

下台阶建筑屋顶烟囱排放污染物扩散特性研究

黄远东, 苏梦洁, 宋书银, 崔鹏义

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 基于风洞实验验证的数值模型, 探究大气稳定度(以整体理查森数 Ri_b 表征: $-0.21 \sim 0.79$) 对下台阶式建筑屋顶烟囱污染物扩散分布的影响。结果表明, 大气稳定度显著改变街谷内流场及污染物分布。稳定条件下($Ri_b > 0$), 街谷内垂直对流较弱: 当 $Ri_b = 0.43$ 时, 竖直中心面($y/H = 0$) 无量纲速度差值(0.25)较中性条件减小 13.80%; $Ri_b = 0.79$ 时, 人行呼吸高度面最大无量纲浓度(4.76)较中性条件升高 18.70%。不稳定条件下($Ri_b < 0$), 街谷内垂直对流增强, 近地面风速增大, 污染物浓度明显降低: 当 $Ri_b = -0.19$ 时, 竖直中心面无量纲速度差值(0.32)较中性条件升高 10.34%; $Ri_b = -0.21$ 时, 人行呼吸高度面最大无量纲浓度(0.88)较中性条件降低 78.19%。本研究揭示了不同大气稳定度下城市局部流场与污染物的扩散规律, 为针对性改善空气质量提供理论基础。

关键词: 下台阶式建筑; 风洞实验; 数值模拟; 大气稳定度; 污染物扩散

中图分类号: X 511

文献标志码: A

Diffusion characteristics of pollutants emitted from roof chimneys on step-down buildings

HUANG Yuandong, SU Mengjie, SONG Shuyin, CUI Pengyi

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

Abstract: Based on a numerical model validated by wind tunnel experiments, the influence of atmospheric stability, characterized by the bulk Richardson number (Ri_b) in the range of -0.21 to 0.79 , on the diffusion of pollutants from roof chimneys on step-down buildings was investigated. The results indicate that the flow field and pollutant distribution within the street canyon are significantly altered by atmospheric stability. Under stable conditions ($Ri_b > 0$), vertical convection within the street canyon was

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277477, 52106102)

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

通信作者: 崔鹏义(1986—), 男, 副教授。研究方向: 大气污染控制。E-mail: pycui@usst.edu.cn

引文格式: 黄远东, 苏梦洁, 宋书银, 等. 下台阶建筑屋顶烟囱排放污染物扩散特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(6): 694-707.

Citation: HUANG Yuandong, SU Mengjie, SONG Shuyin, et al. Diffusion characteristics of pollutants emitted from roof chimneys on step-down buildings[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(6): 694-707.

weak. At $Ri_b = 0.43$, the dimensionless velocity difference (0.25) on the vertical center plane ($y/H = 0$) was reduced by 13.80% compared to that under neutral conditions. At $Ri_b = 0.79$, the maximum dimensionless concentration (4.76) at the pedestrian breathing level was increased by 18.70%. Under unstable conditions ($Ri_b < 0$), vertical convection was enhanced, with increased wind speed near the ground, leading to a notable decrease in pollutant concentration. At $Ri_b = -0.19$, the dimensionless velocity difference (0.32) on the vertical center plane was increased by 10.34%. At $Ri_b = -0.21$, the maximum dimensionless concentration (0.88) at the pedestrian breathing level was decreased by 78.19%. The patterns of local urban flow fields and pollutant dispersion under different atmospheric stability conditions are revealed, providing a theoretical basis for targeted air quality improvement.

Keywords: *step-down building; wind tunnel experiment; numerical simulation; atmospheric stability; pollutant diffusion*

城市建筑物(工业建筑、医院、住宅楼等)屋顶烟囱释放的废气污染物,可能在不利扩散条件下影响相邻建筑室内和街道近地面空气质量。据 WHO 统计,每年约有 700 万人因暴露于空气污染中而过早死亡。长期处于空气质量不佳的环境,会对健康和预期寿命产生负面影响,引起脑血管、心血管、呼吸道疾病^[1]。

大气中污染物的迁移扩散受多种环境因素影响,如气象条件(风速风向,壁面热效应等)^[2-4]、排放源位置及高度^[5]、污染物释放速率^[6]以及建筑几何形状^[7-9]等。Guo 等^[10]利用数值模拟,研究风向、烟囱位置和高度以及建筑构型等因素对高层建筑屋顶烟囱污染物扩散分布的影响。结果表明,改变污染物的排放位置和增加烟囱的高度能够很大程度上减少受影响的区域。Huang 等^[6]研究上游建筑背风区屋顶烟囱污染物扩散受屋顶局部热效应的影响,随着屋顶热效应增强,背风壁面处以及街谷内污染物平均浓度均降低。宋书银等^[11]利用数值模拟研究风向对下台阶建筑屋顶烟囱排放污染物扩散的影响,研究发现,当风向角 $\alpha = 0^\circ$ 时,建筑壁面以及街谷内的人行呼吸高度平均污染物浓度最高。Huang 等^[12]研究了上游建筑高度对下游建筑屋顶烟囱释放污染物扩散的影响,研究发现:当上游建筑高度低于下游建筑时,污染物的扩散几乎没有受到影响;反之,一部分烟囱污染物受逆时针涡流影响进入两建筑物之间的峡谷。

除上述因素,太阳辐射引起近地面建筑表面或地面升温导致的垂直方向大气稳定性变化,致使建筑周围流场更加复杂^[13]。然而,当前围绕污染物扩散的研究主要集中于中性条件下^[14],稳定

和不稳定条件下的研究较少。Uehara 等^[15]利用风洞实验研究不稳定、中性到稳定(整体理查森数 Ri_b 为 $-0.21 \sim 0.79$)的大气稳定度条件对城市街道峡谷中流场的影响,结果表明:当 $Ri_b > 0$ 时,街谷内会形成稳定的温度分层;当 $Ri_b < 0$ 时,街谷内空腔涡流较强,有利于污染物的扩散。Chavez 等^[16]结合数值模拟与风洞实验,研究发现, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型(renormalization group $k-\varepsilon$ model)更能够精确模拟建筑屋顶烟囱排放污染物的扩散情况。综上所述,当前围绕近地面污染物扩散的研究在非中性大气稳定度下还比较少,并且相比于孤立建筑,对周围建筑之间相互影响的研究更具有现实意义。

结合数值模拟和风洞实验,研究不同稳定度条件对下台阶建筑屋顶烟囱排放污染物扩散分布特性的影响。为城市建筑合理布局,优化建筑周围空气质量,改善城市居民的生活环境,促进城市可持续发展提供理论支持。

1 风洞实验

1.1 物理模型

风洞试验在上海理工大学环境风洞实验室开展。如图 1 所示,由建筑 B($H \times 1.5H \times 2H$)与建筑 A($2H \times 1.5H \times H$)组成的下台阶式建筑布局,2 个建筑之间距离为 H ,模型缩尺比为 1 : 100,阻塞率为 2.7% ($H = 20 \text{ cm}$)。 $x-y-z$ 直角坐标系原点 ($x = 0, y = 0, z = 0$) 位于街谷地面中心位置,烟囱 S 位于建筑 A 屋顶正中央,其尺寸为:高度 $0.08H$,内径 $0.05H$,外径 $0.055H$ 。采用六氟化硫 (SF_6) 与

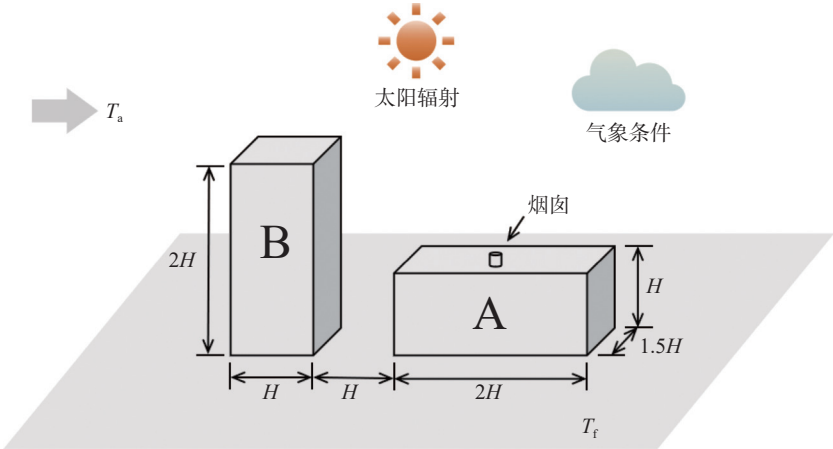


图 1 物理模型与污染源设定

Fig.1 Physical model and pollution source configuration

空气(体积比为 1 : 6)的混合气体模拟污染源, 气体释放速率为 1 L/min。

本研究控制 Ri_b 在 $-0.21\sim0.79$ 范围内, 通过改变来流温度 (T_a) 和地面温度 (T_f) 的差值调控大气稳定度, 进而探究气流运动结构以及污染源释放污染物的扩散特性。

