

壁面绿化及热效应对浅型街谷内污染物扩散与转化的影响研究

黄远东, 王可心, 刘宇辰, 崔鹏义, 罗 杨

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 采用经风洞实验验证的 CFD 数值模型, 就壁面绿化和热效应对浅型街谷内污染物扩散和 $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 光化学转化的影响开展研究。考虑了 4 种壁面受热模式以及 4 种叶面积密度的壁面绿化模式, 并采用臭氧消耗率衡量光化学反应的剧烈程度。结果表明, 壁面受热会改变街道峡谷内的流动结构, 背风面受热和地面受热能够增加峡谷内顺时针旋涡的尺度, 迎风面受热会削弱该旋涡的尺度, 全壁面受热则会破坏旋涡结构。壁面绿化的设置能够有效降低峡谷内平均温度, 促进峡谷内旋涡结构的重构, 并且不同程度降低平均臭氧消耗率。因此, 壁面绿化对缓解城市热岛效应和光化学污染具有积极的意义。

关键词: 壁面绿化; 计算流体力学; 街道峡谷; 交通污染物; $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 光化学反应

中图分类号: X 51 **文献标志码:** A

Impacts of green walls and thermal effects on pollutant dispersion and conversion within shallow street canyons

HUANG Yuandong, WANG Kexin, LIU Yuchen, CUI Pengyi, LUO Yang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The CFD model validated by wind tunnel experiments was used to study the impacts of green walls and thermal effects on diffusion of pollutants and the $\text{NO}_x\text{-O}_3$ photochemistry within the shallow street canyons. Four wall heating scenarios and green walls with four leaf area densities were considered, and ozone depletion rate was used to measure the severity of $\text{NO}_x\text{-O}_3$ photochemistry. Results show that wall heating can change the flow structure within the street canyon. Leeward wall heating and ground heating can increase the size of clockwise vortex within the canyon, the windward wall heating can weaken the vortex size, and whole wall heating can destroy the vortex structure. However, the setting of green walls can promote the vortex structure reconstruction, effectively reduce the average air temperature in the canyon, and reduce the average ozone depletion rate. Therefore, the green walls plays a positive role in alleviating urban heat island effect and photochemical pollution.

收稿日期: 2022-07-03

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目 (20dz1204000)

第一作者: 黄远东 (1964-), 男, 教授。研究方向: 大气污染控制工程。E-mail: huangyd@usst.edu.cn

Keywords: *green walls; computational fluid dynamics; street canyon; traffic exhaust; $\text{NO}_x\text{-O}_3$ photochemistry*

街道峡谷是一种类似自然峡谷的城市结构，由两侧连续建筑物以及中央的区域构成^[1]。较低的天空视野系数，使得日间太阳辐射存储于两侧建筑壁面之中，加剧了热岛效应和光化学反应；半封闭的街谷结构进一步降低机动车尾气污染物扩散效率，严重威胁临街居民和行人的身体健康^[2-3]。

壁面绿化是近年来发展起来的一种新型立体绿化模式，研究表明其可以有效改善城市微气候环境。在不同天气下，Cuce^[4]对配置绿化的壁面和无绿化壁面进行了温度实测，结果表明：在晴天时，壁面绿化能够使墙体的平均温度降低约 6.1 K；多云天气时，则能够使墙体的平均温度降低约 4.0 K。Schettini 等^[5]进行的场地实测也得到了类似结果：在日间温度最高的时刻，壁面绿化能够降低壁面的表温约 3.0~4.5 K。Basher 等^[6]选用长寿命且能够承受更多太阳辐射的翼豆植物作为壁面绿化的主体，发现其能够降低壁面平均温度约 2.4 K，且壁面最大下降温度约 6.4 K。Jayasooriya 等^[7]进行的城市尺度环境影响研究表明，虽然壁面绿化对颗粒和气态污染物的去除能力不如传统树木，但其较小的占地面积和潜在的净化能力使其应用前景广阔。Ysebaert 等^[8]研究发现，壁面绿化对颗粒污染物的截留效果取决于颗粒物在街谷内的停留时间；在繁忙的主干道上，每平方米叶面积的壁面绿化能够截留约 $10^{10}\sim 10^{11}$ 个颗粒，可以有效降低街谷内的颗粒污染物浓度。Viecco 等^[9]使用 ENVI-met 模型就壁面绿化对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效果进行数值计算，发现最大去除率可以达到 7.5%，其主要受绿化覆盖率、污染源位置和建筑物高度等影响。

综上所述，有关研究主要聚焦在壁面绿化对街谷内颗粒污染物滤除和热岛效应的缓解，并且侧重于宽高比为 1 的标准街谷，以及单独考虑壁面绿化或太阳辐射热效应对峡谷内流场和污染物扩散的影响。近年来，大气光化学反应产生的 O_3 污染日渐严峻，但有关街谷内绿化对反应性 $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 动力学特性影响的研究却没有引起足够重视。鉴于此，本文利用经风洞实验验证的三维 CFD 模型，探究壁面绿化与热效应的耦合作用对浅型街道峡谷内污染物扩散与 $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 反应动力学的影响。

该研究可为城市规划和壁面绿化种植提供指导，以缓解城市热岛效应，改善局部空气质量。

1 研究方法

1.1 物理模型

如图 1 所示，研究采用三维全尺度街道峡谷。峡谷的高宽比 AR 和长高比分别为 0.5 和 20.0，亦称为浅型长街道峡谷。图 1(a) 和图 1(b) 展示了街道峡谷的几何模型：每个建筑物的长、宽、高分别为 $10H$ ($H=20\text{ m}$)， $1.0H$ 和 $0.5H$ ，两栋建筑物的间距(即峡谷宽度 W)为 $1.0H$ 。图 1(b) 还给出了街道峡谷内部壁面绿化和近地面污染源的具体布置情况：壁面绿化被种植在上风向建筑物的背风壁与下风向建筑物的迎风壁上，厚度为 $0.01H$ (20 cm)。对于壁面绿化覆盖的流场区域，考虑其空气动力学效应(对气流运动的阻碍效应)和热力学效应(包含绿化的蒸腾降温效应以及对太阳辐射的遮蔽而带来的温度下降)，研究中考虑 4 种典型的壁面绿化的叶面积密度 $LAD=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ；地面机动车尾气污染源位于峡谷中央，其尺寸为 $0.6H\times 0.02H\times 10H$ ，考虑严峻交通污染情况，污染源均匀释放 CO ， NO 以及 NO_2 的速率分别为 7.37×10^{-7} ， 5.98×10^{-8} ， $9.17\times 10^{-9}\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ ^[10]。

