

理想建筑安全通风设计及其量化评价研究

李永强¹, 陈福浩¹, 黄瑶瑶²

(1.重庆科技大学 机械与智能制造学院, 重庆 401331; 2.重庆工商大学 国家智能制造服务国际科技合作基地, 重庆 400067)

摘要: 随着世界范围内城镇化水平的不断提高以及建筑技术的飞速发展, 当代建筑已经向高标准、高品质方向发展。然而在城市建筑快速发展的同时, 2019 年新型冠状病毒给人们的工作和生活方式也带来了极大影响。本研究采取实验测量与理论分析结合的方法, 基于建筑水平方向与竖直方向上关键位置的压强、竖向速度分量、颗粒污染物浓度的定性及定量描绘, 揭示建筑安全通风设计的原则。以实际在建项目为测量载体, 验证设计理论的可靠性。为气态污染所造成的大型公共卫生安全事件的事前预防、事中紧急避险和事后复盘优化上发挥社会价值, 为新时期建筑方针提供理论基础。

关键词: 建筑通风; 城市规划; 空气污染物; 建筑环境

DOI: 10.33142/dfc.v1i1.20153 **中图分类号:** TU-023 **文献标识码:** A

Research on Ideal Building Safety Ventilation Design and the Quantitative Evaluation

LI Yongqiang¹, CHEN Fuhao¹, HUANG Yaoyao²

(1. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. National Intelligent Manufacturing Service International Science and Technology Cooperation Base, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: With the continuous improvement of urbanization levels and the rapid development of construction technology worldwide, contemporary architecture has been evolving towards high standards and high quality. However, while urban construction was developing rapidly, the novel coronavirus epidemic in 2019 also had a great impact on people's work and lifestyle. This study adopts a method combining experimental measurement and theoretical analysis. Based on the qualitative and quantitative depiction of pressure, vertical velocity components, and particulate pollutant concentrations at key positions in the horizontal and vertical directions of buildings, it reveals the principles of building safety ventilation design. Take the actual ongoing projects as the measurement carrier to verify the reliability of the design theory. It plays a social role in the pre-event prevention, emergency avoidance during the event and post-event review and optimization of large-scale public health security incidents caused by gaseous pollution, and provides a theoretical basis for the new era's architectural policy.

Keywords: building ventilation; urban planning; air pollutant; built environment

收稿日期: 2025 年 12 月 4 日

基金项目: 重庆市建设科技计划 (编号 20220184); 重庆市博士后科研项目特别资助 (编号 2211013357670761); 重庆市科技局自然科学基金项目 (编号 CSTB2022NSCQ-MSX1430)

通信作者: 李永强 (1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事建筑通风研究, E-mail: yongqiang.li@nusricq.cn。

0 引言

中国城镇化率自 2000 年的 36.5% 增长至 2018 年的 59.6%，并预计将达到 81.6%⁰。在 2010—2020 年的房地产高速建设中，建筑规模扩张与环境品质提升并不同步；而 2019 年 COVID-19 在武汉暴发⁰ 并造成深远影响⁰，进一步凸显城市通风与微生物气溶胶扩散控制的重要性。

新冠病毒推动全球相关研究激增⁰。美国 Pulle⁰ 用拉格朗日法分析气溶胶 30 分钟内传播；Yuan⁰ 提出高分辨率非 CFD 风场方法；Bauer⁰ 基于 WRF 模拟纽约公共安全事件。欧洲 Gromke⁰ 以风洞研究树篱对街道峡谷扩散的影响；Ramponi⁰ 以“有效空气龄”评估城市去污效率。新加坡 Li⁰ 揭示稳定分层下污染累积机制；Yuan⁰ 构建多层 UCL 模型。

国内研究同样加速发展⁰，彭云龙指出通风指标需结合城市形态⁰；清华大学与气象局模拟北京交通污染⁰；Dai⁰ 基于 CO₂ 示踪揭示房间通风差异；彭云龙指出通风指标需结合城市形态。Huang⁰ 提出“城市透气性地图”并研究热辐射与高架桥影响；Yang⁰ 构建城市—社区—建筑多尺度防疫框架。

