流场和污染物扩散有着显著影响（余庄和张辉，2007；Magnusson et al, 2014；Dai et al, 2020），但是鲜有针对壁面对流换热与长波辐射对街谷内空气温度及流场影响的对比研究。

实际上，一条街谷在一天中的不同时刻，太阳照射情况不同，壁面受热方式也随之变化，从而导致街谷内流场特征发生变化。相比于分析不同受热方式的影响，对街谷内风场及污染物浓度分布的日变化规律的研究，更有助于制定改善街谷内空气质量、减少行人暴露风险的策略。因此，本文选择一条南北走向的城市街谷为对象，对该街谷内空气流动的日变化过程进行模拟研究，并对比分析对流换热与长波辐射的影响。

1 街谷模型及验证

1.1 街谷内热平衡模型

街谷内空气热平衡主要受壁面对流换热和长波辐射、人为热及太阳短波辐射等因素的影响，其中人为热源强度在不同场所差异较大，暂不考虑。所以，街谷内空气热平衡模式主要受长波辐射和各表面对流换热两个主要因素影响，而短波辐射的影响相对较弱，可忽略（Priyadarsini et al, 2008）。因此，街谷内空气的热平衡模式可简化为：

$$\Delta Q_L + Q_H = \rho c_p V \Delta T \quad (1)$$

式中： ΔQ_L 为大气净长波辐射，单位为 W； Q_H 为对流换热通量，单位为 W； ρ 为空气密度，取值 $1.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； c_p 为空气定压比热容，取值

$1012 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； V 为街谷内空气总体积，单位为 m^3 ； ΔT 为街谷内空气温度变化量，单位为 $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

大气在吸收外来长波辐射的同时本身也会向外发射红外长波辐射，有时其放射量甚至会超过其吸收量，因此，必须同时考虑大气长波辐射的吸收和辐射（李万彪，2010），可由式(2)计算：

$$\Delta Q_L = \alpha_a (Q_{L\downarrow} + A_w \times \varepsilon_w \times \sigma \times T_w^4) - A_{air} \times \varepsilon_a \times \sigma \times T_{air}^4 \quad (2)$$

式中： $Q_{L\downarrow}$ 为大气逆辐射，单位为 W； α_a 为大气长波辐射吸收率； ε_w 为壁面长波辐射率； ε_a 为大气长波辐射率，根据基尔霍夫定律 $\alpha_a = \varepsilon_a$ ； T_w 为壁面温度，单位为 K； T_{air} 为大气温度，单位为 K； A_w 、 A_{air} 为壁面面积和街谷内空气表面积，单位为 m^2 ； σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，取值 $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

在有限尺寸大小的街谷内，可忽略空气对大气逆辐射的吸收（张宇峰，2016）。

对流换热主要是指在有流体流经表面时所发生的热量传输现象。在裸露街谷内，主要是建筑表面、地面与空气的对流换热（Campbell and Norman, 1999）。因此，裸露街谷内：

$$Q_H = H_{wall} A_w (T_w - T_{air}) \quad (3)$$

式中： H_{wall} 为对流换热系数，主要与固体表面附近风速有关，单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

1.2 控制方程及求解

本文湍流模拟采用大涡模拟方法，亚格子模式选用 Smagorinsky (1963) 模式，Navier-Stokes 方程经过滤波后可表示为：

(1) 连续方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

(2) 动量方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \nu_{SGS}) + (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] + g\beta(\bar{T} - T_o)\delta_{ij} + S_i \quad (5)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{T} \bar{u}_j = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}] + S_T \quad (6)$$

式中： i, j 为张量指标，取值为 1, 2, 3，分别对应空间的 x, y, z 方向； u_1, u_2, u_3 分别表示速度的 3 个分量—— u, v, w ，单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； t 为时间，单位为 s； P 为大气压强，单位为 Pa； S_i, S_T 分别是动量方程和能量方程的源项； ν 和 ν_{SGS} 分别是空气黏

性和亚格子黏性, 单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; Pr 、 Pr_{SGS} 分别是 Prandtl 数和亚格子 Prandtl 数, 分别取 0.72 和 0.33 (Uehara et al, 2000); δ_B 为 Kronecker 函数。

本文数值模拟采用 OpenFOAM 软件包实现, 基于有限容积方法对控制方程进行离散, 并采用 PIMPLE 算法处理速度和压力的耦合问题。

1.3 模型验证

本文通过与 Uehara et al (2000) 的风洞试验结果对比来验证数值模拟方法的准确性。街谷模型的横截面示意图如图 1 所示。街谷尺寸大小是 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 分别对应流向 (x 方向)、垂直方向 (y 方向) 和展向 (z 方向), 街谷形状因子为 1。地面温度 T_g 为 352 K, 其他壁面温度为 293 K, 来流空气温度 T_{in} 为 293 K, 壁面长波辐射系数取 0.9, 建筑物上方区域来流初始风速分布呈指数分布, 由下式计算:

$$u_z = U_f \left(\frac{z-H}{b} \right)^{0.299} \quad (7)$$

式中: U_f 为建筑物顶部来流参考风速, 本文取值 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; H 为街谷高度, 本文取值 0.1 m; b 为街谷顶部到计算区域顶部的距离, 本文 $b=2H$ 。