对不同大气稳定度下的入口风剖面进行相似性分析时, 需要考虑烟囱雷诺数 (Re_c)、粗糙高度雷诺数 (Re^*) 以及整体理查森数 (Ri_b); Snyder^[17] 建议 $Re^*>2.5$, $Re_c>2\,000$; Castro 等^[18] 建议参考高度 H 处的临界雷诺数 $Re_H>4\,000$ 。计算公式如下:

$$Re_c = \frac{V_c D}{\eta}$$

(1)

$$Re^* = \frac{u^* z^*}{\eta}$$

(2)

$$Ri_b = \left(\frac{g}{T_{av}} \right) \left[\frac{(T_a - T_f) \delta}{U_a^2} \right]$$

(3)

$$Re_H = \frac{U_H H}{\eta}$$

(4)

式中: V_c 为烟囱高度处的排气速度, m/s; D 为烟囱内径, m; u^* 为摩擦速度, m/s; z^* 为地面粗糙度, m; η 为空气动力黏度, Pa·s; g 为重力加速度; T_{av} 为边界层上的平均温度, K; δ 为边界层厚度, m; U_a 为自由流速度, m/s; U_H 为参考高度 H 处的平均风速, m/s。

表 1 列出不同大气稳定度条件下各参数的具体设定值。其中, 工况 1~4 为实验验证工况。

表 1 不同大气稳定度下的主要参数

Tab.1 Key parameters under different atmospheric stability conditions

工况	稳定度	u^*/U_{700}	$U_{700}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Re^*	Re_H	Ri_b	T_a/K	T_f/K
1	不稳定	0.079	1.476	26.0	9 973	-0.21	293	352
2	不稳定	0.080	1.502	26.8	10 151	-0.19	292	332
3	不稳定	0.073	1.499	24.4	10 128	-0.12	292	313
4	中性	0.061	1.507	20.5	10 183	0	293	293
5	稳定	0.049	1.327	14.5	8 967	0.11	311	294
6	稳定	0.037	1.212	10.0	8 190	0.43	331	294
7	稳定	0.029	1.098	7.1	7 419	0.79	351	294

如图 2 所示, 在建筑 B 背风壁面中心线上布置 10 个污染物采样点, 1 号采样点距地面 1.5 cm, 1~7 号间隔为 3 cm, 7~10 号间隔为 6 cm。风洞实验现场布置如图 3 所示。

2 数值模拟

2.1 控制方程

本研究将气流运动视为不可压缩流动, 考虑

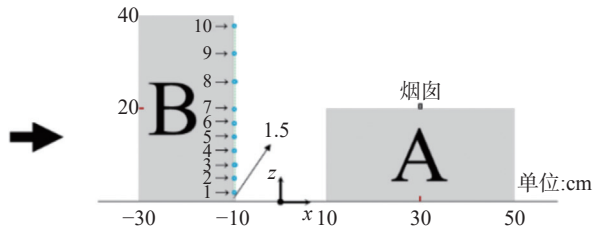


图2 采样点布置

Fig.2 Sampling point layout

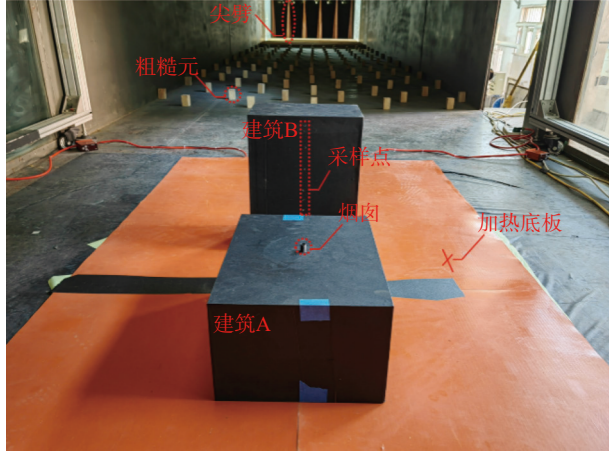


图3 风洞实验现场设置

Fig.3 Field setup of the wind tunnel experiment

不同大气稳定度下不同温度层结,具体控制方程如下:

连续性方程

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

动量方程

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

能量方程

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

式中: u_i 、 u_j 分别为 x_i 和 x_j 方向上的平均速度分量, m/s; μ 为分子黏度, Pa/s; μ_t 为湍流黏度, Pa/s; ρ 为局部气体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; g_i 为重力加速度在 x_i 方向上的分量, m/s²; T 为温度, K; Pr 为湍动普朗特数, 取值为 0.85; σ 为普朗特数的倒数; S_T 为热源项, W·(m³·s)⁻¹。

为了应对壁面受热引发的污染物密度变化,本研究引入 Boussinesq 模型,它降低了密度变化的复杂性,将所有求解方程中的密度视为恒定值,除了动量方程中的浮力项^[19]:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (8)$$

式中: ρ_0 为流体的恒定密度, kg·m⁻³; T_0 为操作温度, K; β 为热膨胀系数。

根据 Tominaga 等^[20] 的相关研究,选择 RNG k - ε 湍流模型,对烟囱释放污染物的迁移扩散进行求解,采用三维稳态对流扩散方程^[21],即

$$\frac{\partial(u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_m + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_p \quad (9)$$

式中: C 为污染物浓度, kg·m⁻³; D_m 为分子扩散系数; Sc_t 为湍流施密特数,取值为 0.7; ν_t 为湍流涡黏性; S_p 为污染源项。

2.2 计算域与边界条件

数值模型计算区域如图 4 所示,根据文献[22]确定计算域大小,数值模型与风洞模型保持一致,计算域入口、两侧面距离建筑为 $6H$,顶部平面距离建筑 B 为 $6H$,出口平面距离建筑 A 为 $15H$ 。

入口采用速度入口(velocity-inlet),风速 $U(z)$ 采用以下公式定义^[3]:

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_0}{z_0} \right) \quad (10)$$

式中: κ 为冯·卡门常数,取值为 0.42; z 为垂直坐标, m; z_0 为粗糙长度, m。

进口剖面处的湍流强度 k 和湍流耗散率 ε 按照不同的稳定度进行定义^[23]。

中性条件为

$$k(z) = \frac{u^{*2}}{\sqrt{D_\mu}} \quad (11)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u^{*3}}{\kappa z} \quad (12)$$

式中, D_μ 为摩擦系数,取值为 0.09。

稳定以及不稳定条件为

$$k(z) = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{\frac{\phi_\varepsilon(z/L)}{\phi_m(z/L)}} \quad (13)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u^{*3}}{\kappa z} \phi_\varepsilon \quad (14)$$

