文章编号：1008－8857(2026)02－0063－08 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.02.001

壁面热效应对建筑群外风场及污染物扩散影响的数值分析

谢海英，张天霄
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘 要：利用 realizable k–ε 紊流模型模拟屋顶和不同建筑壁面加热下的建筑群外流场、温度场及浓度场。与无加热时相比，理查森数 Ri 为 0.84 时壁面热效应未改变建筑附近气流运动的主要特点，但会影响行人高度处及近壁面气流的强弱。地面加热会明显增强建筑间的主涡及地面附近的流动，背风面加热时的情况与地面加热时的基本相似，但影响程度略弱，而迎风面加热时的情况则相反。壁面加热对建筑外气流温度的影响较小，除紧邻壁面处外，大部分区域的气流与来流的温差均小于 3 K。当污染源位于上游地面处时，建筑间的主涡使地面处有较强的反向回流，下游建筑附近的污染物浓度均不高，但壁面和屋顶加热加剧了污染物向下游的扩散，同时不同壁面加热时污染物浓度分布有一定差别，且与流场有对应关系。

关键词：热效应；风环境；污染物；数值模拟
中图分类号：X169 **文献标志码**：A

Numerical analysis of wall thermal effects on wind environment and pollutant diffusion around building clusters

XIE Haiying，ZHANG Tianxiao
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The realizable k-ε turbulence model was employed to simulate the flow field, temperature field, and concentration field around a building cluster under roof and wall heating conditions. Compared with the no-heating case, the wall thermal effect at a Richardson number (Ri) of 0.84 does not alter the main flow characteristics near the buildings but does affect the flow intensity at pedestrian level and near the wall surfaces. Ground heating significantly enhances the primary vortex between buildings and the near-ground flow. Leeward wall heating produces an effect similar to ground heating, albeit slightly weaker, whereas windward wall heating exhibits the opposite trend. The influence of wall heating on the air temperature outside the buildings is minor.

收稿日期：2024－10－07
第一作者：谢海英(1973—)，女，讲师 。研究方向：环境流体力学数值模拟。 E-mail：xiehaiying_usst@163.com

Except in regions immediately adjacent to the walls, the temperature difference between the local airflow and the incoming flow is less than 3 K in most areas. When the pollution source is located on the upstream ground, the main vortex between buildings induces strong reverse flow near the ground, resulting in low pollutant concentrations near the downstream buildings. Wall and roof heating evidently enhance the downstream diffusion of pollutants. Furthermore, the distribution of pollutant concentrations varies with different wall heating conditions and corresponds to the flow field characteristics.

Keywords: thermal effect；wind environment；pollutant；numerical simulation

在研究街区和建筑外的风环境时，通常假定地表及建筑壁面与周围空气的温度相同[1–3]。然而，由于太阳辐射，上述壁面的材料、颜色及形状等因素都会造成其表面和周围空气的温度差异。深色和蓄热性材料的壁面会吸收更多的太阳辐射，导致壁面温度升高[4]；浅色或有涂层并能反射太阳辐射的冷性材料表面的温度则变化较小[5]。另外，建筑壁面的形状以及窗体的遮阳设施也会影响壁面温度[6–7]。温度差异会驱动壁面与空气间的热交换，同时热浮力也会影响气流运动。目前，关于壁面热效应对建筑外流动影响的研究一般采用现场测量、缩尺模型试验和数值模拟的方法[8]。

文献[9]实测了西安市某建筑外壁面不同季节的对流换热系数，结果表明建筑外壁面和室外温差约为 4 ～ 8 ℃。文献[10–12]给出了建筑外壁面受热时的街谷内流场和温度测量结果。结果表明，建筑外壁面与空气的温差一般不大于 20 ℃，且壁面受热对街谷内流动的影响不显著。

缩尺模型试验主要是在风洞内考察壁面热效应对建筑外流动的影响。此外，有研究者将缩尺模型置于室外并实测日照辐射下建筑附近的流动情况和温度[13]。文献[14–16]利用风洞试验研究了建筑壁面和地面加热对各类街谷内气流的温度、时均流、紊流和通风量的影响，分析了街谷内流动结构的变化。结果表明，壁面热效应对建筑附近的流动有显著影响。为保证热浮力作用的相似性，试验中一般要求模型与原型的理查森数 $Ri=(gH\Delta T/T_{ref})/U_{ref}^2$ 相等，其中：g 为重力加速度，m/s^2；H 为建筑高度，m；ΔT 为空气与壁面的温差，K；T_{ref} 为参考温度，K；U_{ref} 为参考速度，m/s。为保证黏性力作用的相似性，还需保证模型与原型的雷诺数 $Re=\rho U_{ref}H/\mu$ 相等，其中：ρ 为空气密度，kg/m^3；μ 为空气的运动黏性系数，Pa·s。模型试验中一般要求 $Re>10^4$[8]。