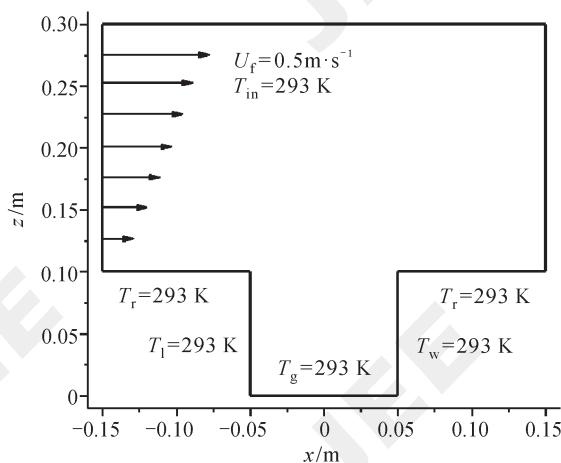


图 1 街谷模型的横截面示意图

Fig. 1 Sketch map on the cross section of the street canyon model

流向和展向上为循环边界条件, 顶部采用滑移边界条件, 建筑物表面为壁面边界条件。街谷内网格分辨率 $N_x \times N_z \times N_y$ 为 $20 \times 20 \times 40$, 在壁面附近和建筑顶部高度进行网格加密, 近壁面最小网格为 0.003 m, 离壁面较远的区域采用粗网格, 网格渐变比例约 1.1, 其中 N_x 、 N_z 、 N_y 分别代表街谷内计算区域在 x 、 z 、 y 三个方向上的网格

数。模拟条件与 Uehara 实验中 $R_b=-0.21$ 的案例所对应条件一致。

图 2 所示为街谷中心垂线上 ($x=0$) 无量纲流向速度与温度的统计平均结果比较。其中, 算例 “present simulation” 中只考虑壁面对流换热; 而算例 “present simulation + radiation” 既考虑了壁面对流换热又考虑了壁面长波辐射, 以分析壁面长波辐射对街谷内流场和温度场的影响。总体上, 本文数值模拟结果与风洞试验数据吻合得较好, 变化趋势完全一致。其中, 街谷顶部的速度变化率比风洞实验结果要小, 而温度变化在 $0.1H$ 高度附近与实验结果差别较大。

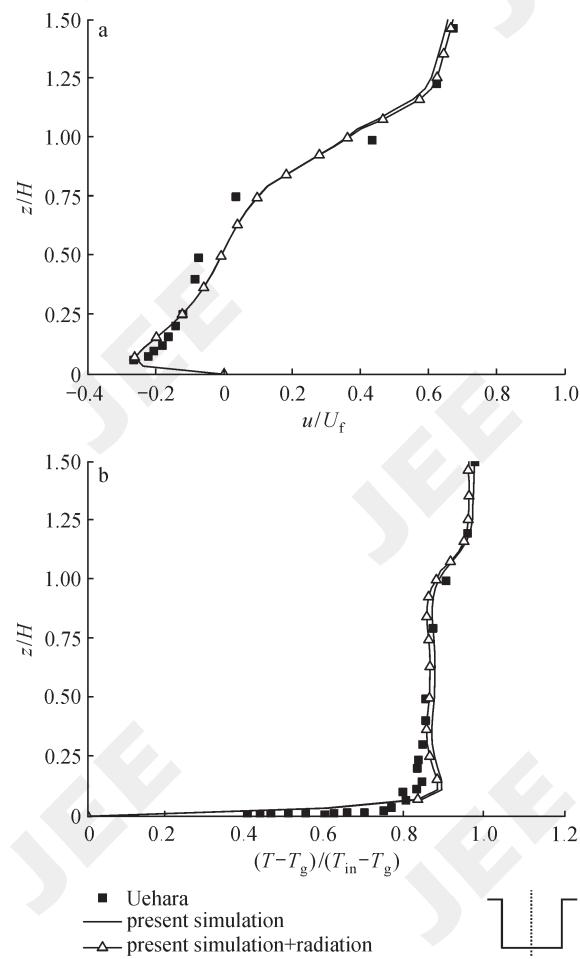


图 2 街谷中心垂线上 ($x=0$) 流向速度 (a) 与温度 (b) 的比较

Fig. 2 Comparison of the streamwise velocity (a) and temperature (b) on the central vertical line ($x=0$) of the street canyon

表 1 给出了两个数值模拟算例的结果与 Uehara 风洞实验结果的误差分析。速度和温度的误差都在 5% 以内, 而考虑了壁面长波辐射以后,

偏差值变化也不到 0.5%。可见，表面辐射虽然能增加街谷内温度，但对街谷内温度场和流场的影响很小。

表 1 模拟结果与实验数据的误差

Tab. 1 Error analysis between simulated and measured data

算例 Case	误差	Error/%
	$(u_{\text{simulation}} - u_{\text{Uehara}})/U_f$	$(T_{\text{simulation}} - T_{\text{Uehara}})/(T_{\text{in}} - T_g)$
present simulation	3.4	3.1
present simulation+ radiation	3.3	2.9

图 3 分别展示了街谷中心垂直线上 ($x=0$) 流向速度脉动量根均方值 u_{rms} 垂直方向速度脉动量根均方值 w_{rms} 的分布。总体上，本文模拟结果与 Uehara et al (2000) 风洞实验结果变化趋势一致，脉动量根均方最大值主要分布在街谷顶部和地面附近区域；但是本文模拟结果在数值上比 Uehara et al (2000) 风洞实验结果略小，原因可能是在模拟过程中每个节点上样本数据的采集频率较风洞试验的偏高，造成模拟试验的数据样本量较多，从而使得模拟结果的脉动量变化较为缓和。另外，本文模拟中网格数量相对较少，也会导致湍流模拟精度偏低。

总体而言，本文所采用的数值模拟方法无论是从定性还是定量上都能够较好地模拟出街谷内热不稳定流场及湍流特征。同时关于壁面长波辐射对街谷热环境的影响分析结果显示，作为情景模拟，街谷内的温度分布以及流场分布特征主要是受壁面对流换热的影响，受壁面长波辐射影响不大。