式中, ϕ_m 和 ϕ_ε 为引进的修正函数,由垂直坐标 z 和莫宁-奥布霍夫长度 L (Monin-Obukhov length) 进行定义,即

$$\phi_m = 1 + 5(z/L) \quad (15)$$

$$\phi_\varepsilon = 1 + 4(z/L) \quad (16)$$

当大气稳定度为不稳定条件时,根据以下

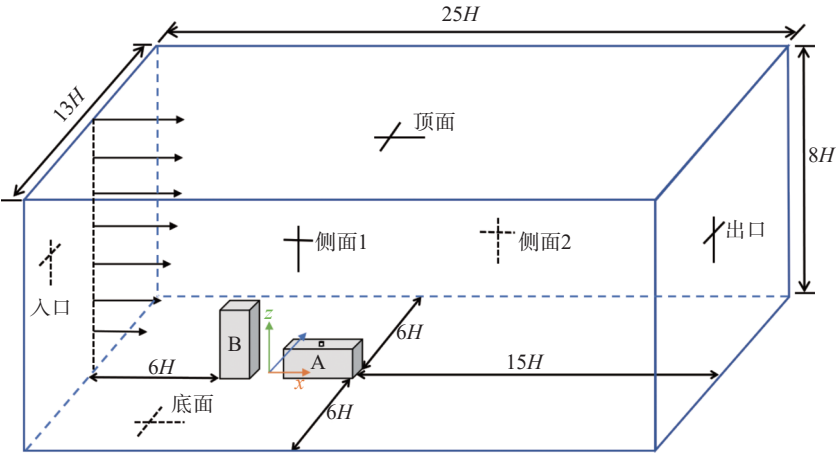


图 4 数值模型计算域

Fig.4 Computational domain of the numerical model

公式进行定义：

$$\phi_m = 1 - 16(z/L)^{-1/2} \tag{17}$$

$$\phi_e = 1 - 16(z/L)^{-1/4} \tag{18}$$

$$L = \frac{u'^2 T_0}{\kappa g T^*} \tag{19}$$

式中： u^* 为湍流摩擦速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； T_0 为参考高度处的平均气温； T^* 为摩擦温度，K。

出口设置为自由流出边界条件(outflow)，侧面以及顶面为对称边界条件(symmetry)，建筑物壁面以及地面为无滑移边界条件，近壁面区域采用标准壁面函数(standard wall functions, SWFs)。数值模拟采用有限体积法(FVM)进行离散，压力与速度采用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)，对流离散项采用二阶迎风格式，设定各变量相对残差小于 10^{-6} ，且流场无变化时为收敛状态。

本文采用的无量纲浓度(K)定义如下：

$$K = \frac{C_r U_H H^2}{C_e Q} \tag{20}$$

式中： C_r 为污染物(SF_6)的摩尔分数； C_e 为烟囱排放污染物摩尔分数，取值为 $1/7$ ； Q 为污染源(烟囱)释放污染物的源强，取值为 $7.85 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 。

2.3 网格独立性分析

设计 3 套不同网格数量的计算方案：网格 1(89 万)、网格 2(168 万)和网格 3(335 万)，提取街谷中心位置处的 U/U_{700} 进行网格独立性分析。如图 5 所示，在 $z/H = 0 \sim 0.8$ 时，网格 1 与网格 3 的 U/U_{700} 相差大于 10%，而网格 2 与网格 3

的 U/U_{700} 最大差值小于 5%，因此，选取网格 2 进行数值仿真计算。建筑壁面以及烟囱附近的网格划分如图 6 所示，建筑壁面最小网格尺寸为 4 mm，烟囱附近网格尺寸为 2 mm，变化率均为 1.08。

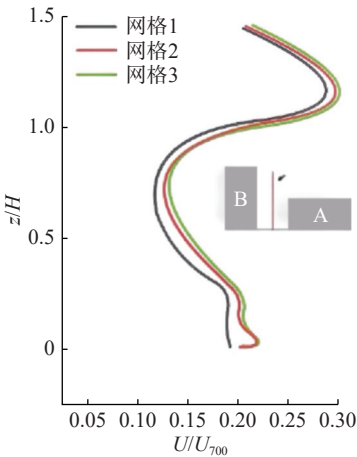


图 5 3 种网格在街谷中心处的 U/U_{700} 对比

Fig.5 Comparison of U/U_{700} at the street canyon center among three grids

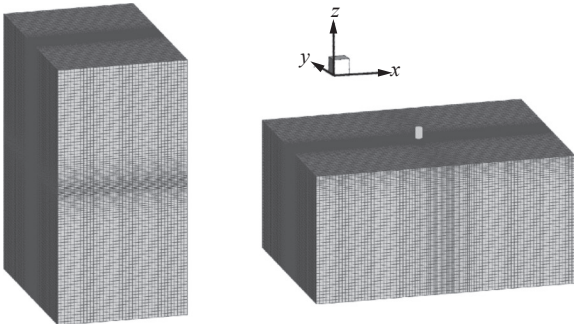


图 6 网格划分(168 万)

Fig.6 Grid generation (1.68 million cells)

2.4 模型验证

选取中性条件 ($Ri_b = 0$) 与不稳定条件 ($Ri_b = -0.12$ 、 -0.19 、 -0.21) 的数值模拟结果 (右) 与风洞实验 (左) 进行比较。如图 7 所示, 数值模拟与风洞实验定性验证结果具有良好的一致性。

图 8 为建筑 B 背风面中心线 ($x = -0.1\text{ m}$) 位置在中性条件 ($Ri_b = 0$) 与不稳定条件 ($Ri_b = -0.12$ 、

-0.19 、 -0.21) 下, 数值模拟与风洞实验无量纲浓度 K 的对比。结果表明: 当 $Ri_b = 0$ 时, 该位置无量纲浓度变化幅度不大; 当 $Ri_b < 0$ 时, 污染物最大无量纲浓度上移, 且近地面处的污染物 K 值随着不稳定条件的增强而减小。综上所述, 关于烟囱排放污染物扩散分布规律, 风洞实验结果与数值模拟结果一致, 能够相互引证。

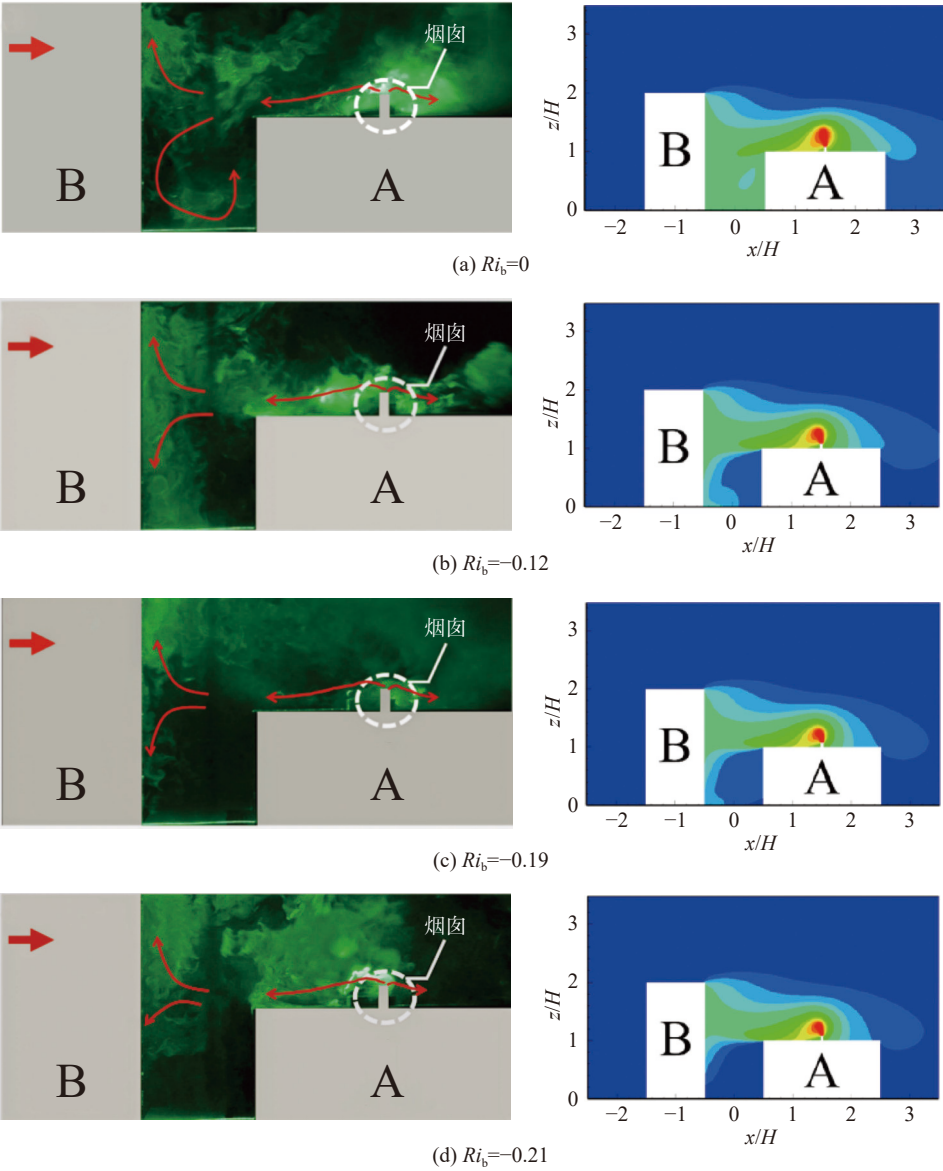


图 7 中性条件与不稳定条件下烟囱排放污染物扩散的定性对比

Fig.7 Qualitative comparison of pollutant diffusion from chimneys under neutral and unstable conditions