在研究中，使用设置壁面温度来实现夏季不同时刻太阳辐射所导致的壁面升温^[11-13]，包括背风面受热、迎风面受热、地面受热和全壁面受热(也称夜间墙体保温或放热)。需要指出的是环境温度设为 300 K。本文研究的工况共计 21 个：1 个既无壁面受热又无壁面绿化的空白对照工况、4 个仅有壁面受热而无壁面绿化的工况，以及 16 个既有壁面受热又有壁面绿化的工况(计及 4 种壁面绿化的叶面积密度和 4 种不同壁面受热模式)。研究工况的壁面受热温度设置如表 1 所示^[14]。

此外，研究还考虑了 $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 光化学反应动力学，用来实现反应性污染物的光化学过程。具体的化学方程式为^[15]

$$\text{NO}_2+h\nu\rightarrow\text{NO}+\text{O}$$

(1)

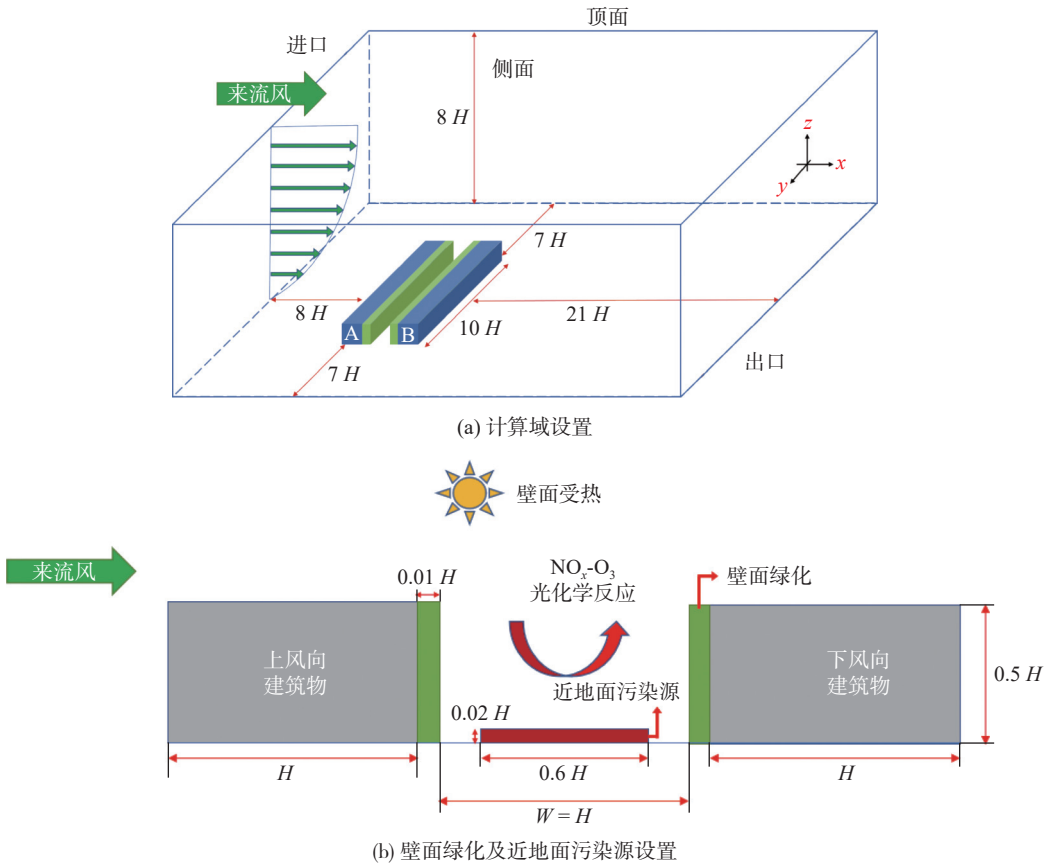


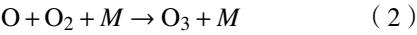
图 1 具有壁面绿化的街道峡谷模型

Fig.1 Model of the street canyon with green walls

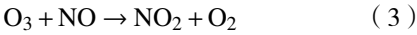
表 1 研究工况的壁面温度设置

Tab.1 Wall temperature setting for the studied cases

壁面受热情况	背风面温度/K	迎风面温度/K	地面温度/K
背风面受热	316	302	302
迎风面受热	302	316	302
地面受热	304	304	316
全壁面受热(也称夜间保温)	316	316	316



式中： $h\nu$ 为光照强度； M 为第 3 种分子。



采用臭氧消耗率 d_{O_3} 来衡量该系列光化学反应的化学平衡情况，具体表达式为^[10]

$$d_{\text{O}_3} = \left(1 - \frac{[\text{O}_3]}{[\text{O}_3]_{\text{b}}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中： $[\text{O}_3]$ 为 O_3 的浓度； $[\text{O}_3]_{\text{b}}$ 为 O_3 的背景浓度。

1.2 数值模型

1.2.1 控制方程

街道峡谷内的湍流、热传递以及污染物的扩散和转化采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求解，控制

方程为^[16]

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \rho g_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S_T \quad (7)$$

式中： x_i 和 x_j 为笛卡尔坐标； u_i 和 u_j 分别为 x_i 和 x_j 方向上的空气时均速度分量； ρ 为空气密度； p 为空气压强； μ 为分子黏性系数； μ_t 为湍流黏性系数； g_i 为重力加速度分量； T 为温度； Pr 为分子普朗特数， $Pr=0.85$ ； σ_t 为湍流普朗特数； S_T 为温度源项。

此外，在动量方程求解时，采用 Boussinesq 假定^[17]来近似处理由温度变化引起的峡谷内空气浮升力项。

各污染物的组分输运方程为^[10]

$$u_j \frac{\partial [\text{CO}]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(D_m + D_t) \frac{\partial [\text{CO}]}{\partial x_j} \right] + S_{\text{CO}} \quad (8)$$

$$u_j \frac{\partial [\text{NO}]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (D_m + D_t) \frac{\partial [\text{NO}]}{\partial x_j} \right\} + J_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2] - k_1 [\text{O}_3] [\text{NO}] + S_{\text{NO}} \tag{9}$$

$$u_j \frac{\partial [\text{NO}_2]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (D_m + D_t) \frac{\partial [\text{NO}_2]}{\partial x_j} \right\} - J_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2] + k_1 [\text{O}_3] [\text{NO}] + S_{\text{NO}_2} \tag{10}$$

$$u_j \frac{\partial [\text{O}_3]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (D_m + D_t) \frac{\partial [\text{O}_3]}{\partial x_j} \right\} + k_2 [\text{O}] [\text{O}_2] [\text{M}] - k_1 [\text{O}_3] [\text{NO}] \tag{11}$$

式中： $[X]$ 代表物质 X 的浓度； D_m 为污染物的分子扩散系数； D_t 为湍流扩散系数； S_X 代表物质 X 的源项； J_{NO_2} 为 NO_2 的光解速率； k_1, k_2 分别为式(2)和式(3)所代表的反应速率，其与温度和污染物浓度呈正相关^[15]。