2 街谷内流场日变化模拟

2.1 街谷模型与算例安排

为了更接近实际情况，本文以西安市和平路街谷为样本 (Zhang et al, 2012; 张云伟等, 2016)，构建一个街道宽 20 m，建筑高 20 m，展向 (y 方向) 取 40 m，形状因子为 1 的理想街谷模型；街谷内网格数 $N_x \times N_z \times N_y$ 为 $30 \times 30 \times 40$ ，在壁面附近和建筑高度采用细网格，离壁面较远的区域采用粗网格，靠近壁面的最小网格尺寸为 0.16 m，计算区域顶部网格最大为 2.5 m；街道是南北走向，来流为东风，水平方向风速 u 在建筑物上方区域为指数分布，由公式(7)计算，其中 U_f 取值 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； H 为街谷高度，取值 20 m，则 b 取定值

40 m；垂直方向速度 w 和展向速度 v 的初始值都是 0；来流和固体壁面的温度根据夏季在和平路街谷内现场测量的结果确定 (Zhang et al, 2012)，不同时刻温度设置条件如图 4 所示。流向和展向分别采用循环边界条件；顶部为滑移边界条件，街谷各固体表面为无滑移壁面边界条件。需要说明的是，在进行实际尺寸街谷内风环境模拟时，本文所选网格是合适的 (顾兆林和张云伟, 2014)。

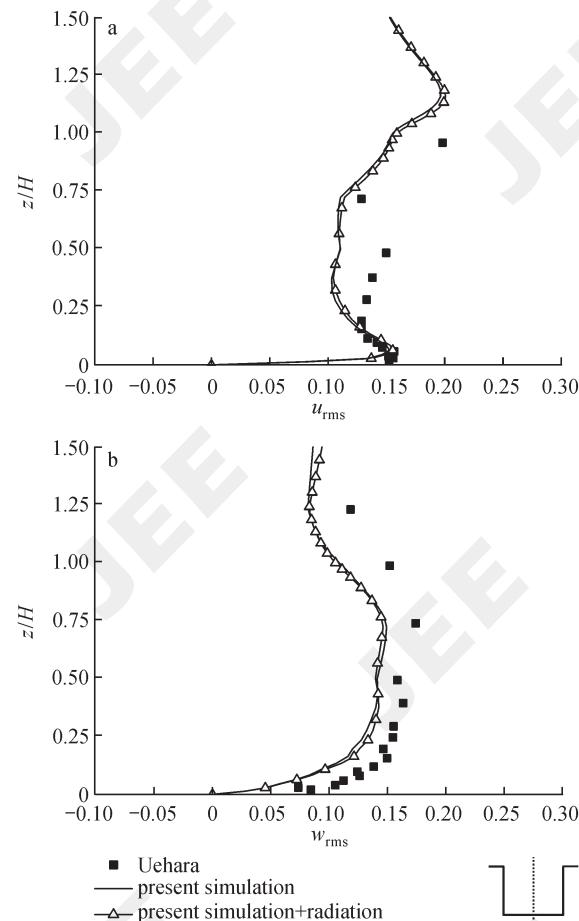


图 3 街谷中心垂直线上 ($x=0$) 流向 (a) 和展向 (b) 脉动量根均方值比较

Fig. 3 Comparison of the streamwise (a) and spanwise (b) root mean square values of velocity on the central vertical line ($x=0$) of the street canyon

模拟中仍然设计了两组算例，在“case1”组算例中，只考虑壁面对流换热，而在“case2”组算例中，既考虑壁面对流换热，又考虑壁面长波辐射的影响，算例编号如表 2 所示，末尾的数字代表算例对应的时间，比如 case1 就包含 case1-7 至 case1-19 这 7 个算例，分别对应不同的时间。模拟时间步长为 0.04 s，收敛判据为残差小于 10^{-5} ，模拟时间为 4000 s。