3 结果与讨论

3.1 不同 Ri_b 下流场结构变化

图 9 为不同 Ri_b 下竖直中心面 ($y/H = 0$) 上的流场变化, 采用无量纲速度 $(u_y^2 + u_z^2)^{1/2} / U_{700}$ 进行比

较。其中: u_y 为横向速度; u_z 为垂直方向速度。上游气流经过建筑 B 屋顶后在其背风面下游形成稳定的回流区, 进入街谷的气流速度较小, 气流从两侧进入街谷, 在竖直中心面上从右往左流动。当 $Ri_b = 0$ 时, 街谷内形成一个逆时针旋涡。

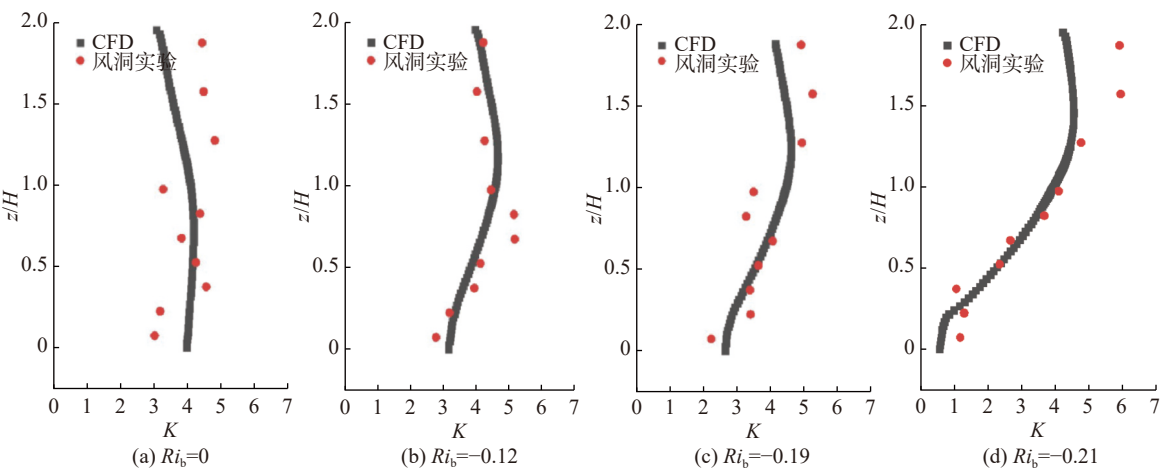


图 8 中性条件与不稳定条件下建筑 B 背风面中心线处无量纲浓度 K 对比

Fig.8 Comparison of dimensionless concentration K along the centerline of the leeward side of building B under neutral and unstable conditions

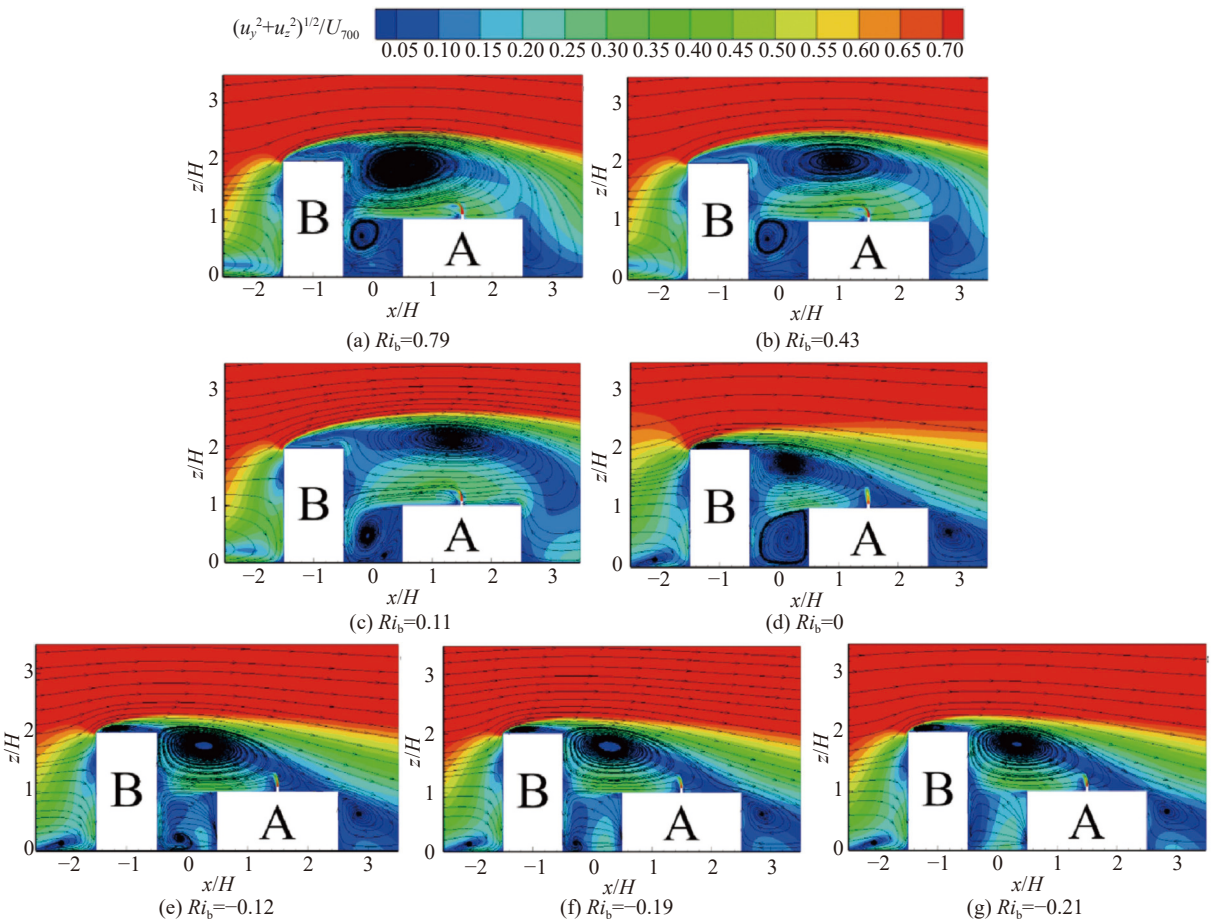


图 9 不同 Ri_b 下竖直中心面 ($y/H=0$) 处流线和无量纲速度 $(u_y^2+u_z^2)^{1/2}/U_{700}$ 分布

Fig.9 Streamlines and distributions of dimensionless velocity $((u_y^2+u_z^2)^{1/2}/U_{700})$ on the vertical central planes ($y/H=0$) under different Ri_b conditions

当 $Ri_b > 0$ 时, 随着 Ri_b 增大, 街谷内旋涡逐渐减小并且上移; 当 $Ri_b = 0.43$ 、 0.79 时, 近地面因与上层气流存在温度差而形成稳定的水平运动气流层。当 $Ri_b < 0$ 时, 地面热浮力随 Ri_b 增大而增大,

街谷内旋涡逐渐减弱, 垂直对流逐渐增强。

图 10 为稳定 $Ri_b = 0.43$ 、中性 $Ri_b = 0$ 、不稳定 $Ri_b = -0.19$ 条件下竖直中心面 ($y/H=0$) 上无量纲速度 u_z/U_{700} 分布。对比分析可知, 在建筑 B 背风面