数值模拟主要借助计算流体力学(CFD)方法考察有热效应时单体建筑、街谷及建筑群外的流动及污染物扩散问题[17–20]。紊流的处理通常选用雷诺时均模型和大涡模拟方法。文献[17]的研究表明：利用大涡模拟方法对缩尺和全尺度下壁面热效应的模拟结果均与试验值吻合，但计算成本较高；雷诺时均模型对缩尺下热效应的模拟效果较好，但对全尺度下热效应的模拟结果比试验值偏大。文献[19]就 CFD 方法在建筑形态、植被、城市水体及建筑冷性材料对风热环境优化的应用上进行了总结。文献[20]模拟了街谷内的流场和污染物浓度场，结果表明，街谷壁面温度随高度的变化规律对深街谷的流场结构有显著影响。

已有的关于壁面热效应对建筑外流动影响的研究大多针对单体建筑和街谷模型，而对建筑群外的风环境和污染物扩散影响的研究相对较少。因此，本文采用数值模拟方法，在规则建筑群中考察不同建筑壁面及地面受热对周围风环境和温度的影响，同时分析地面污染物扩散受其影响的程度。本研究可为建筑群规划及城市可持续发展提供理论依据和参考。

1 建筑群模型和计算设置

图 1 为建筑群模型，其中：单体建筑长度 L 为 60 m，宽度 W 为 15 m，高度 H 为 30 m；各建筑间距 D 为 20 m。该建筑群由 80 个单体建

筑组成，共 8 排 10 列。图 1 中虚线区域为研究区域，共计 4 排 6 列建筑。该图中坐标系 z 向垂直于水平面，其正方向为建筑高度增加方向。建筑群的对称面位于 y=0 处。在该面左右两侧的流动具有对称性，因此沿该面取其左侧部分为计算域。为方便描述，将研究区域内各建筑命名为 B_{ij}，其中：i 为沿 x 向建筑所在的排数，取 1、2、3、4；j 为沿 y 向建筑所在的列数，取 1、2、3。另外，分别将与 y、x 轴平行的街道命名为主、次街道。为避免建筑群外侧气流的影响，研究区域上游和下游分别设 3 排和 1 排建筑，两侧则各布置 2 列建筑。本文选用 CO 气体模拟交通污染物。污染源设置在研究区域的上游，且污染物以 0.05 m/s 的速度从地面均匀向上扩散。污染源位置如图 1 所示。

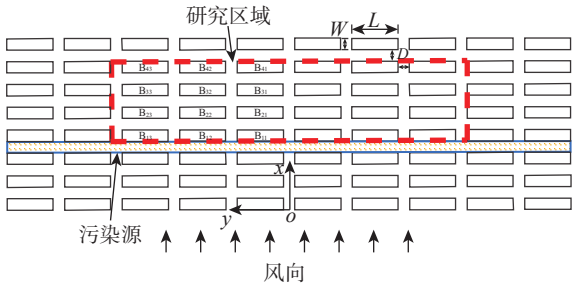


图 1　建筑群模型

Fig. 1　Schematic of building cluster layout

计算域的进口面、侧面及顶部与建筑群对应边界的距离均为 5H，计算域出口距离建筑群下游边界 10H[1]。计算域离散选用结构网格方式。为获得网格独立解，本文设计了 3 套疏密度网格，将壁面第一层网格大小分别设为 H 的 1/45、1/60 和 1/70，且对壁面附近的网格进行了加密处理。计算结果表明，3 套网格下解的差别均小于 3%。因此，可认为上述网格均满足网格无关性要求。本文选用中等疏密程度网格（壁面第一层网格大小为 H/60）进行计算和分析，计算域总网格数约为 1 000 万。

定义 x、y 和 z 向的气流分速度分别为 u、v 和 w，合速度为 U。考虑到建筑群附近真实的风速大小，本文参考文献[16]设计算域入口边界高度 z 处的来流风速 u 满足幂律分布且 $u/U_H=(z/H)^{0.25}$，其中 U_H 为 z=30 m 处的风速，值为 4.2 m/s。进口紊流强度的设置参考文献[1]。地面和建筑表面均设为无滑移壁面，计算域出口为自由出流条件。本文模拟时来流温度设为 25 ℃，被加热的建筑壁面温度设为 40 ℃。根据上述参数可得 Ri 为 0.84。

本文采用 Fluent 商用软件完成计算。数值模拟的控制方程分别为连续性方程、动量方程、能量方程及污染物的组分输运方程。计算中密度按 Boussinesq 模型处理，紊流模型选用 realizable k–ε 模型，壁面处选用标准壁面函数处理。方程离散选用二阶迎风格式，计算收敛依据为连续性方程、速度、紊动能及耗散率的残差达到 1.0×10^{-4}，能量方程的残差达到 1.0×10^{-6}，且继续迭代后的解无变化。