壁面绿化覆盖区域导致控制方程增加的源项分别为^[18]

$$S_E = -P_c LAD \tag{12}$$

$$S_{u_i} = -\rho C_d LAD u_i u_j \tag{13}$$

$$S_k = \rho C_d LAD (\beta_p u_j^3 - \beta_d u_j k) \tag{14}$$

$$S_\varepsilon = \rho C_d LAD \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 4} \beta_p u_j^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d u_j k) \tag{15}$$

式中： $S_E, S_{u_i}, S_k, S_\varepsilon$ 分别为能量源项、动量源项、湍动能 k 的源项和湍动能耗散率 ε 的源项。 P_c 为单位 LAD 植被的体积冷却功率；模型常数 $\{C_d, \beta_p, \beta_d, C_{\varepsilon 4}, C_{\varepsilon 5}\} = \{0.2, 1.0, 5.1, 0.9, 0.9\}$ ^[19]。

1.2.2 边界条件

入口边界条件采用速度入口(velocity-inlet)，风速 $U(z)$ 、湍动能 $k(z)$ 和湍动能耗散率 $\varepsilon(z)$ 的定义为^[19]

$$U(z) = U_{\text{ref}} \left(\frac{z}{H_{\text{ref}}} \right)^\alpha \tag{16}$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \tag{17}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \tag{18}$$

式中： U_{ref} 表示高度为 H_{ref} 处的参考风速， $U_{\text{ref}} = 3.0 \text{ m/s}$ ，此处 $H_{\text{ref}} = 10 \text{ m}$ ，为建筑物高度； α 为风剖面指数，反映较密集建筑群的城市郊区状况^[13]， $\alpha = 0.187$ ； u_* 为摩擦速度， $u_* = 0.54 \text{ m/s}$ ； C_μ 为模型常数， $C_\mu = 0.09$ ； κ 为冯卡门常数， $\kappa = 0.4$ ； δ 为边界层高度， $\delta = 960 \text{ m}$ 。此外，入口处还包含体积分数为 2×10^{-8} 的 O_3 与体积分数为0.21的 O_2 。

出口边界选择自由出流边界条件；侧面和顶部边界选择对称边界条件；壁面选择无滑移壁面

边界条件。

1.2.3 求解设置

控制方程采用有限体积法(FVM)进行离散；对流离散项选用二阶迎风差分格式；数值算法选用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)。求解过程中，当各变量的相对计算残差均降至 10^{-6} 以下时即视为收敛。

街道峡谷中尾气污染物发生光化学反应需要合适的气象条件，为了尽可能地接近现实情况，将数值模拟分为3步进行^[10]：

第1步 保持关闭污染源与体积反应模块，先进行计算，得到稳定流场。此时，计算域中充满体积分数为 2×10^{-8} 的 O_3 与体积分数为0.21的 O_2 。

第2步 在第1步的计算结果的基础上，开启污染源，不开启体积反应模块。通过此步骤能够得到无光化学反应条件下稳定的污染物分布，为计算后续的光化学反应提供初始条件。

第3步 保持污染源开启，并开启体积反应。最终得到化学平衡时各污染物的分布情况。

1.3 模型验证

采用德国卡尔斯鲁厄大学风洞实验数据对CFD模型进行验证和完善，最终确定使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行后续的工况计算。具体的验证细节参见文献^[20]。

2 结果与讨论

2.1 街谷内流场变化分析

图2为4种壁面受热和2种壁面绿化(LAD 分别为1.0和2.0)配置下街道峡谷竖直中心面上的无量纲速度云图及流线分布。作为空白对照，图2也给出既无壁面受热又无壁面绿化下的街道峡谷竖直中心面处的相关流场信息。

在既无壁面绿化又无壁面受热条件下，从图2(a)可以看出：在峡谷竖直中心面的背风侧处形成一股(单束)上升气流，该上升气流流出峡谷与峡谷顶部自由来流汇合；另一股气流则于峡谷迎风面附近形成一个顺时针旋涡。

无论有无壁面绿化，背风面受热所产生的热浮力会驱散背风侧的单束向上运动的气流，从而在峡谷垂直中心面上形成一个顺时针大旋涡(图2(b)、图2(c)和图2(d))，该大旋涡的外沿气流从背风侧流出峡谷而与峡谷上部自由来流汇集。在背风面受热时，随着壁面绿化的 LAD 的增加，峡谷背风