尽管成果丰富，但仍存在三大科学空白：①缺乏 UCL 与峡谷中气溶胶最优疏散模型；②健康建筑标准 T/ASC 02-2021⁰ 后仍缺少面向超级传播的城市级规划导则；③不足以支撑高危人群识别与疏散管理。本研究旨在为建筑通风优化、健康建筑设计及城市防疫规划提供关键技术支撑。

1 方法

在开展理论分析之前，需要先对建筑市场现状及设计市场现状进行分析。大量城市因新冠病毒的不可控扩散，大量的人群感染而被迫进行隔离或者局部隔离，给人们的生命财产安全造成了极大影响的同时也引发了人们对现代建筑居住安全的深入思考主流房地产公司建筑设计现状分析。

1.1 主流房地产公司建筑设计现状分析

在世界各地的相关研究中，建筑通风已经有了数百年的研究历史，现代建筑技术、规划理念、设计概念也不断进化。针对当前仍在继续扩大的中国建筑市场，本研究首先依据大型网站官方发布数据，对典型居住建筑前十的开发商进行分析（搜狐网 2022），探讨其市场占比与其建筑设计品质之间的关系，探寻其量与质的相关性（如图 1 所示）。

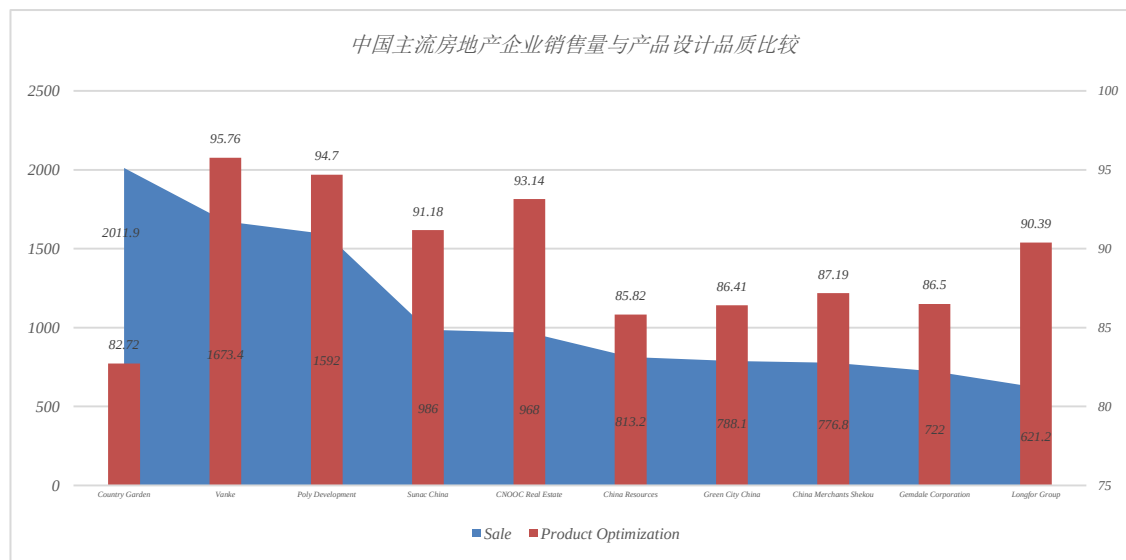


图 1 2022 年中期中国主流房地产企业销售量与产品设计品质比较

图 1 说明（源自 www.sohu.com，数据截止 2022 年 6 月 30 日）：

1. 销售总额：来源于 CRIC 交易额和中科院数据。
2. 销售均价：来源于 CRIC 交易量除以交易面积和中科院数据。

3. 奖项数量：计算最新一届金牌奖数量（建筑设计典型奖项“金牌奖”和“金房奖”）。
4. 项目视图：365 天内所有项目的现场视图（次数）。
5. 平均浏览时长：365 天内浏览的所有项目的平均值。
6. 认证供应商：365 天内企业新认证的工程公司和材料供应商数量。
7. 排名是基于产品功率指标的综合排名。