本文参考文献[15]对壁面加热情况的处理方法，共模拟了 4 种工况，分别为 BG–LR、BG–WR、BG–GR 和 BG–N，其中：BG 表示建筑群；LR 表示同时加热建筑背风面和屋顶；WR 表示同时加热建筑迎风面和屋顶；GR 表示同时加热地面和屋顶；N 表示壁面无加热的等温工况。

2　模拟结果与分析

2.1　流场模拟结果与分析

图 2 为 4 种工况下行人高度处（z=1.5 m）的速度 U 分布。图 3 为研究区域中间列建筑 B_{i2} 的 y 向平面（y=120 m）上的速度 U 分布。由图 2 可知：在工况 BG–N 下主街道的气流强于次街道，且在主、次街道交叉口有明显的旋涡；迎风面气流从壁面中部分别向 y 的正、负方向流动，且气流强度在 B_{1j} 后达到最大并随 x 增大而减小。显然，由于来流掠过建筑时会有能量损耗，其气流强度有所降低。本文所模拟的前、后排建筑和其间的街道形成长宽比为 3、高宽比为 1.5 的短街谷。由图 3 可知，街谷内有顺时针方向的主涡，且涡的形态在 B_{1j} 后基本不变。可见，本文的模拟结果与文献[17]的研究结果基本一致。

由图 2 可知，3 种壁面加热方式下行人高度处的气流分布与等温工况下的基本相同，但两者速度大小有一定差异。地面加热时产生的上浮力

导致地面附近气流速度增大，且工况 BG−GR 下风速增强得最明显。背风面加热能增强附近气流向上运动的趋势，从而对地面气流形成抽吸作用，所以工况 BG−LR 下行人高度处风速略变大。与工况 BG−N 下相比，工况 BG−LR 下上述特点在 B_{3j} 和 B_{4j} 附近表现得尤为明显。迎风面加热的效果则与上述两个工况下的正好相反：气流沿壁面向下的速度因热浮力而减小，导致建筑间主涡流动变弱，地面附近速度随之减小。

壁面加热对建筑迎风面和背风面附近的流动也有一定的影响。以 B_{22} 和 B_{32} 为例，等温工况下，B_{22} 背风面附近为 z 向上升气流，加热该壁面可使气流在热浮力作用下加速；B_{32} 迎风面附近为下降气流，加热该壁面则使气流减速。为明确壁面加热对气流的影响，图 4 给出了各工况下 B_{22} 和 B_{32} 附近的 w 分布，测点分布在 y=120 m 平面上且均距离 B_{22} 背风面和 B_{32} 迎风面 0.5 m。由图中可知，在 B_{22} 背风面附近，工况 BG−GR 下