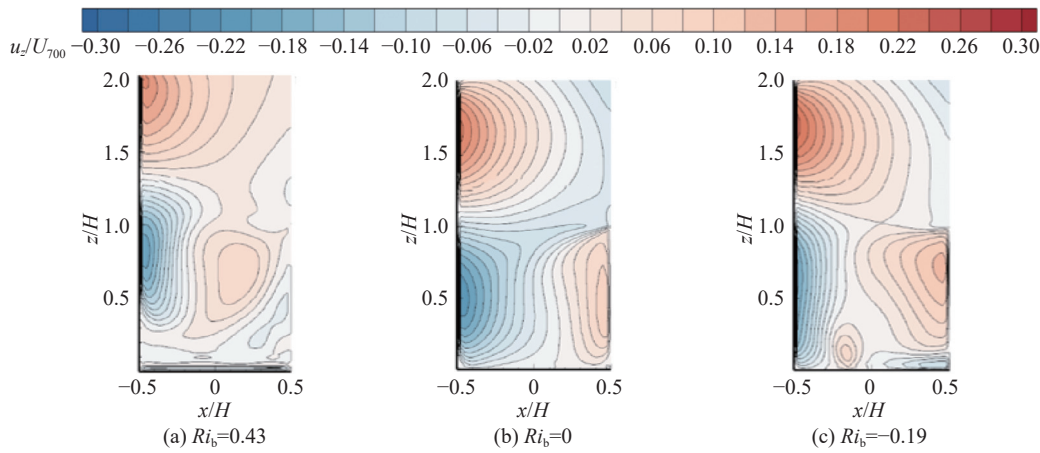


图 10 3 种大气稳定度下竖直中心面 ($y/H=0$) 上无量纲速度 (u_z/U_{700}) 分布

Fig.10 Distributions of dimensionless velocity (u_z/U_{700}) on the vertical central planes ($y/H=0$) under three atmospheric stability conditions

$z/H=1.2$ 处, 一部分回流向上流动, 另一部分则在街谷内逆时针流动。当 $Ri_b=0.43$ 时, 受地面低温影响, 近地面流速几乎为 0; 当 $Ri_b=0$ 时, 街谷内形成稳定的逆时针旋涡; 当 $Ri_b=-0.19$ 时热浮力增强, 下部的旋涡基本消失。中性条件下街谷 z 向速度差值为 0.29; 稳定条件较中性条件降低 13.80%; 不稳定性条件下 z 向无量纲速度差值最大, 较中性条件上升 10.34%。

图 11 为不同 Ri_b 下人行呼吸高度面 ($z/H=0.075$) 流线以及无量纲速度 $(u_x^2+u_y^2)^{1/2}/U_{700}$ 分布, u_x 为水平方向速度。对比分析可知, 建筑 B 迎风面处发生流动分离, 街谷内无量纲速度相对较小。当 $Ri_b=0$ 时, 经过人行呼吸高度面向下游流动的气流在建筑 A 迎风面附近形成旋涡。当 $Ri_b>0$ 时, 随着稳定性增强, 气流在街谷内形成逆时针旋涡。当 $Ri_b<0$ 时, 建筑 A 迎风面中心位置处形成 2 个涡, 且逐渐增大, 当 $Ri_b=-0.21$ 时街谷内形成 2 个顺时针旋涡。

3.2 不同 Ri_b 下竖直中心面上温度分布

图 12 为不同 Ri_b 下街谷竖直中心面 ($y/H=0$) 上的无量纲温度 θ 分布。由无量纲温度 θ 计算公式(21)可知, θ 值越接近 0, 气温与地面温度越相近, θ 值越接近 1, 则越接近来流温度。当 $Ri_b>0$ 时, 街谷近地面形成稳定的温度层结, 且随稳定度的增强而增厚; 在 $0.5<z/H<1$ 位置处, 建筑 A 迎风壁面附近的气流出现温度梯度变化。当 $Ri_b<0$ 时, 随 Ri_b 减小, 街谷内温度垂直梯度逐渐增大, 建筑 B 背风面附近处温度梯度变化较小, 但范围大于稳定条件。

无量纲温度 θ 定义如下:

$$\theta = \frac{T - T_f}{T_a - T_f} \tag{21}$$

式中: T 为测量点的温度, K; T_f 为地面温度, K; T_a 为来流温度, K。

3.3 不同 Ri_b 下烟囱污染物浓度分布特性

图 13 为不同 Ri_b ($-0.21\sim0.79$) 下竖直中心面 ($y/H=0$) 上烟囱排放污染物无量纲浓度 K 分布。大部分污染物经过回流进入上游建筑壁面以及街谷内, 不同 Ri_b 对烟囱污染物扩散影响较大。当 $Ri_b>0$ 时, 烟囱污染物回流至上游区域内, 近地面污染物浓度较低。当 $Ri_b=0$ 时, 街谷内气流涡中心位置污染物浓度降低。当 $Ri_b<0$ 时, 热浮力抑制气流向下运动, $Ri_b=-0.21$ 时, 污染物未扩散到建筑 B 背风面近地面。

图 14 为不同 Ri_b 下烟囱排放污染物在人行呼吸高度面 ($z/H=0.075$) 的 K 分布。对比可知, 稳定条件下, 烟囱污染物在人行呼吸高度面影响强度大、范围广, 不稳定条件下范围小, 中性条件下居于二者之间。当 $Ri_b=0$ 时, 最大 K 值为 4.01, 出现在建筑 B 附近。当 $Ri_b>0$ 时, 街谷内形成逆时针旋涡, 污染物难以扩散出去, 最大 K 值位于旋涡中心, 在此流场作用下, 人行呼吸高度面上的污染物呈现向建筑 A、B 两侧壁面扩散的分布特征。当 $Ri_b=0.79$ 时, 最大 K 值较中性条件增加 18.70%; 当 $Ri_b<0$ 时, 热浮力阻碍污染物向下运动, 当 $Ri_b=-0.21$ 时, 最大 K 值较中性条件减少 78.19%。