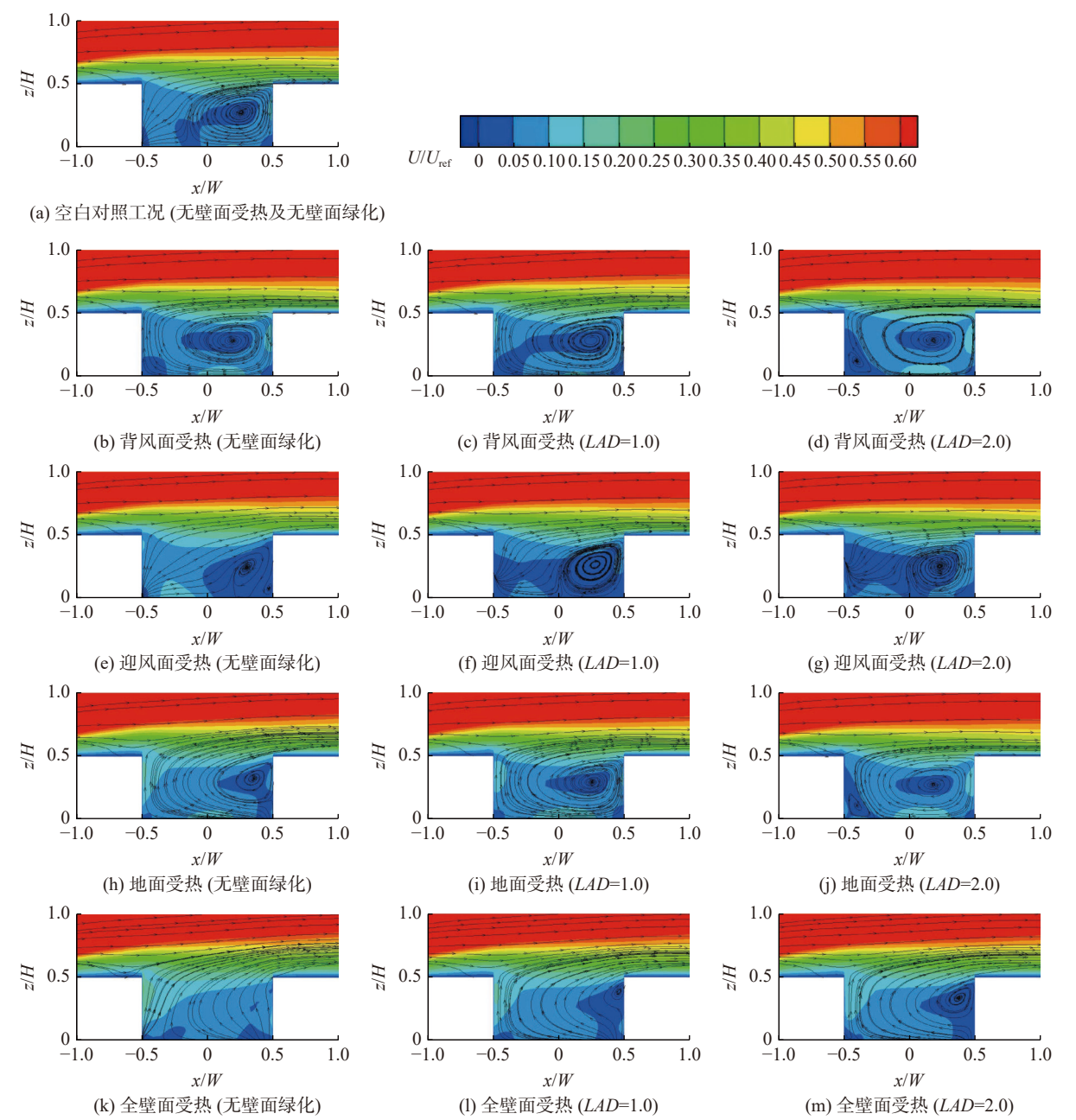


图2 街道峡谷竖直中心面上的无量纲速度云图及流线

Fig.2 Contours of dimensionless velocity and streamlines at the vertical center plane of the street canyon

面底部的低速区域增大, 而当 LAD 增加至 2.0 时, 背风墙底部的低速区域演化成一个风速极低的逆时针小角涡。

相比无壁面绿化及无壁面受热工况(图 2(a)), 在无壁面绿化条件下, 迎风面受热会极大削弱迎风侧的顺时针旋涡, 从而间接增强背风侧的单束向上气流: 迎风面受热产生的热浮力方向与旋涡气流在近迎风面的流动方向相反, 故会极大削弱顺时针旋涡尺度, 并于迎风面附近形成一块低速区域(图 2(e))。当有壁面绿化的峡谷迎风面受热

时, 随着壁面绿化的 LAD 的增大, 其蒸腾降温效应随之增强, 迎风面受热对流场的影响减小, 故迎风侧顺时针旋涡尺度得以恢复增大(图 2(e)、图 2(f) 和图 2(g))。

相比无壁面绿化及无壁面受热工况(图 2(a)), 地面受热也能驱散背风侧的单束上升气流, 使得顺时针旋涡进一步得以发展(图 2(h), 2(i) 和 2(j))。很明显, 在地面受热条件下, 壁面绿化有助于顺时针旋涡的形成(比较图 2(b) 与 2(c) 及 2(d))。同时得益于更大的受热面积, 地面受热有助于增加峡

谷内部的平均气流速度，增强峡谷通风。

全壁面受热则是受热面积最大的受热模式，在该种情况下，三壁面均产生强烈的向上热浮升力，使得峡谷通道内的横向气流均向中心面处汇集，并向上运动流出峡谷(图2(k))。当具有壁面绿化的全壁面受热时，随着壁面绿化的 LAD 上升至 1.0，壁面受热产生的热浮升力也被削弱，迎风面附近的顺时针旋涡也初现雏形(图2(l))，而随着 LAD 进一步增加至 2.0 时，该旋涡尺度略微增大(图2(m))。

2.2 街谷内温度变化分析

图3为不同工况条件下街道峡谷竖直中心面处的温度分布。图4为不同工况条件下街道峡谷内部平均温度。如图3(a)所示，在无壁面绿化条

件下，背风面受热使得背风面附加空气温度升高至 302 K，且其周围有较为明显的高温区域，而顺时针主旋涡则能够携带壁面周围的热量于峡谷中循环，提高峡谷内部的平均温度。从图4可知，在无壁面绿化条件下，背风面受热能够提升峡谷内部平均温度约 0.35 K(相对于空白对照工况)。图3(b)显示壁面绿化的蒸腾降温效应能够有效降低两侧壁面周围的温度，由于密度差异原因，被降温的空气于近壁面处向下沉积，聚集在街道峡谷底部并得以停留，故可以在峡谷左右下角发现较为明显的低温区域。进一步，从图4可知，在 $LAD = 2.0$ 的情况下，壁面绿化能够降低峡谷内部平均温度约 0.38 K(相对于无绿化的背风面受热)。