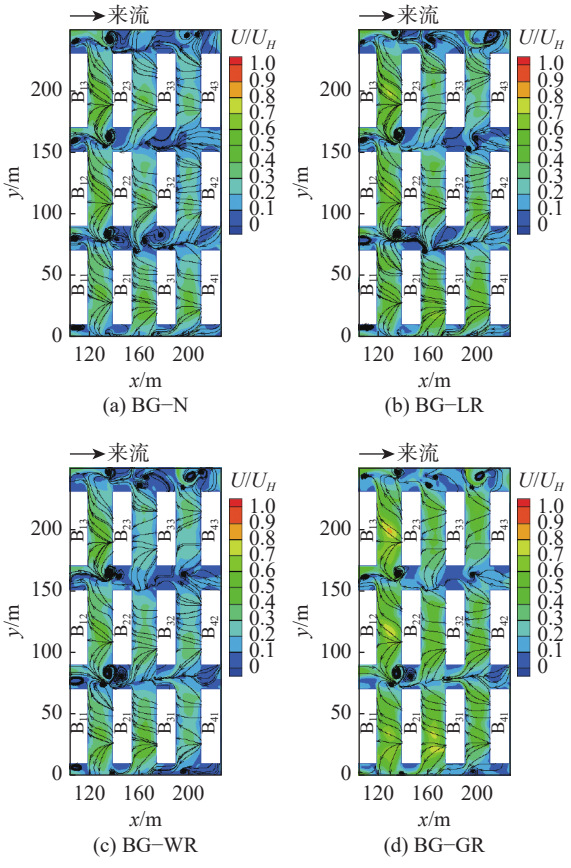


图 2 z=1.5 m 处的流场分布

Fig. 2 Distribution of flow field at z=1.5 m

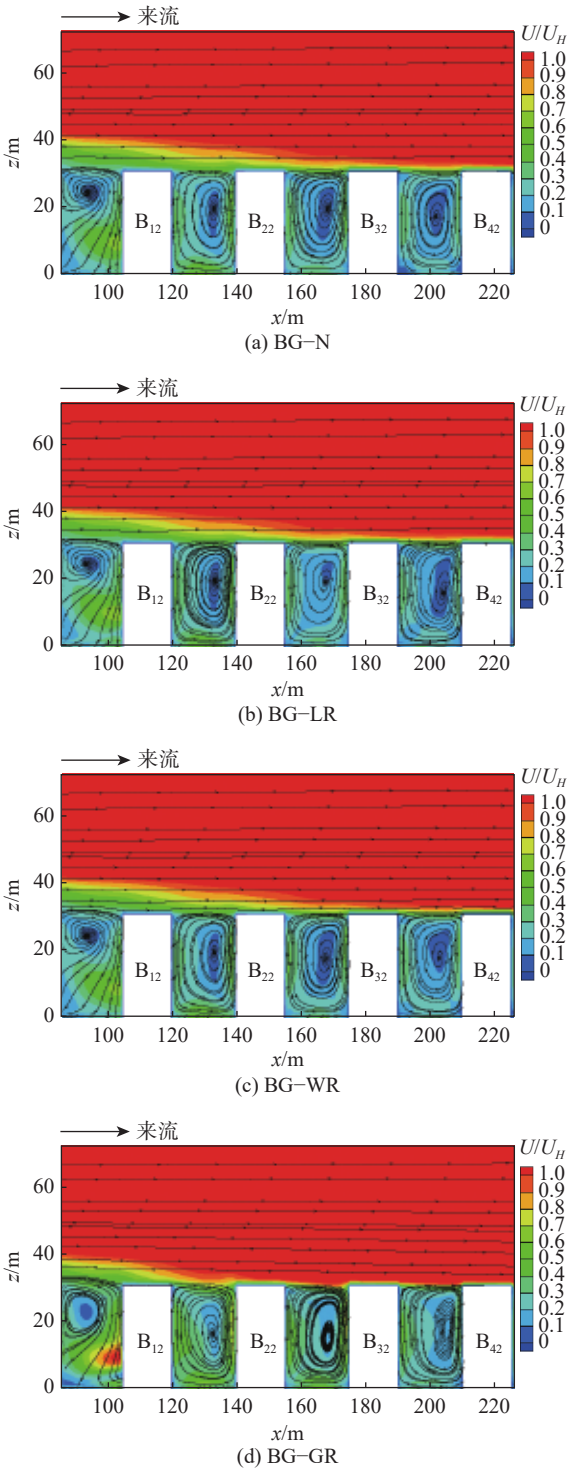


图 3 y=120 m 处的流场分布

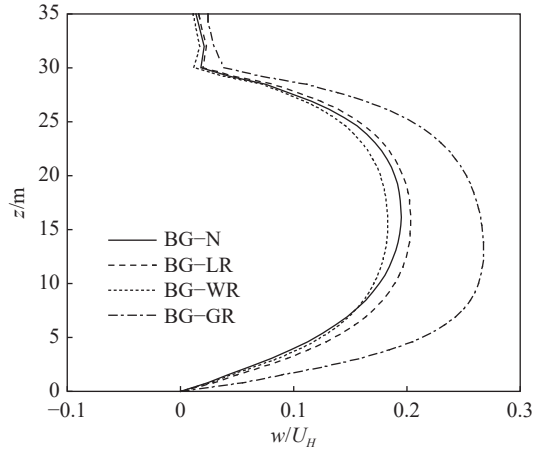
Fig. 3 Distribution of flow field at y=120 m

w 最大，工况 BG−WR 和等温工况下 w 最小，w 最大值约为最小值的 1.5 倍，工况 BG−LR 下 w 则介于两者之间。在 B_{32} 迎风面附近，各工况

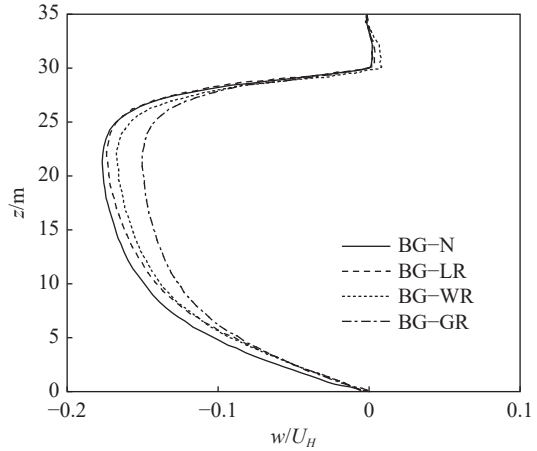
下速度差异相对较小，工况 BG−GR 下 w 最小，工况 BG−WR 下的次之。因此，地面加热能增大背风面附近风速，并使迎风面附近风速减小。上述速度分布特征说明，本文设计的 3 种壁面加热工况均不会改变建筑外流动的主要特点，但对壁面附近的流动强弱仍有影响。