如图 1 所示，中国前十地产之间的销量差异明显。然而在销量相对较大与销量相对较小的不同地产公司对比而言，其设计水平也各异，与其销量呈现出了明显的不相关性。如作为销量居首的碧桂园集团，其设计水平评价却相对较低；而市场份额占比稍低的龙湖集团，其设计水平却得到较高评价。综合来讲，各品牌地产的销量与其设计品质之间出现了较大偏差。中国的建筑市场表现出不平衡与不稳定的双重特点，需要从项目建设的全周期过程探讨产生这种结果的原因及提出合理的解决办法。

1.2 不同建筑高度模拟分析

以上研究以定性研究为主，首先识别建筑周边涡流区影响的关键位置，以及涡流区在前后建筑布局中的扰动。在该部分研究中，针对以上研究重点区域进行定量研究，以便准确指导建筑设计。在理想条件下，我们研判了自然梯度风在高度风向上、尾流方向上以及建筑两侧间距的影响，在以上位置从建筑表面几何中心位置进行线性延伸，建立监测线，对监测线上各点进行数据捕捉，并最终描述其函数分布区间。模型设计方面，选取 3.3 m 层高作为研究对象，在高层建筑范围内（100 m 高度/30 层），进行建筑分析。选取以上典型研究区域的高阶变量湍流耗散率作为研究对象。