如图3(c)所示，在无壁面绿化条件下，迎风

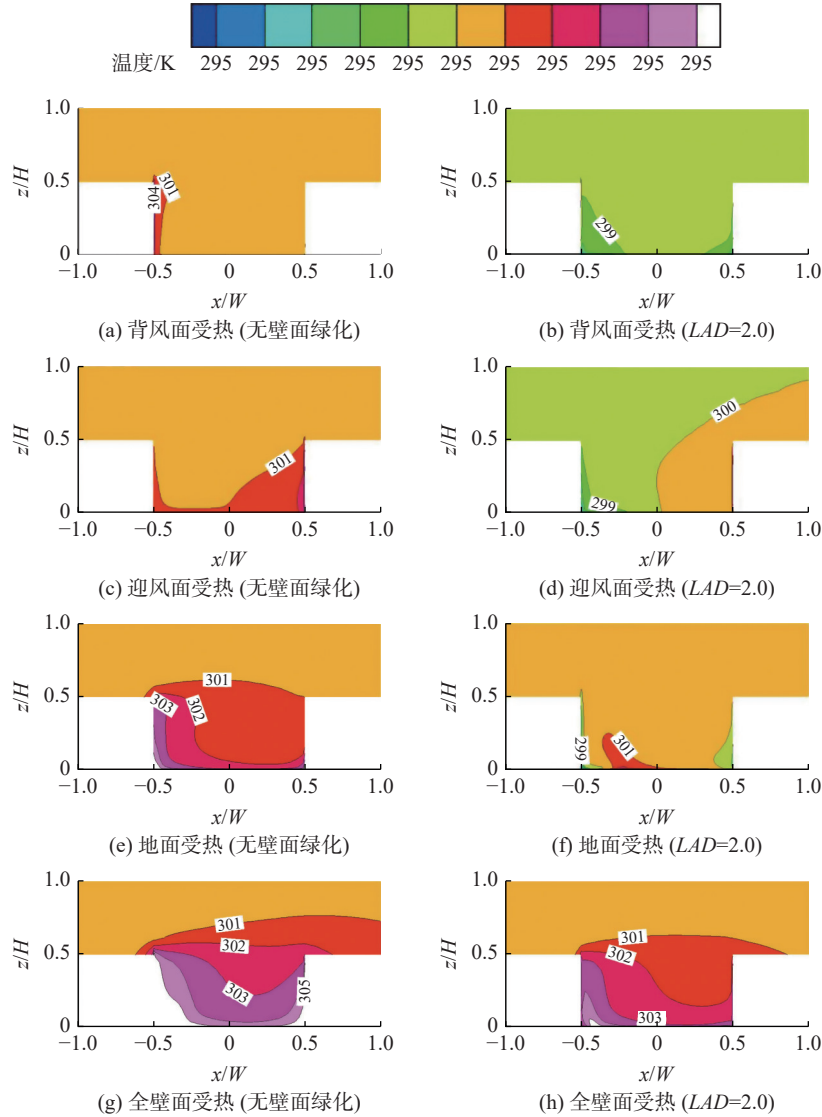


图3 街道峡谷竖直中心面处的温度分布

Fig.3 Distribution of temperature at vertical center plane of street canyon

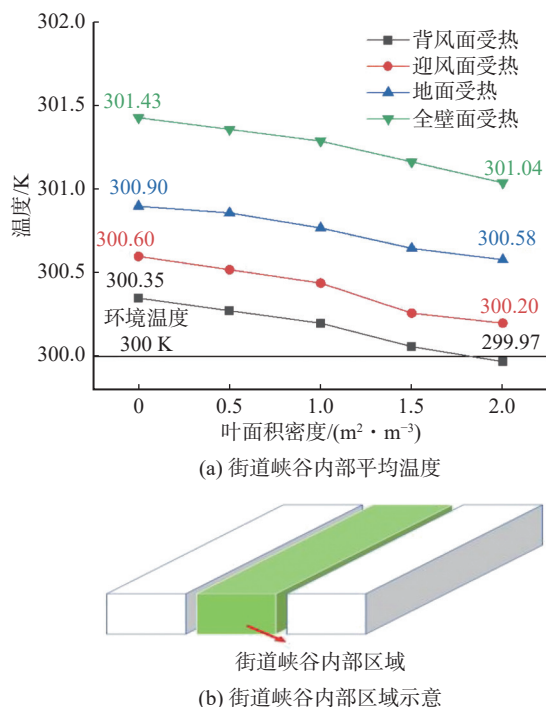


图4 街道峡谷内部平均温度

Fig. 4 Averaged temperature within the street canyon

面受热使其周围仍然存在较为明显的高温区域, 顺时针小旋涡的运动致使大量热量在此处循环, 难以扩散出峡谷。迎风面受热能够提高街道峡谷内部的平均温度约 0.60 K(相对于空白对照工况)。图 3(d)显示壁面绿化能够有效降低两侧壁面周围的温度。从图 4 可知, 迎风面受热时, 壁面绿化能够降低峡谷内部平均温度约 0.40 K(相对于无绿化的迎风面受热)。

如图 3(e)所示, 在无壁面绿化条件下, 地面受热使街道峡谷内部的有效受热面积更大, 相较于前两种受热方式, 峡谷内部平均温度有明显升高, 约 0.90 K(相对于空白对照工况)。在该系列工况中, 气流会携带近地面的热空气向背风面运动, 随后再沿入口气流方向偏转并流出峡谷。这个过程使得大量热量被运输至峡谷左下角及近背风面处, 使得该区域温度远高于迎风面周围区域, 且最高温度达到了约 305 K。从图 4 可知, 在该种受热情况下, 壁面绿化对街道峡谷内部热环境改善的能力十分有限, 仅降低内部平均温度约 0.32 K(相对于无绿化的地面受热), 这在 4 种受热模式中为最低值(图 3(f))。

如图 3(g)所示, 在全壁面受热情况下, 峡谷内部温度进一步升高, 高温区由三处壁面向峡谷内部扩散, 也大幅度提高了峡谷上空的温度。由

于峡谷内向上运动的气流依然向背风面偏转, 故温度最高的区域仍然是峡谷的左下角部分。从图 4 可知, 无壁面绿化的全壁面受热时峡谷内部平均温度提升也最大, 约为 1.43 K(相对于空白对照工况); 如图 3(h)显示, 有绿化的全壁面受热时, 峡谷内温度分布与无绿化条件的全壁面受热情况下的峡谷内温度分布式样相似, 但从图 4 可知, 壁面绿化的存在则能够均匀地降低峡谷内部的温度约 0.39 K(相对于无绿化的全壁面受热)。

2.3 街谷内 CO 扩散与 NO_x-O₃ 反应情况分析

本研究涉及 3 种类型的污染物, 分别为 CO, NO 和 NO₂。此处以 CO 为例(不涉及反应), 图 5 所示为各种工况下街道峡谷竖直中心面的 CO 体积分数分布。在既无壁面绿化又无壁面受热条件下(空白对照工况), 峡谷内部的流动结构由单束气流及顺时针旋涡共同主导, 在两束气流交汇的区域污染物大量堆积, 并朝背风面方向向上逐渐递减, 使得峡谷背风面区域的污染物浓度远高于迎风面区域的污染物浓度(如图 5(a)所示)。

背风面受热会增强顺时针旋涡, 并增强上升气流速度, 使得峡谷内部流动由顺时针单旋涡结构主导。近地面污染源释放的 CO 随顺时针旋涡在峡谷中运动, 沿背风面向上递减分布, 且背风面附近的污染物浓度远高于迎风面附近(如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示)。随着 LAD 的增加, 迎风面附近的污染物浓度明显降低, 大量污染物被输送至峡谷的背风面附近; 在 LAD = 2.0 的工况中, 在旋涡气流的控制下, 在背风侧角涡处形成一块较小的高污染区域。

在迎风面受热情况下, 近地面污染物 CO 受单束气流影响, 浓度沿水平方向递减分布, 且污染物大多聚集于峡谷中段区域(如图 5(e), 5(f)和 5(g)所示); 而迎风侧小旋涡则能够将迎风面附近污染物向背风面方向输送, 使得迎风面附近污染物浓度偏低, 导致污染物分布在水平方向发生略微偏移。在该种情况下, 由于大量污染物仍集中于街道峡谷中心, 故行人呼吸面上平均污染物 CO 浓度也略微提高。随着 LAD 的上升, 迎风侧小型旋涡规模逐渐增大, 逐渐恢复对峡谷内部流动结构的控制。