2.2　温度场模拟结果与分析

图 5 和图 6 分别为行人高度（z=1.5 m）处和 y=120 m 处的温度分布。各工况下来流温度均为 298 K。等温工况下温差无变化，因此本文仅给出工况 BG−LR、BG−WR 和 BG−GR 下的温度分布。显然，工况 BG−LR 下气流温度变化最小，仅有背风面温度相对较高。图 3(b)中街谷内的主涡分布表明，背风面附近的热量会被上升气流带走，因此，地面附近的温度受背风面加热的影响较小，温度分布较均匀。图 5(a)和图 6(a)中的气流温度仅高于来流温度 0.5 K，靠近背风面顶部的温升约有 3 K，这主要由屋顶加热引起。



(a) B_{22}背风面附近



(b) B_{32}迎风面附近

图 4　B_{22} 背风面和 B_{32} 迎风面附近的 w

Fig. 4　Distribution of vertical velocity near the leeward side of B_{22} and the windward side of B_{32}

工况 BG−WR 下，壁面加热对建筑附近的气流温升的影响较为明显，尤其是在 B_{3j} 和 B_{4j} 附近。下游街谷内主涡变弱，壁面加热产生的热量不易被主涡带出街谷，因此，更多的热量滞留在街谷内。图 5(b)和图 6(b)表明，行人高度处和街谷断面上的气流温度均比来流温度约增加 2.5 K，在 B_{4j} 迎风面靠近地面附近，温升超过 6 K。

工况 BG−GR 下，次街道、主街道上行人高度处的气流温度分别比来流温度约高 0.5、1.0 K。整体上看，工况 BG−GR 下温度分布的均匀性在 3 个加热工况中居中。显然，地面加热对气流温度影响程度不及工况 BG−WR。图 3(d)表明，地面加热使建筑背风面附近的流动变强，这意味着建筑间的主涡将热量带出街谷的作用也增强。同时，地面加热还会导致行人高度处的 y 向流动变强 [图 2(d)]。该流动也会将部分热量带出街谷。因此，工况 BG−GR 下的温升不明显。

2.3　浓度场模拟结果与分析

参考文献[1]定义无量纲浓度 $C=cU_HHL_s/Q_s$，其中：c 为 CO 的体积分数；L_s 为线源长度，m；Q_s 为污染源释放量，m^3/s。图 7 为行人高度处 C 的分布。主街道地面附近的反向回流使得污染物较难对流扩散至下游，因此，计算域 C 整体较低。由图 7 (a)可知，工况 BG−N 下，高 C 区域主要集中在 B_{1j} 的次街道附近，其余区域的 C 小于 20。由图 2 可知，工况 BG−LR 下，B_{1j} 背风面加热导致街谷内主涡略变强，这对 B_{1j} 次街道地面污染物产生了抽吸作用。因此，与等温工况下相比，工况 BG−LR 下污染源附近污染物向下游扩散的趋势更为明显，B_{1j} 和 B_{2j} 地面附近 C 略高于等温工况下的，但 B_{3j} 和 B_{4j} 附近的 C 仍小于 20。