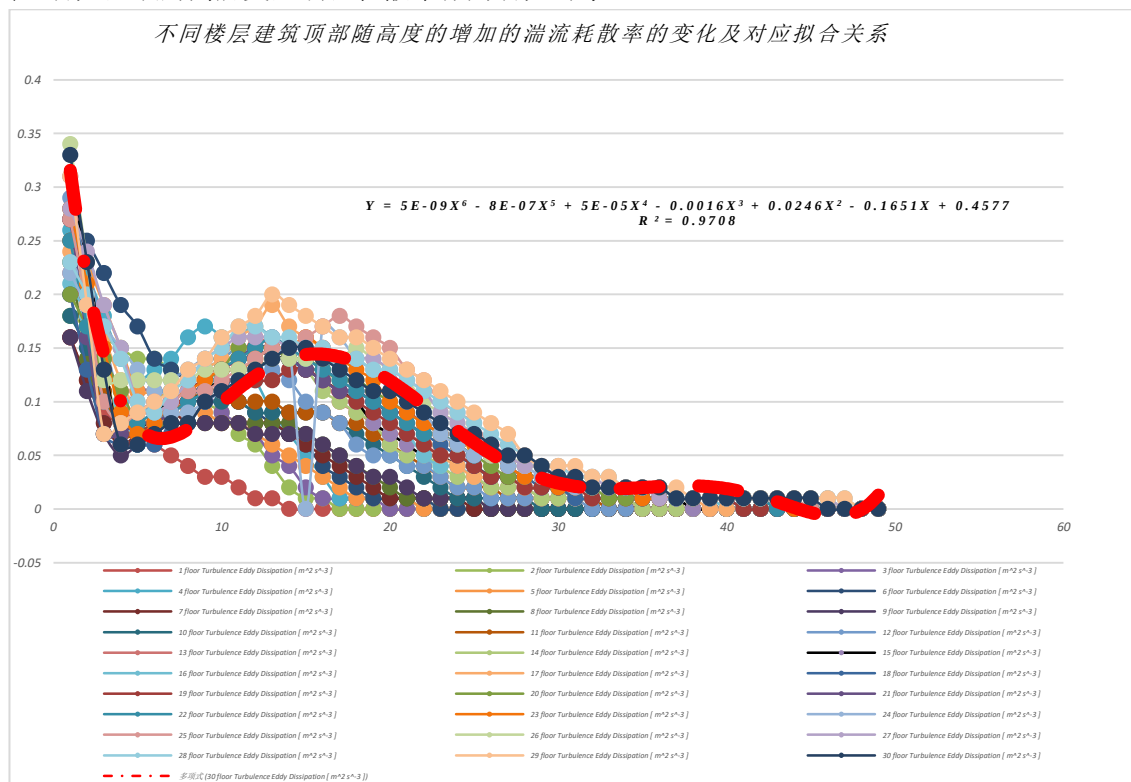


图 2 不同的楼层建筑顶部随高度的增加的 Velocity-Z 的变化及对应拟合关系

如图 2 所示，随着建筑层数的增加，湍流耗散率在其整个变化过程中的数值也增大。同一栋建筑也出现了湍流耗散率数值由较大到迅速减小再增大而后缓慢减小的过程。其最大值出现在约 TED=0.34 m²/s³ 位置，迅速减小的最小值出现在 TED=0.05 m²/s³ 位置，而后形成波动。楼层越高，湍流耗散率变化越慢，所形成影响的区域范围越大，但是其最大值出现在楼面附近位置，受建筑羽流及自然梯度风的共同作用而在近楼面位置迅速形成湍流产生面。通过观察各楼层建筑的湍流耗散率发现，在 0~5 m 范围内，湍流耗散

率迅速减小，而后逐渐增大，在 $Z=50\text{ m}$ 处才逐渐归零。其多项式的提取为建筑顶部安全通风，尤其是建筑顶部污染物排放的设计提供参考数理参考依据。

1.2.1 水平方向模拟分析

如图 3 所示，随着建筑楼层的增加，建筑尾流区所形成的湍流耗散率最值增大，波动（波峰及周期）也增大。楼栋经历了湍流耗散率先增大，而后缓慢减小至 0 的过程。在高层建筑以内，湍流耗散率的最大值达到 $0.07\text{ m}^2/\text{s}^3$ ，且在接近 $Y=900\text{ m}$ 的位置才逐渐减小至接近 0。楼层越高，对应湍流耗散率数值越大，达到稳定所需的距离越长。在 $Y=100\text{ m}$ 范围内，湍流耗散率迅速增大，而后再次迅速减小，在 $Y=400\text{ m}$ 处才逐渐过渡到接近 0 的平稳状态。在自然梯度风和建筑扰流的共同作用下，湍流耗散率最终减小并耗散。湍流耗散率的存在同样会影响人们出行的舒适性，对以上湍流耗散率的数值描述，有利于建筑尾流区园林及道路的设计。