建筑壁面处的污染物浓度分布能够直观地反

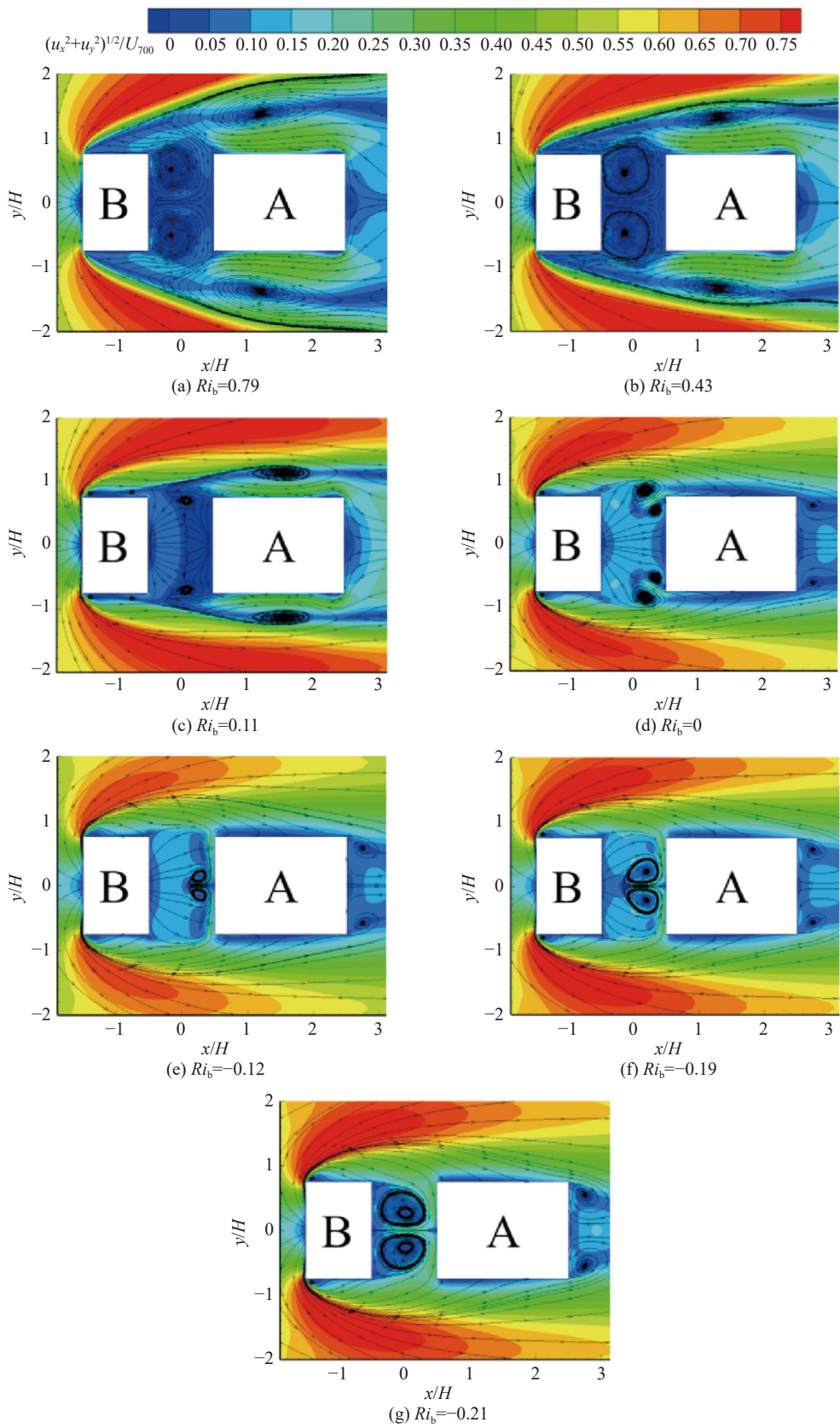


图 11 不同 Ri_b 下人行呼吸高度面 ($z/H = 0.075$) 流线以及无量纲速度 $((u_x^2 + u_y^2)^{1/2} / U_{700})$ 分布

Fig.11 Streamlines and distributions of dimensionless velocity $((u_x^2 + u_y^2)^{1/2} / U_{700})$ on the pedestrian breathing level planes ($z/H = 0.075$) under different Ri_b conditions

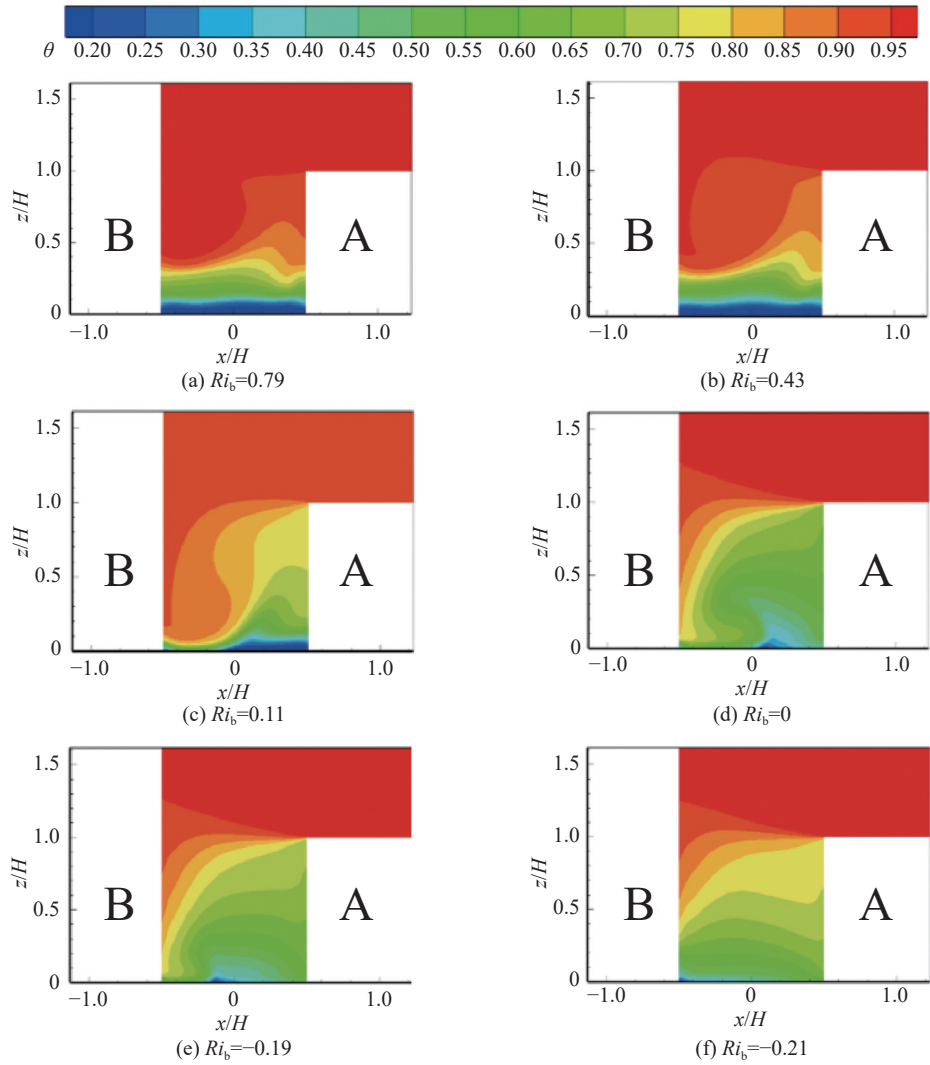


图 12 不同 Ri_b 下竖直中心面 ($y/H=0$) 上无量纲温度 θ 分布

Fig.12 Distributions of dimensionless temperature θ on the vertical central planes ($y/H=0$) under different Ri_b conditions

映出不同朝向居住人群所处的大气环境, 因此, 还需关注街谷内人行呼吸高度 ($z/H=0.075$) 处污染状况。将建筑四周壁面进行命名, 如图 15 所示。下游建筑 A 的背风面为 A-1, 迎风面为 A-4, 偏向 y 轴负方向壁面为 A-2, 偏向 y 轴正方向为 A-3。同理, 上游建筑 B 的背风面为 B-1, 迎风面为 B-4, 偏向 y 轴负方向壁面为 B-2, 偏向 y 轴正方向为 B-3; 人行呼吸高度面为 P。

如图 16 所示, 采用壁面平均无量纲浓度 $\bar{K}$ 评估建筑 A 释放烟囱污染物的影响。分析可知, 建筑两侧壁面受影响程度一致, 即壁面 A-2 和 A-3 平均无量纲浓度相等, 壁面 B-2 和 B-3 亦是如此。烟囱污染物对建筑壁面 B-1、B-2 及 A-1 的影响较大, 这是因为烟囱释放口位于回流区域内, 大部分污染物被携带至上游区域。壁面 A-4 在稳

定条件下 $\bar{K}$ 较高, 较中性条件平均增加 157.29%。当 $Ri_b=0.11$ 时, 污染物 $\bar{K}$ 最高, 携带污染物向下流动的气流与壁面 A-4 接触面积较大; 随着稳定度增大, 污染物扩散对壁面 A-4 的影响先减弱后增强。不稳定条件下 $\bar{K}$ 较低, 较中性条件平均减少 67.17%, 并且随着不稳定度的增大, 污染物扩散对壁面 A-4 的影响逐渐减弱。壁面 B-1 在稳定条件下 $\bar{K}$ 相对较高, 较中性条件增加 124.53%; 随着稳定度增强, 污染物在壁面 B-1 聚集; 不稳定条件下, 壁面 B-1 污染物 $\bar{K}$ 先升高后降低。因初期污染物聚于街谷上方, 随着不稳定度的增强, 热浮力增大, 污染物浓度再次下降。烟囱释放的污染物也扩散至建筑 B 侧壁面 B-2、B-3 上, 稳定条件下污染物 $\bar{K}$ 较高, 而不稳定条件下与壁面 B-1 情形相同。壁面 B-4 是上游建筑的迎风面, 污染物