工况 BG−WR 下行人高度处的 C 较等温工况下的明显变大。迎风面加热使得街谷内的主涡变弱，地面附近−x 向回流也变弱，因此，污染

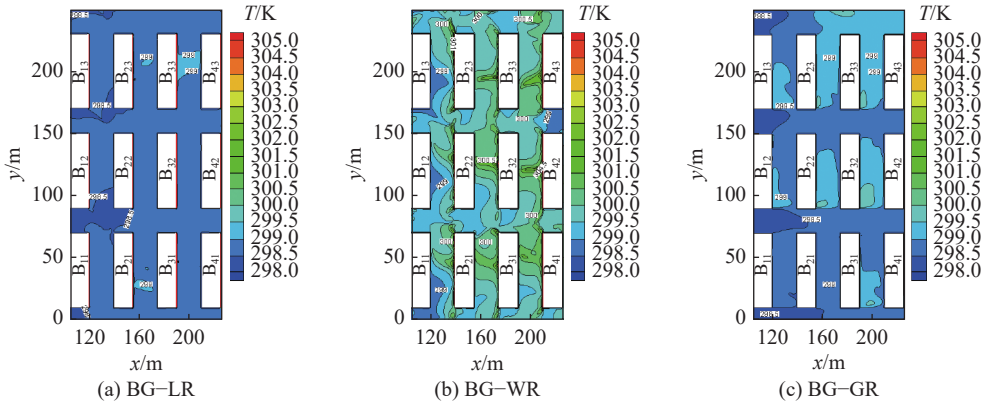


图 5 z=1.5 m 处的温度场

Fig. 5 Distribution of temperature field at z=1.5 m

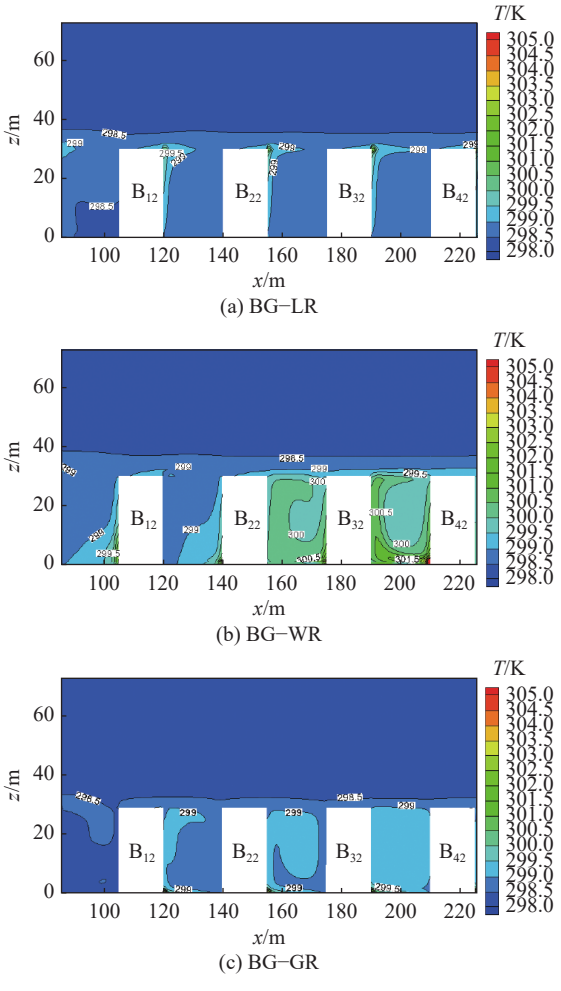


图 6 y = 120 m 处的温度场

Fig. 6 Distribution of temperature field at y=120 m

源处的污染物向下游扩散程度增强，次街道的 C 几乎都大于 20，至 B_{4j} 处 C 才降到 20 以下。工况 BG−GR 下行人高度处的 C 分布与工况 BG−LR 下的类似，这与两种工况下地面附近流场的相似性吻合。

图 8 为 y=120 m 处的 C 分布。需结合流场来分析壁面加热方式对该平面 C 分布的影响。图 3 表明：B_{1j} 前的主涡涡心位于街谷上半部，

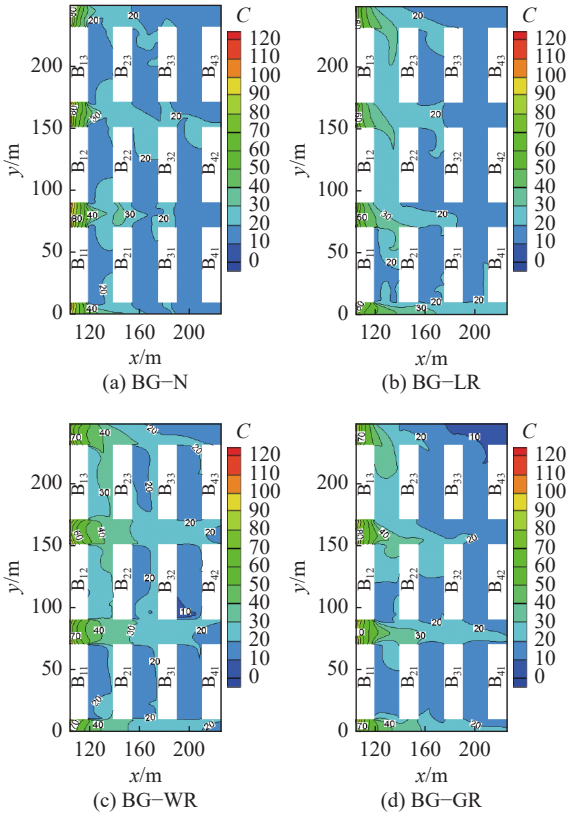


图 7 z=1.5 m 处的浓度场

Fig. 7 Distribution of concentration field at z=1.5 m

主涡的旋向使得地面污染物主要积聚于街谷下半部；靠近 B_{1j} 迎风面屋顶处的污染物被建筑顶部气流输运至下游，浓度逐渐变小。工况 BG–LR 下，B_{1j} 背风面加热使其附近气流加速上升，这对 B_{1j} 迎风面屋顶处的污染物扩散产生阻滞作用。因此，图 8(b)中 B_{12} 顶部的污染物扩散范围明显小于图 8(a)中的。另外，B_{12} 背风面加热