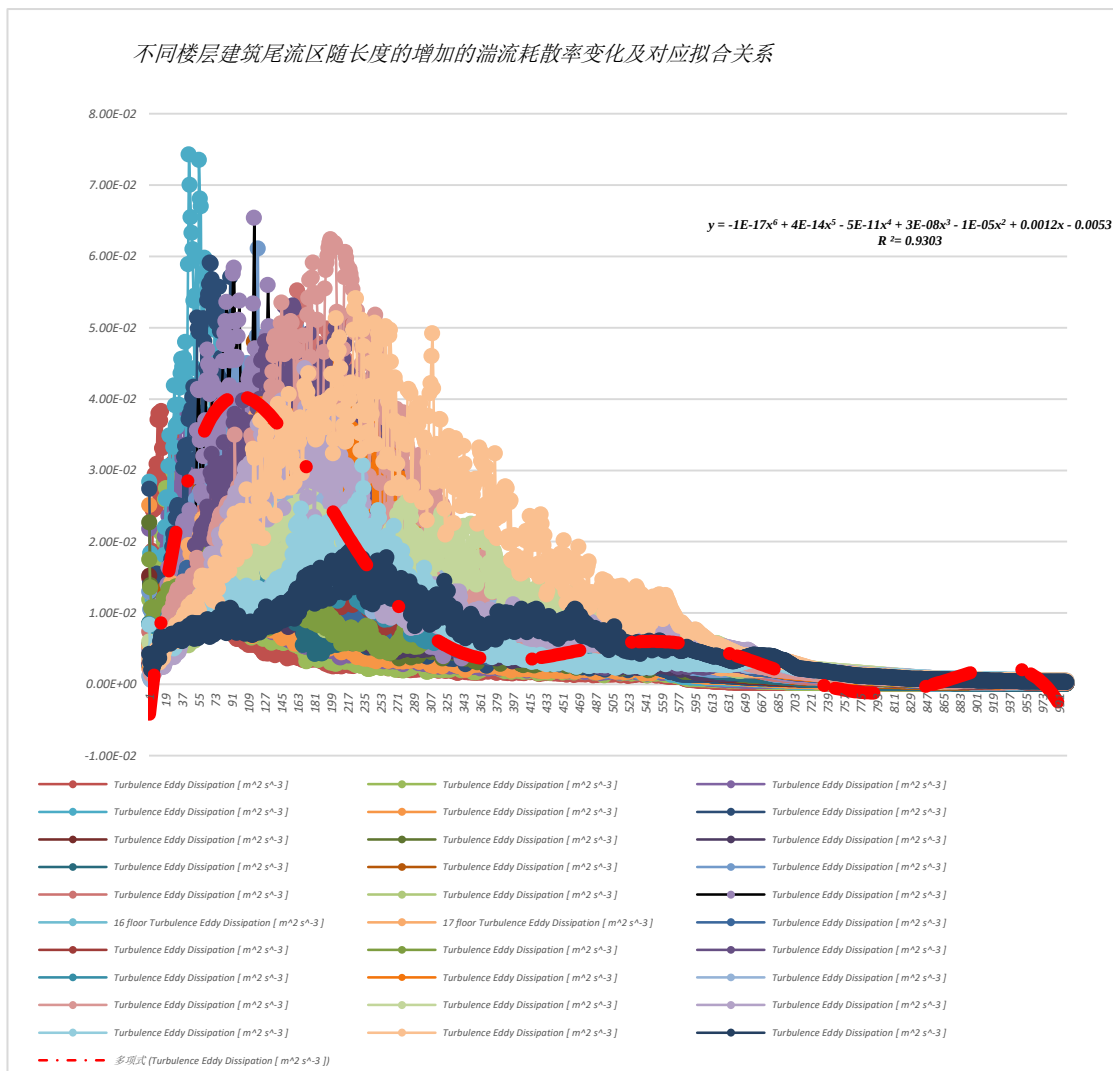


图 3 不同的楼层建筑尾流区随长度的增加的湍流耗散率变化及对应拟合关系

2 结果

通过以上对建筑高度方向及建筑尾流区域的分析，本研究量化描述了建筑顶部，尾部涡流对周边建筑的影响。如上所述，单体建筑对于周边建筑的影响我们也重点关注其污染物分布所带来的影响。选取 1 层到 30 层建筑的迎风面作为污染物释放面，释放强度为 0.00167 kg/s （模拟 100 名感染人员同时呼吸，平

均粒径为 $10\ \mu\text{m}$ ，分布范围为直径 $[1\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}]$ 的正态分布]的空气漂浮颗粒作为释放源，COVID-19 附着在悬浮颗粒上)，探寻以上关键位置污染物的分布特点。

2.1 单体建筑设计通风间距分析

由图 4 可以看出，随着楼栋高度的增高，在建筑顶部以上高度方向上污染物浓度增大，且污染物对上传播的距离也增大。同一栋建筑，随楼顶高度的增加，污染物浓度经历了先增大后减小的过程，最终回归至 0。在百米建筑的高度方向上，污染物浓度最大值达到 $3.5\times 10^{-9}\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。且在临近楼顶屋面位置，病毒颗粒与楼面进行直接接触而形成某一起始数值。因此在楼栋产生污染之际，楼顶活动通常情况下需要严格注意。污染物浓度稳定在 $Z=30\ \text{m}$ 高度处，且在 $Z=15\ \text{m}$ 处达到最大，最终被上升的建筑羽流与水平的自然梯度风双重作用下耗散。在 $Z=15\ \text{m}$ 至 $Z=30\ \text{m}$ 之间污染物的升高及下降趋势呈现出对称分布。不同的楼层建筑在其建筑顶部污染物浓度变化曲线，为楼面设计以及下游建筑的高度设计提供依据。