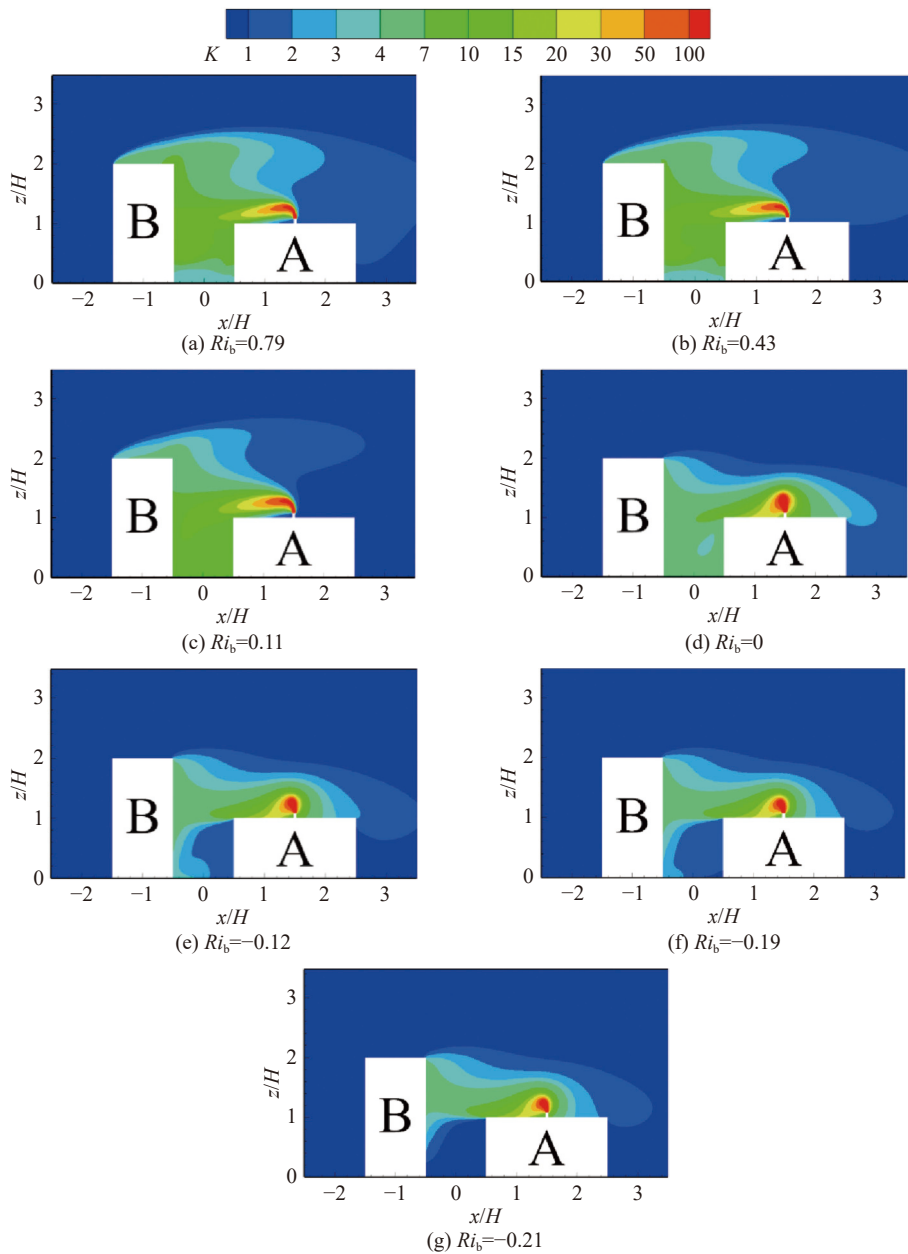


图 13 不同 Ri_b 下竖直中心面 ($y/H=0$) 上烟囱污染物无量纲浓度 K 分布

Fig.13 Distributions of dimensionless concentration K of pollutant from chimneys on the vertical central planes ($y/H=0$) under different Ri_b conditions

未能扩散至这个迎风面。稳定条件下，人行呼吸高度面 P 上的 $\bar{K}$ 较高。在 $Ri_b = 0.11$ 时， $\bar{K}$ 最大，较中性条件增加 36.72%，随着稳定性增强，污染物浓度减小，但仍高于中性条件；在不稳定条件下，平面 P 上的 $\bar{K}$ 逐渐降低，在 $Ri_b = -0.21$ 时， $\bar{K}$ 最小，较中性条件降低 81.01%。总体而言，稳定条件 ($Ri_b > 0$) 时，气流垂直交换变弱，不利于污染物的扩散，建筑壁面以及人行呼吸高度面上的 $\bar{K}$ 相对较高；不稳定条件 ($Ri_b < 0$) 下，气流垂直交换增强，利于扩散， $\bar{K}$ 相对较低。

4 结 论

本文利用风洞实验验证的数值模型，研究不同大气稳定度下下台阶建筑屋顶烟囱排放污染物扩散分布特性，得出以下结论：

a. 来流经过上游建筑 B 后在其下游区域形成速度较小回流区，在街谷内容易形成稳定的温度层结；稳定条件下的垂直运动较弱，在街谷近地面形成逆时针旋涡；不稳定条件下，热浮力加快气流垂直运动，回流区向下运动的气流受到抑

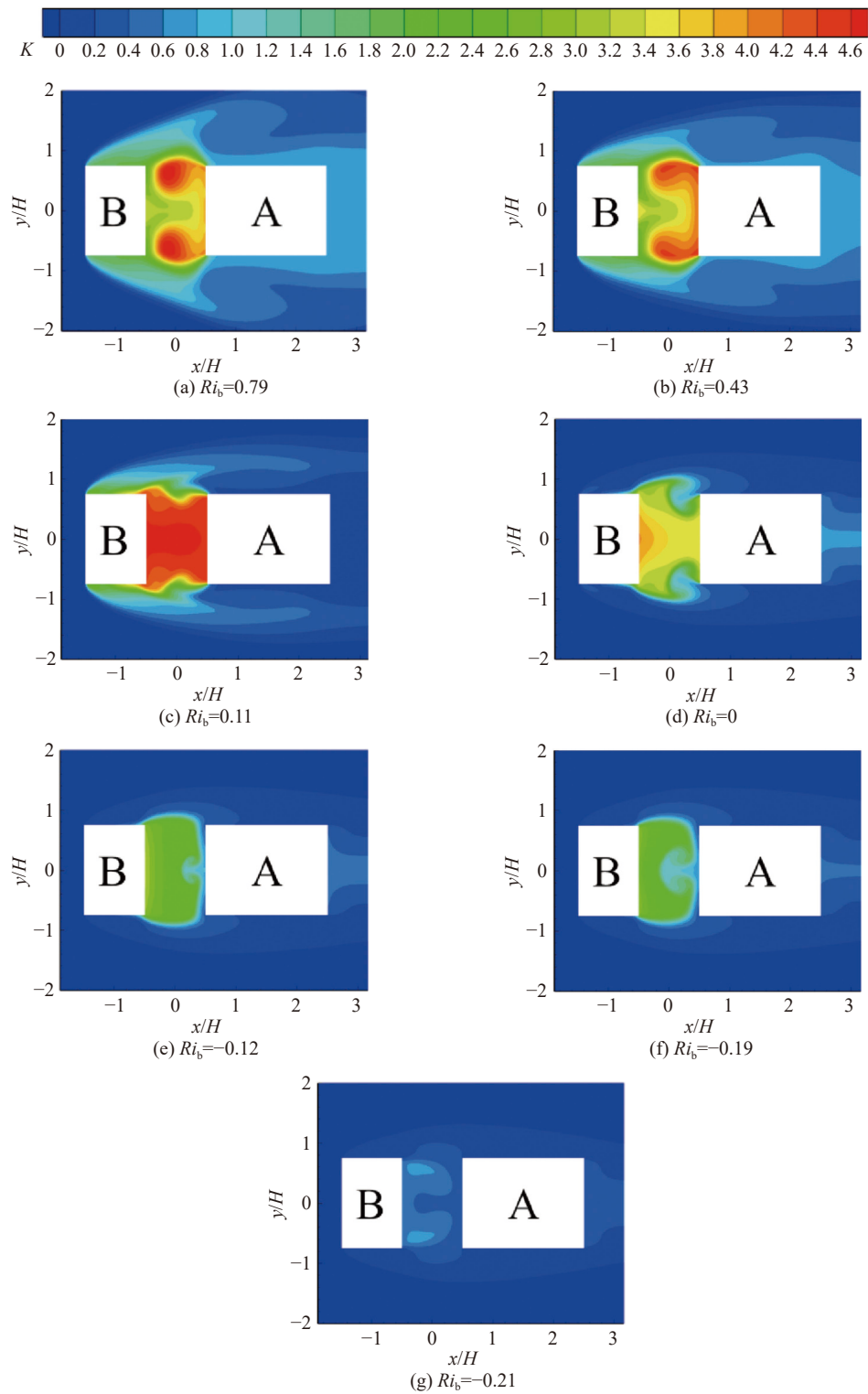


图 14 不同 Ri_b 下烟囱污染物在人行呼吸高度面 ($z/H = 0.075$) 处无量纲浓度 K 分布

Fig.14 Distribution of dimensionless concentration K of pollutant from chimneys at pedestrian breathing level planes ($z/H = 0.075$) under different Ri_b conditions