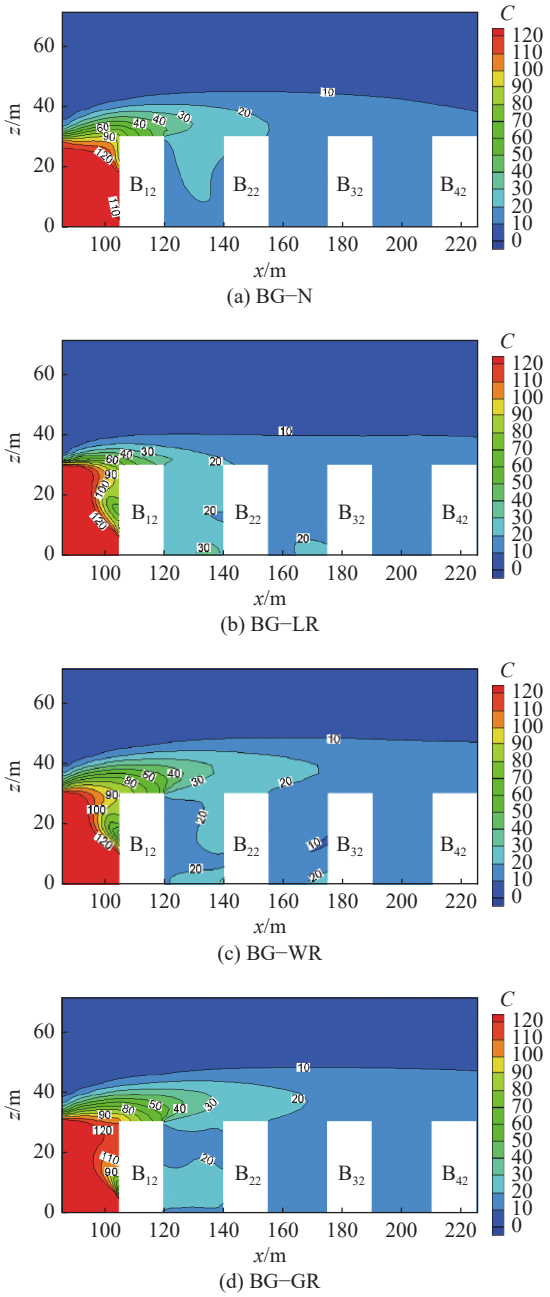


图 8　y=120 m 处的 C 分布

Fig. 8　Distribution of concentration field at y=120 m

也增强了街谷内污染物的扩散程度。与图 8(a)相比，图 8(b)中 B_{12} 与 B_{22} 之间大部分区域的 C 为 20。

图 8(a)和 8(c)表明，工况 BG–WR 下的 B_{12} 迎风面加热使其屋顶附近的 $-z$ 向风速变小，来流使 B_{12} 屋顶附近的污染物向下游建筑屋顶处扩散的趋势变强。因此，B_{12} 迎风面附近的 C 较工况 BG–LR 下的明显变大，污染物也扩散至更远区域，见图 8(b)和 8(c)。工况 BG–WR 下的主涡变弱也使得 B_{12} 和 B_{22} 之间的污染物分布不如工况 BG–LR 下的均匀。

比较图 8(a)和 8(d)可知，在 B_{12} 前的街谷内，工况 BG–GR 下的 C 分布与工况 BG–N 下的基本相同。图 3(d)表明，地面加热会导致 B_{12} 背风面附近 w 增大，但工况 BG–GR 下的 B_{12} 顶部 C 分布却与工况 BG–LR 下的并不相似。由图 3(d)可知，工况 BG–GR 下 B_{12} 和 B_{22} 之间的街谷顶部气流与上游来流间的过渡区明显小于其他 3 个工况下的。这是由此处强烈的 x 向流动将 B_{12} 顶部污染物扩散至下游导致。因此，工况 BG–GR 下建筑顶部的 C 分布与工况 BG–WR 下的相似。

本文研究的 3 种加热工况中均设有屋顶加热。由图 8 可知，屋顶加热对 B_{12} 顶部污染物扩散的影响不及壁面加热的影响强，但 3 个加热工况下 C=10 的等值线呈水平分布，而工况 BG–N 下 C=10 的等值线逐渐下降。这是由屋顶加热使顶部气流抬升所致。因此，屋顶加热会导致污染物的迁移距离变大。