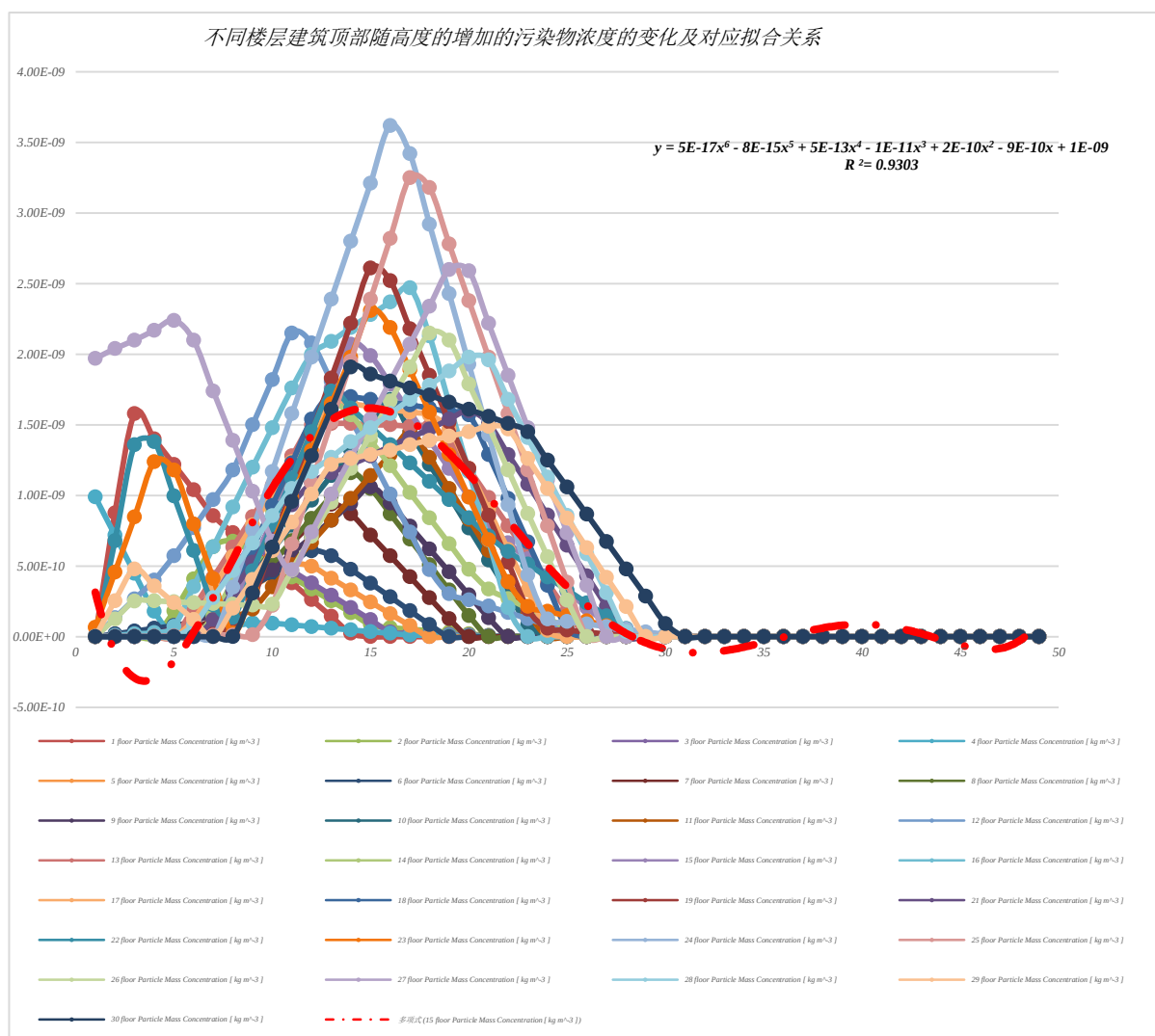


图 4 不同的楼层建筑顶部随高度的增加污染物浓度的变化及对应拟合关系

从图 5 可以看出，随着建筑高度的增加，建筑尾流区污染物浓度呈现出规律较为模糊，波动较大。同一栋建筑上，建筑尾流区域基本也经历了先增大再减小的变化趋势，在建筑尾流区出现最大污染浓度为 $1.4\times 10^{-8}\ \text{kg}/\text{m}^3$ ，明显大于在建筑水平方向上出现的污染物浓度。总体而言，楼层越高尾流区域的污染物浓度越大。污染物浓度归零位置约在 $Y=700\ \text{m}$ 处，影响范围巨大。然而在 $Y=550\ \text{m}$ 范围内，受多阶涡流的影响，污染物浓度达到最大值的位置和变化规律较难预测。利用六阶多项式进行回归，得到回归系数 R^2 仅