地面受热情况下峡谷内部的流动结构与背风面受热极为类似, 故地面受热情况下峡谷内部污染物的分布规律(如图 5(h), 5(i)和 5(j)所示)也与背

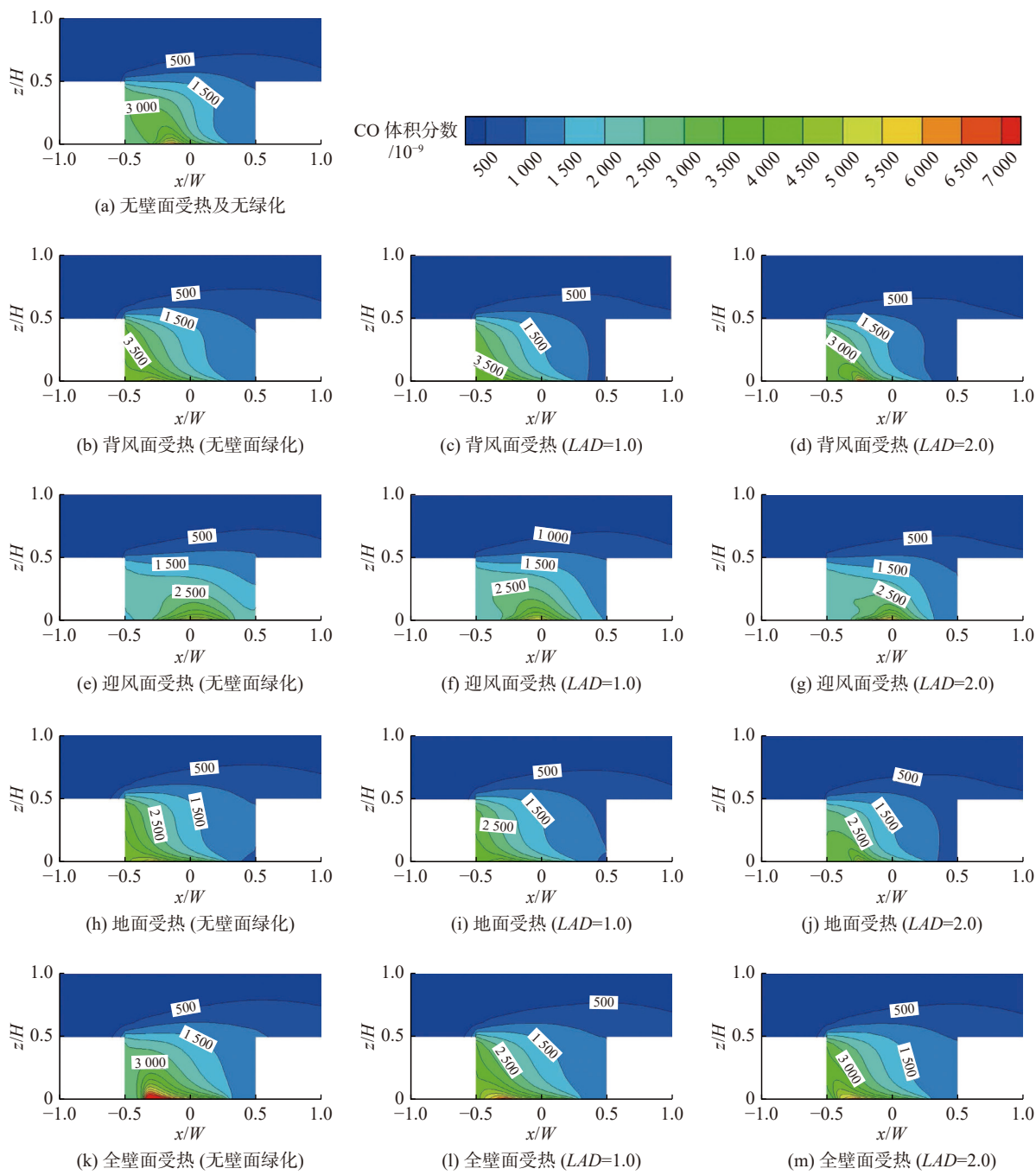


图5 街道峡谷竖直中心面处CO体积分数分布

Fig.5 Distributions of CO volume fraction at vertical center plane of street canyon

风面受热情况下峡谷内部污染物的分布极为相似。

如图5(k), 5(l)和5(m)所示, 在全壁面受热情况下, 两部分气流聚集于峡谷中心并向上涌出, 横向气流携带了大量污染物向峡谷中心运动, 使得中心面上的污染物浓度极高。大量污染物积聚于峡谷的背风侧, 并向上递减。随着LAD的上升, 壁面绿化的蒸腾降温效应使得峡谷内部气流得以稳定, 重新回归单旋涡结构, 污染物的分布也转化为沿背风面向上递减分布的结构(如图5(m)

所示)。

需要指出的是, 未涉及反应时, NO和NO₂的分布特征与CO基本相同, 且浓度比为10:1。此处仅列举在既无壁面绿化又无壁面受热条件下NO与NO₂前后体积分数对比与全部工况下的臭氧消耗率d_{O₃}。图6为反应前后NO和NO₂体积分数变化(无壁面受热及无绿化条件下)。由图6可知, 环境中反应后NO体积分数略微降低而NO₂体积分数升高, 伴随环境中背景臭氧的消耗, 说

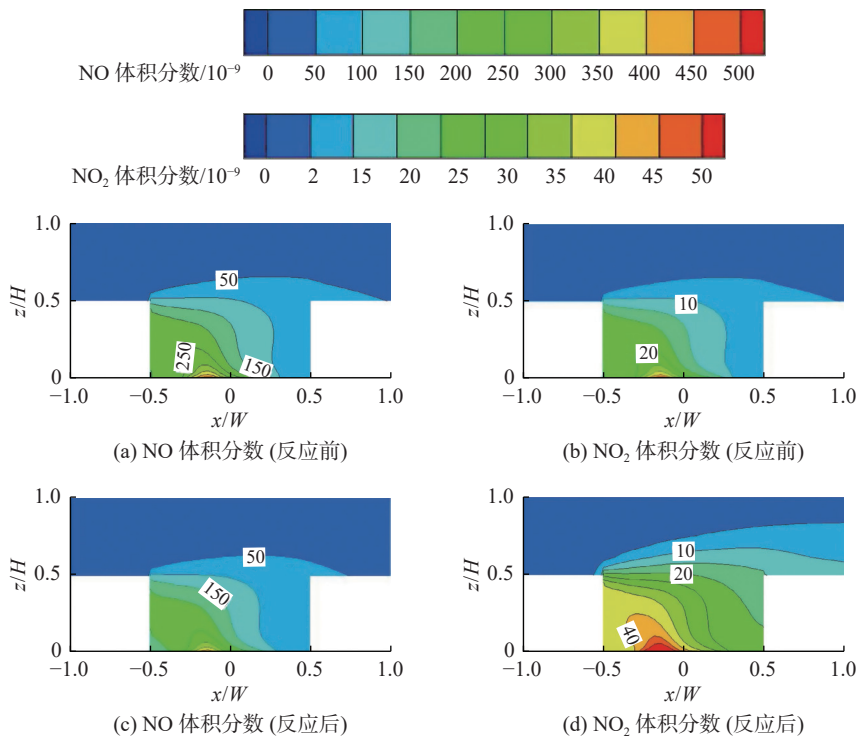


图 6 反应前后 NO 和 NO₂ 体积分数变化 (无壁面受热及无绿化)