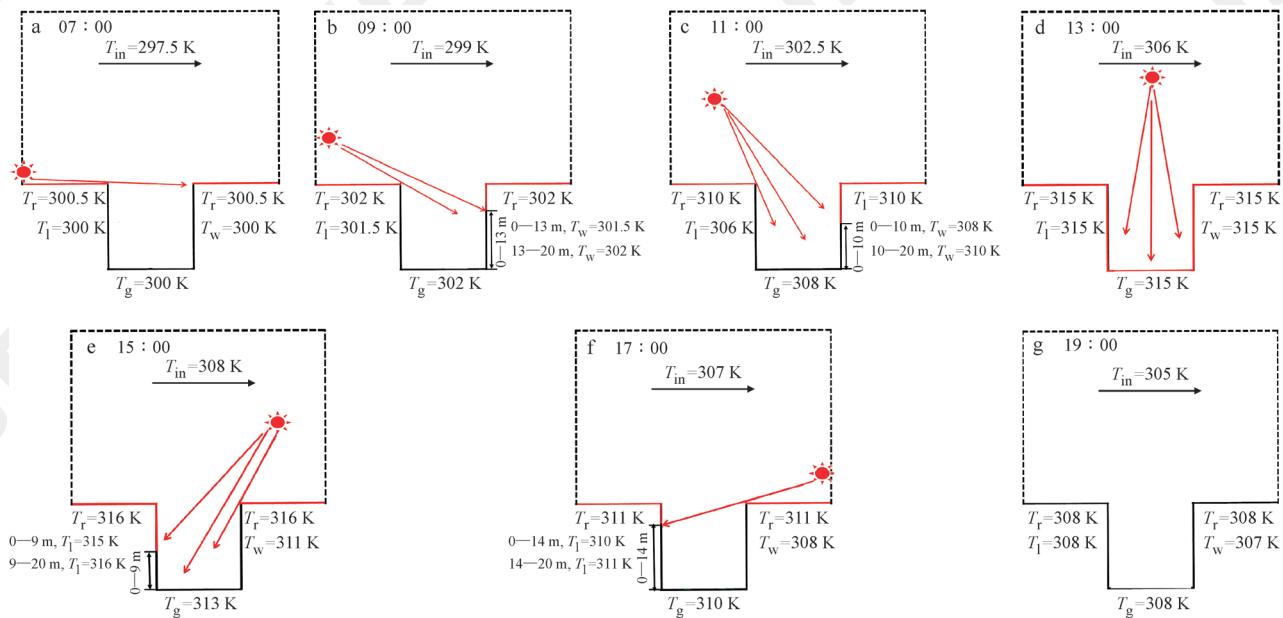


图 4 在西安市和平路街谷内测得不同时刻温度分布

Fig. 4 Temperature distribution within the street canyon measured on Heping Road street canyon in Xi'an at different time

表 2 街谷模拟算例编号

Tab. 2 Simulation cases and the number

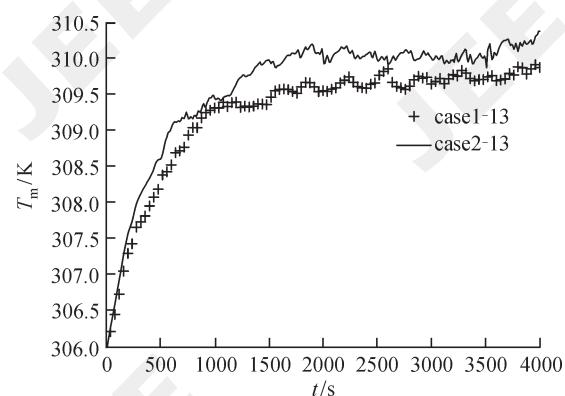
算例 Case	街谷内热不稳定流动的影响因素 Influence factors on the thermal unsteady flow	算例编号 Case number
case1	壁面对流换热 Wall surface convective heat transfer	case1-7、case1-9、case1-11、case1-13、case1-15、case1-17、case1-19
case2	壁面对流换热 + 壁面辐射 Wall surface convective heat transfer and radiation	case2-7、case2-9、case2-11、case2-13、case2-15、case2-17、case2-19

图 5 给出了算例 case1-13 和算例 case2-13 模拟的街谷内平均气温 T_m 随模拟时间的变化, T_m 是每个模拟时间步街谷区域内所有网格上空气温度的平均值。街谷内平均温度在 2000 s 后基本已经达到稳定, 因此以下情景模拟结果的统计平均在 2000—4000 s 时间区间进行。

2.2 街谷内温度场变化

图 6 和图 7 分别给出 7 个时刻街谷展向中截面的两条中心线 ($x=0$ 和 $z=10$ m) 上统计平均温度 T_{mean} 的变化曲线。本文利用 7 个不同时刻街谷热环境的模拟结果来反映街谷内热环境的日变化规律。可见, 07 : 00 以后, 街谷内空气温度逐渐升高, 15 : 00 达到最大, 可达 311 K (38℃); 15 : 00 之后街谷内空气温度逐渐降低, 19 : 00 降到最低值, 这与一天中太阳的辐射强度是呈正相关的。两种计算条件下, 街谷内温度的分布趋势是一致的,

高温区主要出现在街谷顶部和各固体表面附近, 街谷内中心位置区域的温度分布较为均匀, 壁面长波辐射的引入 (case2) 使得街谷内空气温度要大于算例 case1 的模拟结果, 但是增加量非常小。

图 5 街谷内温度 T_m 随模拟时间的变化Fig. 5 Change of temperature T_m with simulation time within the street canyon

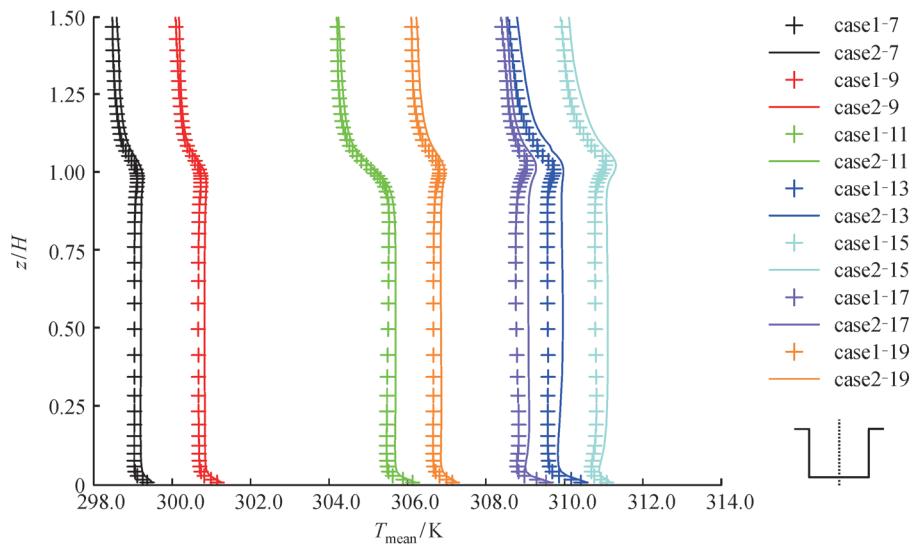


图 6 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($x=0$) 上统计平均温度 T_{mean} 的分布