为 0.399，在实际建筑设计分析中，准确把握尾流区污染物浓度难度大，在设计过程中宜单独讨论。

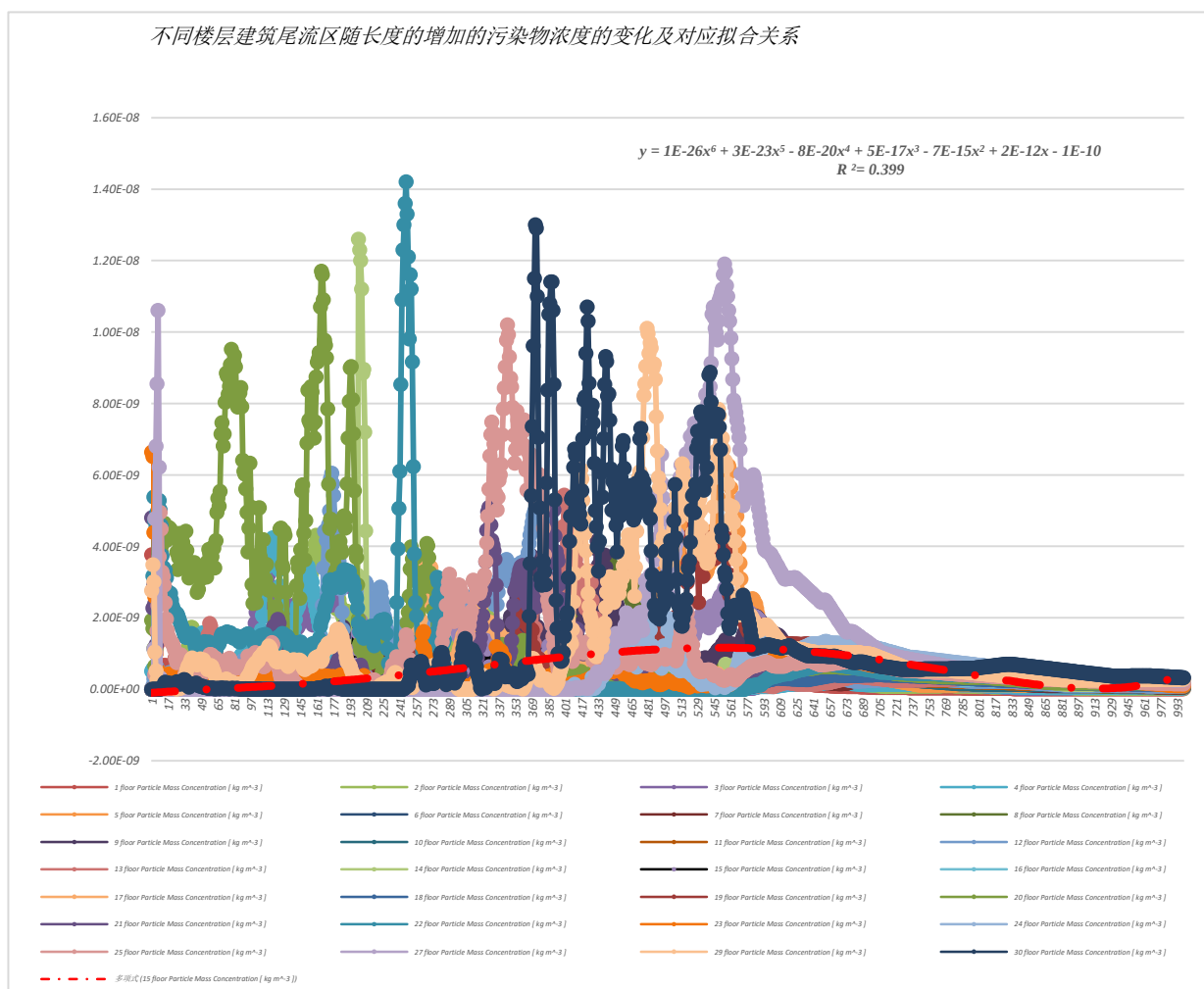


图5 不同的楼层建筑尾流区随长度的增加的污染物浓度的变化及对应拟合关系

3 讨论

通过以上讨论，我们通过单体建筑，纵向排布建筑，横向不同高度建筑的定量分析，找到建筑周边关键位置产生的涡流对周边建筑的扰动。然而实际建筑设计过程中需要按照以上理论分析进行设计落地是否具有可行性，以及这种设计在实际应用过程中是否能反应其计算效果，需要进一步研讨分析。在该部分研究内容中，我们选取实际工程作为示范项目，应用以上建筑分析技术，在园区的设计过程中加以运用。