Fig.6 Changes of volume fraction of NO and NO₂ before and after reactions

明反应式(3)在街道峡谷中占据主导地位。

臭氧消耗率 d_{O_3} 不仅能够反映化学平衡情况,也能够直观地反映光化学反应剧烈程度。图 7 为街道峡谷竖直中心面处 d_{O_3} 分布,而表 2 为街道峡谷内部平均 d_{O_3} 。在空白对照工况(无壁面受热和无壁面绿化)中,高 d_{O_3} 区域处于峡谷背风侧部分,并向上方拓展至背风面,如图 7(a)所示。在这种情况下,峡谷内部的平均 d_{O_3} 约为 69.84%,如表 2 所示。

背风面受热改变了峡谷内部的流动结构,从而使得污染物大部分集中在背风面附近,且沿其向上递减分布, d_{O_3} 也呈现出类似的趋势:高 d_{O_3} 区域均集中于峡谷背风面附近,并朝向峡谷外部依次递减(如图 7(b), 7(c)和 7(d)所示)。随着 LAD 的增加,近迎风面污染物浓度降低而近背风面则升高, $d_{O_3}=60\%$ 的等值线从迎风面附近收缩至峡谷中心处。进一步分析表 2,发现 $LAD=2.0$ 的壁面绿化使得峡谷内部平均 d_{O_3} 下降了约 5.02%(相对于无壁面绿化的背风面受热工况),这归因于其蒸腾降温效应极大地削弱了两侧壁面附近的化学反应强度。在这种情况下,较低的背景臭氧浓度成为了达到化学平衡的限制因素。

如图 7(e), 7(f)和 7(g)所示,迎风面受热条件下,高 d_{O_3} 区域均集中于峡谷底部中段,即污染源

所在位置,并向上递减,峡谷内部的 d_{O_3} 几乎均大于 70%。随着 LAD 增加至 2.0, $d_{O_3}=70\%$ 的区域也从迎风面底部收缩至峡谷中段区域,峡谷内部平均 d_{O_3} 也下降至 69.19%,较无绿化工况下降了 3.63%,如表 2 所示。

如图 7(h), 7(i)和 7(j)所示,在地面受热条件下, d_{O_3} 分布规律几乎与背风面受热情形相同。从表 2 可知,地面受热情况下, $LAD=2.0$ 的壁面绿化工况相较于无绿化的受热工况,峡谷内部平均 d_{O_3} 下降约 3.59%。

如图 7(k), 7(l)和 7(m)所示,全壁面受热能够大幅度提高峡谷内部的平均温度,故峡谷内部平均 d_{O_3} 也普遍较高,均大于 70%。在无绿化的条件下,横向气流使得大量污染物聚集于峡谷左半部分区域,使得该处有一块较大的高 d_{O_3} 区域。随着 LAD 的增加,峡谷内部的污染物浓度也转变为沿背风面向上递减分布,此时, d_{O_3} 分布特点也与背风面受热和地面受热工况相似,但是,由于峡谷内部温度普遍较高,峡谷内部平均 d_{O_3} 也高于上述两类工况。

进一步,表 2 表明,在每一种壁面受热模式下,峡谷内部平均 d_{O_3} 随 LAD 的增大而降低。

综上所述,在 $AR=0.5$ 的浅型街道峡谷中,壁面绿化的蒸发降温效应可以有效降低峡谷内部的

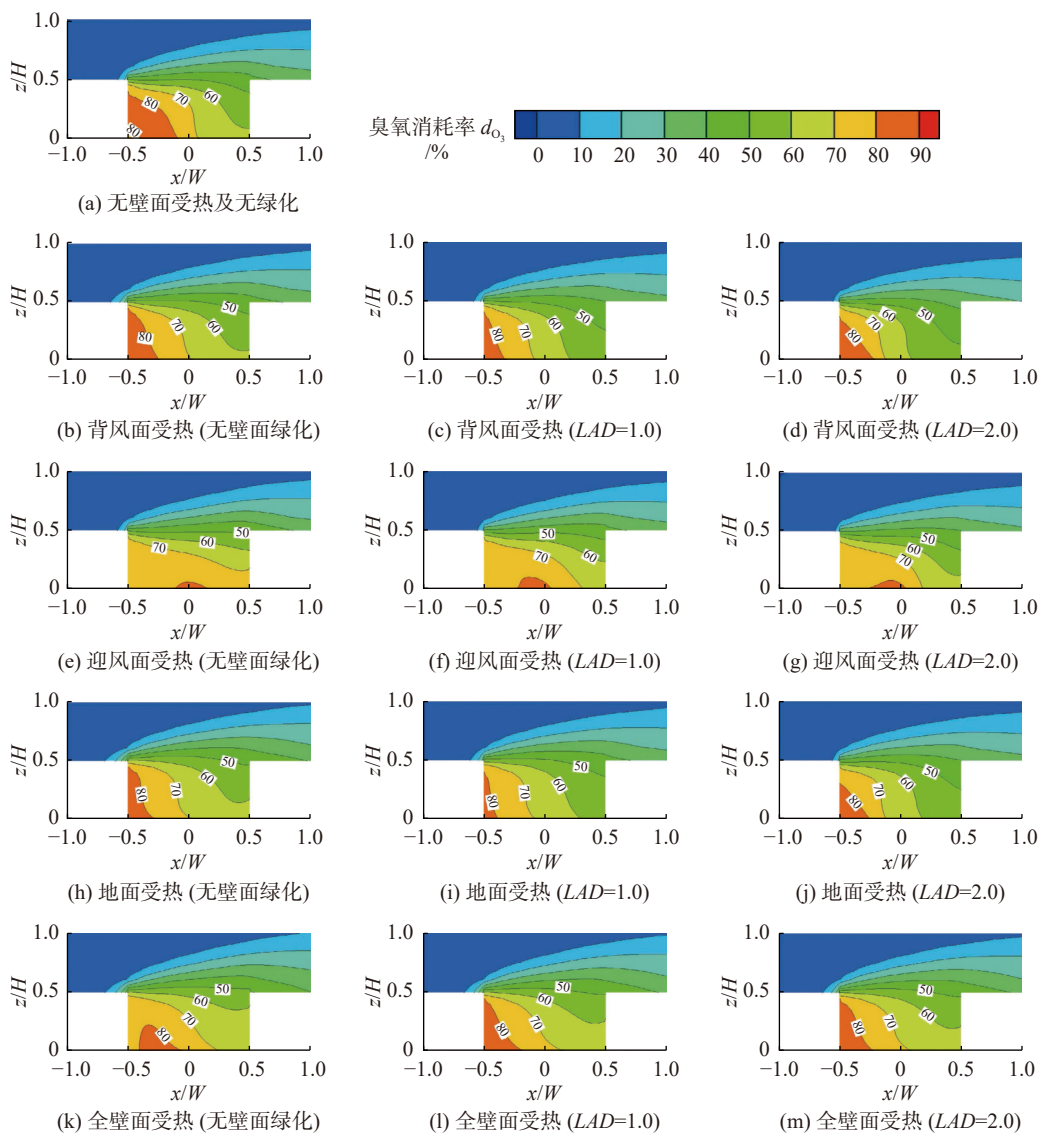


图7 街道峡谷竖直中心面处 d_{O_3} 分布

Fig.7 Distributions of d_{O_3} at vertical center plane of the street canyon

表2 街道峡谷内部平均 d_{O_3}

Tab.2 Average d_{O_3} within street canyon

壁面热特性	$LAD/(m^2 \cdot m^{-3})$				
	无壁面绿化	0.5	1.0	1.5	2.0
空白对照工况	69.84				
背风面受热	69.45	67.02	66.04	65.13	64.43
迎风面受热	72.82	72.23	71.53	70.29	69.19
地面受热	69.28	68.34	66.84	66.11	65.69
全壁面受热	71.63	71.35	70.64	70.43	70.26