Fig. 6 Distribution of mean temperature T_{mean} on the centerline ($x=0$) of the spanwise middle section in the street canyon at different time

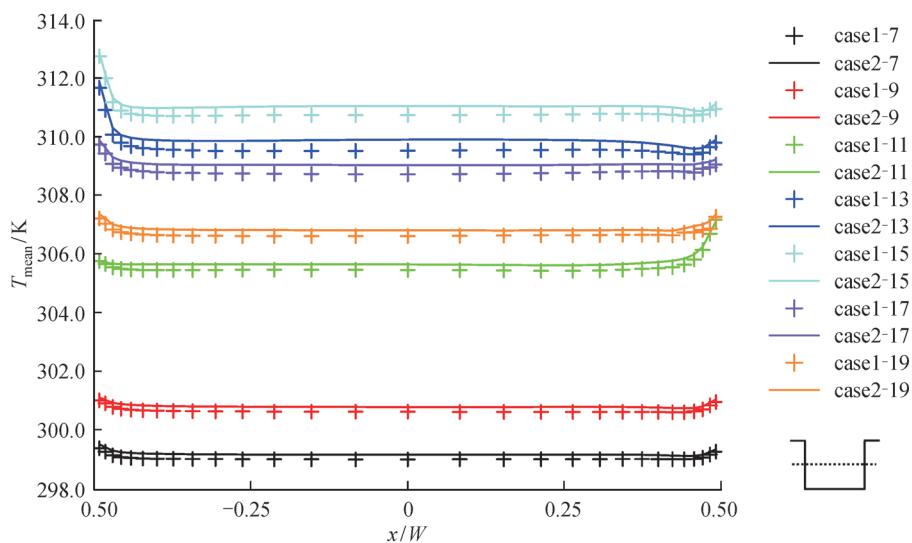


图 7 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($z=10 \text{ m}$) 上统计平均温度 T_{mean} 的分布

Fig. 7 Distribution of mean temperature T_{mean} on the centerline ($z=10 \text{ m}$) of the spanwise middle section in the street canyon at different time

表 3 给出了两组算例的空气温度相对增长量 $\Delta T/T_{\text{in}}$, 其中 ΔT 表示在街谷内流场达到稳定之后, 街谷内统计平均温度 T_{mean} 与来流初始温度 T_{in} 的差值, 即 $\Delta T=T_{\text{mean}}-T_{\text{in}}$, 代表街谷内平均空气温度的增加量。可以看出, 街谷内温度的变化主要是受壁面对流换热的影响, 壁面辐射的影响非常小; 从早上 07 : 00 到中午 13 : 00, 随着壁面温度的增加, 壁面对空气的加热也逐渐增强, 13 : 00 以后壁面加热强度开始减弱; 在不考虑长波辐射的情况下, 13 : 00 空气温度的相对增长量为

1.22%, 街谷内空气温度比来流温度高约 3.7 K; 同时刻在考虑长波辐射的情况下, 空气温度的相对增长量为 1.31%, 街谷内空气温度比来流温度高约 4.0 K。可见, 即使在正午长波辐射最强时, 长波辐射引起的街谷内空气温度升高值只有 0.3 K, 也不到对流换热影响的 10%。

2.3 街谷内风场变化

图 8 和图 9 分别是 case1 和 case2 两组算例模拟所得街谷展向中截面的两条中心线 ($x=0$ 和 $z=10 \text{ m}$) 上的统计平均速度 u/U_f 、 w/U_f 的分

布曲线。结果显示: 街谷顶部和各壁面附近风速较大, 街谷中心处风速最低。从 07 : 00 到 11 : 00, 街谷内平均风速逐渐减小, 到 11 : 00 达到最低值。这主要是因为上午这段时间, 随着迎风墙壁面温度逐渐增加, 迎风墙侧热浮力与街谷内气流主漩涡方向相反, 削弱了街谷内环流强度, 甚至在迎风壁面附近形成反向漩涡, 造成迎风墙侧垂直方向速度为正值。11 : 00 至 13 : 00 随着壁面温度与空气温差逐渐增大, 流场强度逐渐增大, 13 : 00 街谷内流场强度达到最大值。13 : 00 之后随着壁面温度逐渐降低, 壁面温度与空气温差逐渐减小, 街谷内流场强度逐渐降低,

在 19 : 00 降到最低。

表 3 街谷内空气温度相对增长量 $\Delta T/T_{in}$
Tab. 3 Relative change ratio of air temperature $\Delta T/T_{in}$ in street canyon

时间 Time	$\Delta T/T_{in}/\%$		
	case1	case2	case2-case1
07 : 00	0.59	0.63	0.04
09 : 00	0.66	0.71	0.05
11 : 00	1.05	1.10	0.05
13 : 00	1.22	1.31	0.09
15 : 00	0.93	1.02	0.09
17 : 00	0.66	0.74	0.08
19 : 00	0.57	0.63	0.06