制，人行呼吸高度面气流主要来自建筑 B 侧壁面水平运动的气流；中性条件下，回流会在街谷内形成逆时针旋涡。

b. 稳定条件下，街谷内的污染物不易扩散，

其中， $Ri_b = 0.79$ 时，街谷内壁面 B-1 的 $\bar{K}$ 较中性条件下增加 124.53%，壁面 A-4 的 $\bar{K}$ 增加 157.29%，人行呼吸高度面 P 的最大 $\bar{K}$ 增大 18.70%；不稳定条件下，街谷内气流垂直运动加快，污染物易于

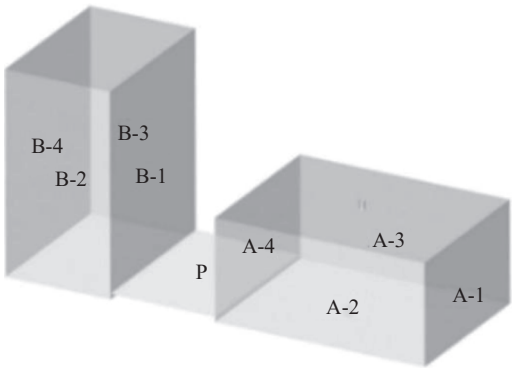


图 15 建筑四周壁面以及人行呼吸高度面对应编号

Fig.15 Numbering of building surrounding walls and pedestrian breathing level planes

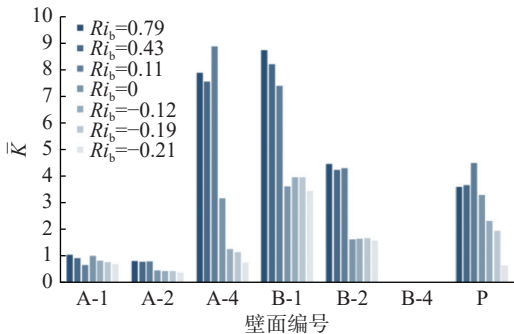


图 16 不同 Ri_b 下不同壁面平均无量纲浓度 $\bar{K}$ 分布

Fig.16 Distributions of average dimensionless concentration $\bar{K}$ on different surfaces under different Ri_b conditions

扩散，其中， $Ri_b = -0.21$ 时，街谷内人行呼吸高度面 P 的最大 $\bar{K}$ 相对中性条件减小 78.19%。烟囱释放污染物在不同稳定度时在壁面 A-4 上的 $\bar{K}$ 变化最大。

参考文献：

[1] BRODNY J, TUTAK M. Analysis of the diversity in emissions of selected gaseous and particulate pollutants in the European Union countries[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 582–595.

[2] 翁佳烽, 林满, 王宝民, 等. 不同气象条件小区通风与污染物扩散模拟 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2019, 58(1): 30–38.

[3] ALLEGRINI J. A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 71–88.

[4] DAI Y W, MAK C M, HANG J, et al. Scaled outdoor experimental analysis of ventilation and interunit dispersion with wind and buoyancy effects in street canyons[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 255: 111688.

[5] KESHAVARZIAN E, JIN R Z, DONG K J, et al. Effect of

pollutant source location on air pollutant dispersion around a high-rise building[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 81: 582–602.

[6] 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.

[7] 黄远东, 王梦洁, 钱丽冰, 等. T 型街道内空气流动与污染物扩散特性研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(3): 257–260, 265.

[8] 占龙飞, 束炯, 陈亮. 行列式街区风场和污染物浓度场分布特征 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 61–67.

[9] HAJRA B, STATHOPOULOS T, BAHLOUL A. The effect of upstream buildings on near-field pollutant dispersion in the built environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(28): 4930–4940.

[10] GUO G Z, YU Y, KWOK K C S, et al. Air pollutant dispersion around high-rise buildings due to roof emissions[J]. *Building and Environment*, 2022, 219: 109215.

[11] 宋书银, 黄远东, 崔鹏义, 等. 风向对屋顶烟囱排放污染物扩散特性的影响研究 [J]. 能源研究与信息, 2023, 39(4): 199–206.

[12] HUANG Y D, SONG Y, XU X, et al. Impacts of upstream building height and stack location on pollutant dispersion from a rooftop stack[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(7): 1837–1855.

[13] CAI J J, CHEN J T, CHENG H M, et al. The effects of thermal stratification on airborne transport within the urban roughness sublayer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 184: 122289.

[14] YANG X, ZHANG Y, HANG J, et al. Integrated assessment of indoor and outdoor ventilation in street canyons with naturally-ventilated buildings by various ventilation indexes[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106528.

[15] UEHARA K, MURAKAMI S, OIKAWA S, et al. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(10): 1553–1562.

[16] CHAVEZ M, HAJRA B, STATHOPOULOS T, et al. Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 330–339.

[17] SNYDER W H. Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion[R]. United States: University of Michigan Library, 1981.

[18] CASTRO I P, ROBINS A G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams[J]. [Journal of Fluid Mechanics](#), 1977, 79(2): 307–335.

[19] ZHOU Y, WANG M Y, WANG M N, et al. Predictive accuracy of boussinesq approximation in opposed mixed convection with a high-temperature heat source inside a building[J]. [Building and Environment](#), 2018, 144: 349–356.

[20] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Steady and unsteady RANS simulations of pollutant dispersion around isolated cubical buildings: effect of large-scale fluctuations on the concentration field[J]. [Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics](#), 2017, 165: 23–33.

[21] HUANG Y D, HOU R W, LIU Z Y, et al. Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon[J]. [Aerosol and Air Quality Research](#), 2019, 19(5): 1152–1171.

[22] 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.

[23] PONTIGGIA M, DERUDI M, BUSINI V, et al. Hazardous gas dispersion: a CFD model accounting for atmospheric stability classes[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2009, 171(1/3): 739–747.

(编辑: 丁红艺)



(上接第 693 页)

[13] PRABU V. Integration of *in-situ* CO₂-oxy coal gasification with advanced power generating systems performing in a chemical looping approach of clean combustion[J]. [Applied Energy](#), 2015, 140: 1–13.

[14] KHALLAGHI N, HANAK D P, MANOVIC V. Techno-economic evaluation of near-zero CO₂ emission gas-fired power generation technologies: a review[J]. [Journal of Natural Gas Science and Engineering](#), 2020, 74: 103095.

[15] ZHOU C, SHAH K, MOGHTADERI B. Techno-economic assessment of integrated chemical looping air separation for oxy-fuel combustion: an Australian case study[J]. [Energy & Fuels](#), 2015, 29(4): 2074–2088.

[16] ZANG G Y, JIA J X, TEJASVI S, et al. Techno-economic comparative analysis of biomass integrated gasification combined cycles with and without CO₂ capture[J]. [International Journal of Greenhouse Gas Control](#), 2018, 78: 73–84.

[17] CHENG Z H, ZHANG Z H, LI Y. The nature and development of Zhundong coal[C]//Proceedings of SPIE 11606, ICOSM 2020: Optoelectronic Science and Materials. Hefei: SPIE, 2020: 116061E.

[18] ZHU L, HE Y D, LI L L, et al. Tech-economic assessment of second-generation CCS: chemical looping combustion[J]. [Energy](#), 2018, 144: 915–927.

[19] KHAN M N, SHAMIM T. Techno-economic assessment of a plant based on a three reactor chemical looping reforming system[J]. [International Journal of Hydrogen Energy](#), 2016, 41(48): 22677–22688.

[20] TANG Y T, YOU F Q. Life cycle environmental and economic analysis of pulverized coal oxy-fuel combustion combining with calcium looping process or chemical looping air separation[J]. [Journal of Cleaner Production](#), 2018, 181: 271–292.

[21] CORMOS C C. Evaluation of syngas-based chemical looping applications for hydrogen and power co-generation with CCS[J]. [International Journal of Hydrogen Energy](#), 2012, 37(18): 13371–13386.

[22] LI R, YANG Z, DUAN Y Y. Energy, economic and environmental performance evaluation of co-gasification of coal and biomass negative-carbon emission system[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2023, 231: 120917.

(编辑: 董 伟)