温度，并缓解峡谷内光化学反应的剧烈程度。

3 结 论

建立了耦合壁面绿化及热效应的浅型街道峡

谷 ($AR=0.5$) 内污染物扩散与转化的 CFD 模型，并利用风洞实验数据对选用的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型及相关模型参数进行验证。采用 CFD 模型对壁面绿化及热效应影响下的浅型街道峡谷内流场、污染物扩散及 NO_x-O_3 光化学转化开展模拟研究。研究中考虑 4 种壁面绿化的叶面积密度 ($LAD = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) 以及 4 种壁面加热模式 (背风面加热、迎风面加热、地面加热和全壁面加热)。得到如下主要结论：

a. 在既无壁面绿化又无壁面加热条件下，峡谷垂直中心面上的流动由横向气流和顺时针旋涡共同主导。在无壁面绿化时，迎风面受热会削弱顺时针旋涡的尺度，从而使得横向气流占据主导地位；背风面受热和地面受热会强化顺时针旋涡；而全壁面受热则会使旋涡结构消散。

b. 每种壁面受热模式下,壁面绿化对峡谷内部流场的影响随 LAD 的增大而加剧(特别对于迎风面受热和全壁面受热工况尤为如此)。

c. 壁面受热导致峡谷内的平均温度升高程度为:全壁面受热最高,其次为地面受热、迎风面受热和背风面受热。相较于既无壁面绿化又无壁面加热工况,根据不同的壁面受热模式,无壁面绿化的壁面加热可使峡谷内平均气温升高 $0.35\sim 1.43\text{ K}$;壁面绿化能够有效改善峡谷内的热环境,根据不同的壁面受热模式, $LAD=2.0$ 的壁面绿化可使峡谷内的平均气温降低 $0.38\sim 0.48\text{ K}$ 。

d. 壁面受热会影响污染物的扩散,尤其是迎风面受热会促使大量污染物聚集在峡谷底部中心位置附近。

e. 在每一种壁面受热模式下:峡谷内部平均 d_{O_3} 随壁面绿化 LAD 的增大而降低,壁面绿化的降温效应可以有效降低环境空气温度,从而降低 $\text{NO}_x\text{-O}_3$ 光化学反应速率,起到缓解光化学污染的效果;峡谷内部平均 d_{O_3} 较高,较低的背景环境中臭氧浓度成为达到化学平衡的限制因素。在 $AR=0.5$ 的浅街道峡谷中,壁面绿化的设置对缓解光化学污染和热岛效应具有积极意义。

参考文献:

[1] 谢海英,王晓晓,杨怡,等. 紊流模型预测街道峡谷流场能力的定量指标评价[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(2): 71–77.

[2] DIRKSEN M, RONDA R J, THEEUWES N E, et al. Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies[J]. *Urban Climate*, 2019, 30: 100498.

[3] 詹咏,江沛,符聪雨,等. 污染扩散流场数字图像量测系统[J]. 光学仪器, 2016, 38(2): 173–177.

[4] CUCE E. Thermal regulation impact of green walls: an experimental and numerical investigation[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 247–254.

[5] SCHETTINI E, BLANCO I, CAMPIOTTI C A, et al. Green control of microclimate in buildings[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 8: 576–582.

[6] BASHER H S, AHMAD S, RAHMAN A M A, et al. The use of edible vertical greenery system to improve thermal performance in tropical climate[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 13: 57–66.

[7] JAYASOORIYA V M, NG A W M, MUTHUKUMARAN S, et al. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 34–47.

[8] YSEBAERT T, KOCH K, SAMSON R, et al. Green walls for mitigating urban particulate matter pollution —a

review[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 127014.

[9] VIECCO M, JORQUERA H, SHARMA A, et al. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter[J]. *Building and Environment*, 2021, 204: 108120.

[10] ZHANG K E, CHEN G W, ZHANG Y, et al. Integrated impacts of turbulent mixing and $\text{NO}_x\text{-O}_3$ photochemistry on reactive pollutant dispersion and intake fraction in shallow and deep street canyons[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 135553.

[11] CUI P Y, LI Z, TAO W Q. Buoyancy flows and pollutant dispersion through different scale urban areas: CFD simulations and wind-tunnel measurements[J]. *Building and Environment*, 2016, 104: 76–91.

[12] HUANG Y D, XU N, REN S Q, et al. Numerical investigation of the thermal effect on flow and dispersion of rooftop stack emissions with wind tunnel experimental validations[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(9): 11618–11636.

[13] HUANG X T, HUANG Y D, XU N, et al. Thermal effects on the dispersion of rooftop stack emission in the wake of a tall building within suburban areas by wind-tunnel experiments[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 205: 104295.

[14] TONG N Y O, LEUNG D Y C. Effects of building aspect ratio, diurnal heating scenario, and wind speed on reactive pollutant dispersion in urban street canyons[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(12): 2091–2103.

[15] LIU J R, CUI S H, CHEN G W, et al. The influence of solar natural heating and $\text{NO}_x\text{-O}_3$ photochemistry on flow and reactive pollutant exposure in 2D street canyons[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143527.

[16] VOET L J A, AHLFELD R, GAYMANN A, et al. A hybrid approach combining DNS and RANS simulations to quantify uncertainties in turbulence modelling[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 89: 885–906.

[17] HANG J, CHEN X Y, CHEN G W, et al. The influence of aspect ratios and wall heating conditions on flow and passive pollutant exposure in 2D typical street canyons[J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106536.

[18] YANG H Y, CHEN T H, LIN Y Y, et al. Integrated impacts of tree planting and street aspect ratios on CO dispersion and personal exposure in full-scale street canyons[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106529.

[19] SANZ C. A note on $k\text{-}\epsilon$ modelling of vegetation canopy air-flows[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 108(1): 191–197.

[20] LIU Y C, HUANG Y D, ZHANG Z, et al. Impacts of green walls on the characteristics of thermo-flow and photochemical reaction kinetics within street canyons[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 72: 127568.