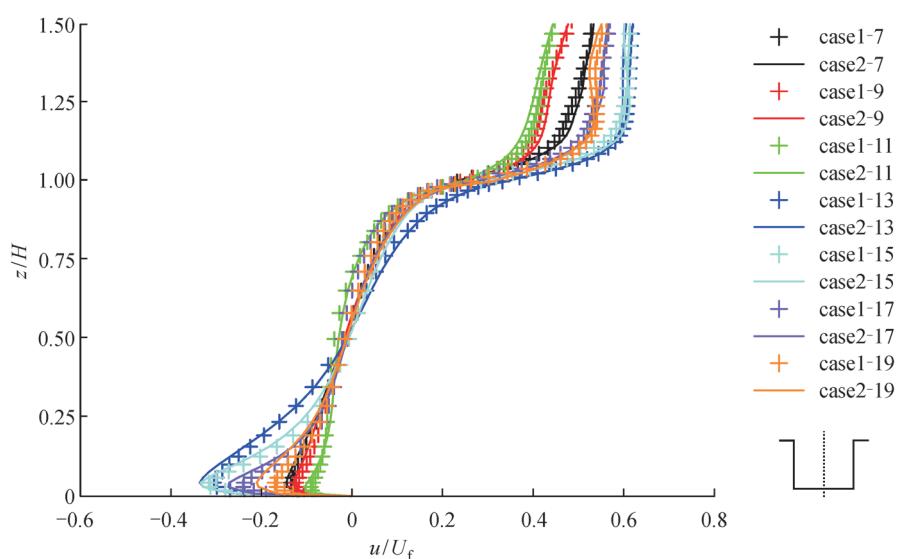


图 8 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($x=0$) 上的流向速度分布

Fig. 8 Distribution of streamwise wind velocity on the centerline ($x=0$) of the spanwise middle section in the street

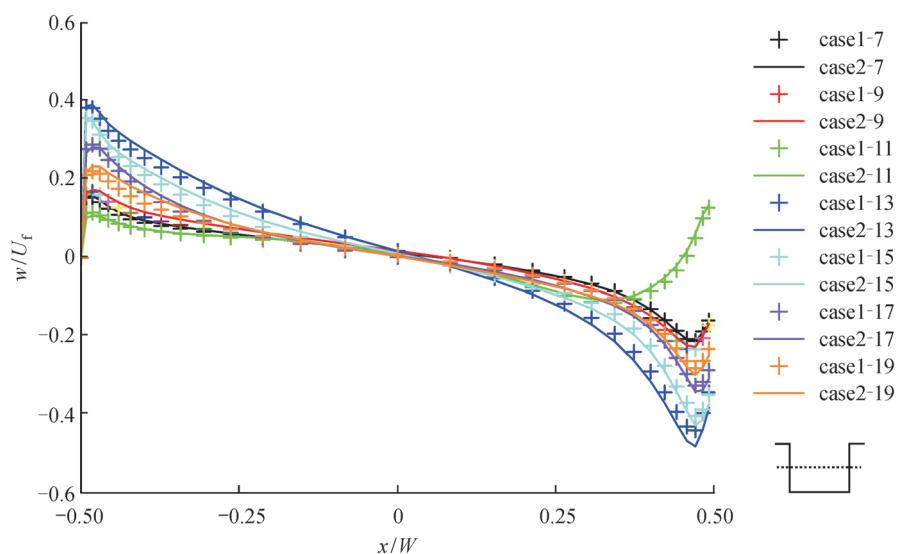


图 9 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($z=10$ m) 上的垂直方向速度分布

Fig. 9 Distribution of vertical wind velocity on the centerline ($z=10$ m) of the spanwise middle section in the street canyon at different time

总体而言，下午太阳直照背风面墙壁，背风面墙壁温度较高，背风面墙壁热浮力与街谷内气流主旋涡方向一致，加强了街谷内环流强度，因此 13 : 00 以后，下午时段街谷展向中截面上的风速总体上比上午的风速大，更有利于污染物扩散。

对 case1 和 case2 这两组算例的对比分析结果显示，7 个时刻街谷内统计平均速度的水平分布和垂直分布趋势都相差非常小，原因主要是在给定环境参数的情景模拟中，壁面辐射对街谷内温度场的影响较小，导致街谷内温度分布变化非常小，所以对街谷内平均流场的影响也较弱。

图 10 和图 11 分别是 7 个时刻 case1 和 case2 这两组算例的展向中截面的两条中心线 ($x=0$ 和 $z=10$ m) 上的脉动量根均方值 u_{rms} 、 w_{rms} 的分布。街谷内脉动量根均方值最大值主要分布在街谷顶部和各表面附近，街谷中心处最低；07 : 00、09 : 00 和 11 : 00，街谷底部和迎风墙侧的脉动量根均方值较大，主要是街谷底部和迎风墙附近向上的浮力流所致；13 : 00 和 15 : 00 街谷顶部的脉动量根均方值达到最大，在 15 : 00 之后街谷内脉动量根均方值逐渐降低。两组算例 case1 和 case2 的脉动量根均方值的水平分布和垂直分布趋势都相差很小。

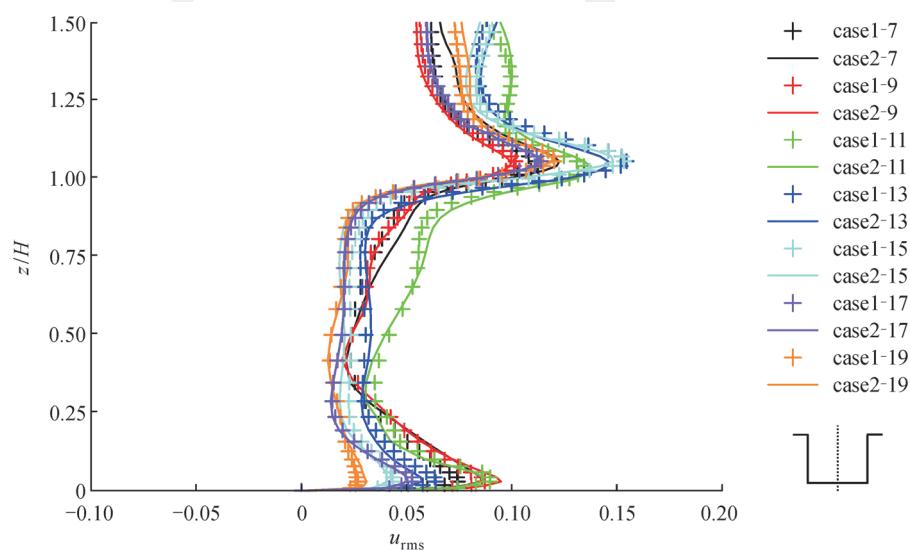


图 10 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($x=0$) 上流向速度脉动量根均方值分布

Fig. 10 Distribution of root mean square of streamwise wind velocity on the centerline ($x=0$) of the spanwise middle section in the street canyon at different time