3　结论

为明确壁面热效应的影响，本文设计了等温工况和 3 种壁面加热工况（Ri=0.84），利用 realizable k–ε 紊流模型模拟了规则建筑群外的流场、温度场和浓度场，得到以下结论：

(1) 壁面加热不会改变建筑附近流动的主要特点，但会影响流动的强弱；地面加热会明显增强建筑间的主涡及地面附近的流动；背风面加热时的情况与地面加热时的基本相似，但影响程度略弱，迎风面加热时的情况则相反。

（2）壁面加热对建筑附近空气的温升影响不大。迎风面加热时，气流温度较来流温度约高 2.5 K，而背风面加热下的温升约为 0.5 K，地面加热导致的强对流下的气流温升也小于 1.0 K。

（3）当地面污染源位于建筑群上游时，由于地面附近的流动方向与来流方向相反，建筑群附近的 C 较低，但壁面和屋顶加热使得污染物的扩散程度略变强，且不同壁面加热下的浓度分布有一定差别。

参考文献：

[1] 谢海英, 张天霄, 杨怡. 建筑高度对建筑群行人高度处的风场及污染物扩散影响的数值模拟 [J]. 能源研究与信息, 2023, 39(3)：147－152.

[2] LI W X, MAK C M, FU Y F, et al. Pedestrian-level wind environment surrounding two tandem non-identical height elevated buildings under the influence of twisted wind flows[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 112：105641.

[3] 谢海英, 关欣, 沐贤维, 等. 基于流场验证的紊流施密特数对街道峡谷污染物扩散数值模拟的影响 [J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(5)：466－474.

[4] 高士超, 王树刚, 胡沛裕, 等. 吸附蓄热材料性能研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(S2)：211－218.

[5] XU F S, HANG J, WANG H N, et al. An experimental study of the effects of using cool materials at different building heights on the indoor and outdoor environment[J]. Building and Environment, 2024, 259：111664.

[6] WANG J, LIU S H, MENG X, et al. Influence of the building enclosed forms on thermal contribution of *retro*-reflective and high-reflective coatings[J]. Energy and Buildings, 2022, 273：112400.

[7] HAN M, LU L, SUN B. Overall energy performance of building-integrated bifacial photovoltaic sunshades with different installation and building parameters in hot and humid regions[J]. Solar Energy, 2024, 275：112619.

[8] ZHAO Y L, CHEW L W, KUBILAY A, et al. Isothermal and non-isothermal flow in street canyons: a review from theoretical, experimental and numerical perspectives[J]. Building and Environment, 2020, 184：107163.

[9] YANG W, ZHU X R, LIU J P. Annual experimental research on convective heat transfer coefficient of exterior surface of building external wall[J]. Energy and Buildings, 2017, 155：207－214.

[10] LOUKA P, VACHON G, SINI J F, et al. Thermal effects on the airflow in a street canyon - Nantes'99 experimental results and model simulations[J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2002, 2(5－6)：351－364.

[11] OFFERLE B, ELIASSON I, GRIMMOND C S B, et al. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 122(2)：273－292.

[12] SANTAMOURIS M, PAPANIKOLAOU N, KORONAKIS I, et al. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(27)：4503－4521.

[13] CHEN G W, WANG D Y, WANG Q, et al. Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models with various aspect ratios and thermal storage[J]. Science of the Total Environment, 2020, 726：138147.

[14] ZHAO Y L, LI H W, KUBILAY A, et al. Buoyancy effects on the flows around flat and steep street canyons in simplified urban settings subject to a neutral approaching boundary layer: wind tunnel PIV measurements[J]. Science of the Total Environment, 2021, 797：149067.

[15] ALLEGRINI J, DORER V, CARMELIET J. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons[J]. Building and Environment, 2013, 59：315－326.

[16] LIN Y, ICHINOSE T, YAMAO Y, et al. Wind velocity and temperature fields under different surface heating conditions in a street canyon in wind tunnel experiments[J]. Building and Environment, 2020, 168：106500.

[17] CHEW L W, GLICKSMAN L R, NORFORD L K. Buoyant flows in street canyons: comparison of RANS and LES at reduced and full scales[J]. Building and Environment, 2018, 146：77－87.

[18] MU D, GAO N P, ZHU T. CFD investigation on the effects of wind and thermal wall-flow on pollutant transmission in a high-rise building[J]. Building and Environment, 2018, 137：185－197.

[19] 安乐, 李青蔓, 梁捷, 等. CFD 在我国城市风热环境中的研究与应用 [J]. 空气动力学学报, 2024, 42(3)：1－18.

[20] 梁廷政, 柳靖, 牛旸旸. 空气温度差异对城市街道峡谷通风及污染物分布特征影响的研究 [J]. 建筑科学, 2019, 35(2)：108－115.