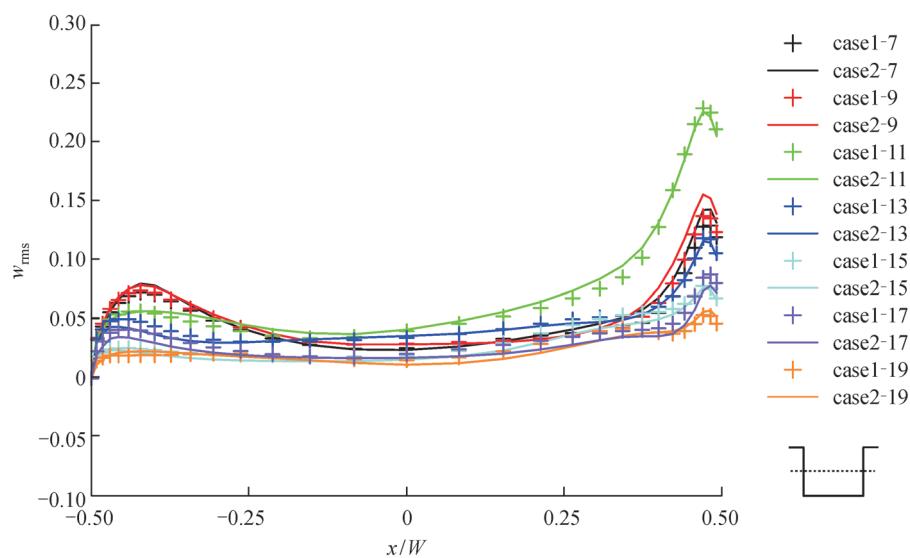


图 11 不同时刻街谷展向中截面中心线 ($z=10$ m) 上的垂向速度脉动量根均方值分布

Fig. 11 Distribution of root mean square of vertical wind velocity on the centerline ($z=10$ m) of the spanwise middle section in the street canyon at different time

其中, 从图 8—11 还可以看出算例 case1 和 case2 的平均速度和脉动量根均方值在街谷的固体壁面附近略有差异。为进一步定量地分析壁面长波辐射对街谷内流场的影响程度, 表 4 给出了算例 case2 的速度和脉动量根均方值相对于算例 case1 的绝对误差。由表 4 中数据可知壁面辐射对街谷内流场的影响很小, 对平均风速的影响小于 2%, 而对脉动量的影响更是小于 1%, 可以忽略, 这与 Priyadarsini et al (2008) 得出的结论一致。

表 4 算例 case2 的速度和脉动量根均方值的误差分析
Tab. 4 Error analysis of velocities and root mean square values of case 2

时间 Time	误差 Error/%			
	$(u_2 - u_1)/U_f$	$(w_2 - w_1)/U_f$	$u_{rms2} - u_{rms1}$	$w_{rms2} - w_{rms1}$
07 : 00	1.1	1.1	0.6	0.6
09 : 00	0.8	0.7	0.4	0.6
11 : 00	1.0	0.6	0.4	0.4
13 : 00	0.9	1.7	0.4	0.3
15 : 00	1.3	1.2	0.4	0.4
17 : 00	1.8	1.0	0.2	0.3
19 : 00	1.5	1.4	0.3	0.6

3 结论

本文基于街谷内热平衡分析, 结合大涡模拟方法, 研究了一个南北走向的城市街谷内温度、风场的日变化特征, 并分析了壁面对流换热及长波辐射对街谷内环境的影响。结果显示: 街谷内温度和风场主要受壁面对流换热的影响, 长波辐射的影响非常小, 长波辐射引起街谷内空气温度升高小于对流换热影响的 10%, 而其对平均风速和脉动量的影响更是在 2% 和 1% 以内, 可以忽略长波辐射的影响以减少计算量; 上午街谷内空气温度呈增加趋势, 直到午后气温达到最大; 气温高的区域主要出现在街谷顶部和各固体表面附近, 街谷内中心区域的空气温度分布较为均匀; 街谷内风速变化趋势与气温相反, 上午呈减弱趋势, 主要是因为上午这段时间, 随着迎风墙面温度逐渐增加, 迎风墙侧热浮力与街谷内气流主漩涡方向相反, 削弱了街谷内环流强度; 上午时段, 街谷底部和迎风墙侧的湍流脉动较强, 而下午时段街谷顶部的湍流脉动更为剧烈, 直到下午 15 : 00 之后, 街谷内湍流呈逐渐下降趋势。

街谷内温度分布、风场及湍流特征都有着规律的时空变化特征。在街谷内的不同壁面和不同时段内, 通过建筑材料的选取和建筑表面结构设

计, 适当调控建筑壁面的温度, 可以促进街谷内温度分布、空气流通及污染物扩散效果的改善, 该结果可供相关建筑设计参考。

参考文献

- 陈凡涛, 赵文吉, 晏 星, 等. 2016. 不对称街谷内 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布特征及成因 [J]. 环境工程学报, 10(3): 1333–1339. [Chen F T, Zhao W J, Yan X, et al. 2016. Vertical distribution characteristics and origin of $PM_{2.5}$ concentration in asymmetrical street canyon [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 10(3): 1333–1339.]
- 顾兆林, 张云伟. 2011. 城市街谷的空气流动与污染物扩散研究——物理模型的发展及数学模拟 [J]. 地球环境学报, 2(2): 362–373. [Gu Z L, Zhang Y W. 2011. A review of studies on air flow and pollutant dispersion in urban street canyons—development of physical model and mathematical simulations [J]. Journal of Earth Environment, 2(2): 362–373.]
- 顾兆林, 张云伟. 2014. 城市与建筑风环境的大涡模拟方法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社. [Gu Z L, Zhang Y W. 2014. Large eddy simulation methods and application for building and urban wind environment simulation [M]. Beijing: Science Press.]
- 国家统计局. 2016. 中华人民共和国 2016 年国民经济和社会发展统计公报 [R]. 北京: 国家统计局. [National Bureau of Statistics. 2016. Bulletin on statistics of national economic and social development in 2016 [R]. Beijing: National Bureau of Statistics.]
- 李万彪. 2010. 大气物理学: 热力学与辐射基础 [M]. 北京: 北京大学出版社. [Li W B. 2010. Atmospheric physics: fundamentals of thermodynamics and radiation [M]. Beijing: Peking University Press.]
- 苏军伟, 王 乐, 张云伟, 等. 2016. 隔声屏障对街道峡谷污染物扩散的影响 [J]. 环境工程, 34(10): 92–97. [Su J W, Wang L, Zhang Y W, et al. 2016. The numerical simulation of pollutant dispersion in street canyon within noise barrier [J]. Environmental Engineering, 34(10): 92–97.]
- 余 庄, 张 辉. 2007. 城市规划 CFD 模拟设计的数字化研究 [J]. 城市规划, 31(6): 52–55. [Yu Z, Zhang H. 2007. Digital model of CFD simulation design in urban planning [J]. City Planning Review, 31(6): 52–55.]
- 张宇峰. 2016. 能量平衡与街谷微气候 [J]. 建筑科学, 32(10): 96–104. [Zhang Y F. 2016. Energy balance and

- street canyon microclimate [J]. *Building Science*, 32(10): 96–104.]
- 张云伟, 王晴茹, 陈 嘉, 等. 2016. 城市街谷内 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化及影响因素分析 [J]. *中国环境科学*, 36(10): 2944–2949. [Zhang Y W, Wang Q R, Chen J, et al. 2016. Temporal and spatial characteristics of $PM_{2.5}$ concentration in urban street canyons and analysis on the affecting factors [J]. *China Environmental Science*, 36(10): 2944–2949.]
- 赵敬源, 刘加平. 2007. 城市街谷热环境数值模拟及规划设计对策 [J]. *建筑学报*, (3): 37–39. [Zhao J Y, Liu J P. 2007. Digital simulation of thermal environment and countermeasures against the planning and design for urban street canyon [J]. *Architectural Journal*, (3): 37–39.]
- Allegrini J, Dorer V, Carmeliet J. 2013. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons [J]. *Building and Environment*, 59: 315–326.
- Campbell G S, Norman J M. 1999. An introduction to environmental biophysics [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 74(4): 488–489.
- Dai Y W, Mak C M, Zhang Y, et al. 2020. Investigation of interunit dispersion in 2D street canyons: a scaled outdoor experiment [J]. *Building and Environment*, 171: 106673. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106673.
- Gromke C, Ruck B. 2007. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field [J]. *Atmospheric Environment*, 41(16): 3287–3302.
- Gu Z L, Zhang Y W, Lei K B. 2010. Large eddy simulation of flow in a street canyon with tree planting under various atmospheric instability conditions [J]. *Science China Technological Sciences*, 53(7): 1928–1937.
- Huang Y D, Li M Z, Ren S Q, et al. 2019. Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon [J]. *Building and Environment*, 165: 106385. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106385.
- Li Z T, Xu J, Ming T Z, et al. 2017. Numerical simulation on the effect of vehicle movement on pollutant dispersion in urban street [J]. *Procedia Engineering*, 205: 2303–2310.
- Magnusson S, Dallman A, Entekhabi D, et al. 2014. On thermally forced flows in urban street canyons [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(6): 1427–1441.
- Memon R A, Leung D Y C, Liu C H. 2010. Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons [J]. *Building and Environment*, 45(1): 176–188.
- Priyadarsini R, Hien W N, David K W. 2008. Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island [J]. *Solar Energy*, 82(8): 727–745.
- Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, et al. 2006. City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 4(7): 353–361.
- Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: part 1: the basic experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 91(3): 99–164.
- Tan Z J, Dong J L, Xiao Y M, et al. 2015. A numerical study of diurnally varying surface temperature on flow patterns and pollutant dispersion in street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 104: 217–227.
- Uehara K, Murakami S, Oikawa S, et al. 2000. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 34(10): 1553–1562.
- Zhang Y W, Gu Z L. 2013. Air quality by urban design [J]. *Nature Geoscience*, 6: 506. DOI: 10.1038/ngeo1869.
- Zhang Y W, Gu Z L, Cheng Y, et al. 2012. Measurement of diurnal variations of $PM_{2.5}$ mass concentrations and factors affecting pollutant dispersion in urban street canyons under weak-wind conditions in Xi'an [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 1261–1268.