3.1 项目简介

本研究的开展将依托以某“科技创新基地”为工程项目示范与实验测量载体。2021年，四川省与重庆市联合签订“科技创新基地协议”，将在新区建设“某科技创新基地”。该项目总用地面积约567亩，总建筑面积约47.4万m²，项目分为产业孵化区、科技创新孵化区、配套服务区三个功能区。图6展示了科技创新基地首期复杂的城市功能分区及项目概况，为本研究的顺利开展提供了工程项目示范与实验测量载体。

本研究联动当地建设主管部门、当地气象站开展项目相关城市冠层、峡谷效应、建筑设计的规划设计工作。通过仪器现场实测，采集现场气象条件，并制作风速边界条件，以支持模拟分析研究。现场气象条件测量及使用设备清单如图7及表1所示。



图 6 本研究的项目示范和实验载体某“创新基地”



图 7 创新基地现场气象条件测试

表 1 创新基地现场测试实验仪器

仪器名称	WWFWZY-1 记录仪		JTR04 黑湿球温度计	PpbRAE 3000 VOC 检测仪 PGM-7340		DUSTTRAK II 检测仪 8532
测量精度	温度	0.01 ℃	0.1 ℃	±3%的校准点（10~2000 ppm 异丁烯）		±0.1% or ±0.001 mg/m ³
	风速	0.01 m/s				
测量量程	温度	0.01 m/s	-20~125 ℃	10.6 eV	1 ppb~10 000 ppm 1ppb	0.001-150 mg/m ³
	风速	0.05-30m/s		9.8 eV	1 ppb~10 000 ppm 1ppb	
				11.7 eV	0.1 ppm~2 000 ppm 10ppb	
校核精度	温度	±0.5 ℃	±0.5 ℃	温度范围	-20 ℃-50 ℃	±0.002 mg/m ³ 24 小时误差
	风速	5%±0.05 m/s (0.05~30 m/s)		湿度范围	0% to 95% 相对湿度（无凝结）	
测试间隔	2 sec~24 hour		1~255 min		1~3 600 sec	1 sec~1 hour

通过现场测试气象数据，得到风速梯度函数如下：

通过以上测量制作自然梯度风 UDF 如下：

```
#include "udf.h"
```

```
#define z0 10
```

```
#define u0 2.0
```

```
#define a 0.22
```

```
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity,thread,index)
```

```
{
```

```
real x[ND_ND];
```

```
real z;
```

```
face_t f;
```

```
begin_f_loop(f,thread)
```

```
{
```

```
F_CENTROID(x,f,thread);
```

```
z=x[2];
```

```
F_PROFILE(f,thread,index)=u0*pow(z/z0,a);
```

```
}
```

```

end_f_loop(f,thread)
}

```

3.2 模型简介

本研究利用已检验的 LES 模型⁰在自然风速场中模拟城市人口密集区微生物气溶胶扩散过程。选取 LES 模型原因如下：大尺寸上 LES 模型更具有通用性；大涡流在主要流动中起主导作用，小涡流不起主导作用；动量、质量及能量主要由大尺寸涡流传输。在近地面及近壁面附近分别采用 Realizable k- ϵ 模型（植物屏障处理）和 RNG k- ϵ 模型（建筑立面及构筑物处理）来模拟，这是因为本研究中污染物与壁面碰撞时，会发生以下情况：①捕获边界（trap）：颗粒或液滴中的挥发性物质在壁面处被捕获，在此处被释放到气相中，其全部质量瞬间转化为蒸汽相并进入与壁面相接的计算网格中；而非挥发性颗粒在此处终止计算；②反射边界（reflection）：颗粒发生弹性或非弹性碰撞反射，动量发生改变，变化量由反弹系数确定。

3.2.1 计算域

根据风场模拟要求，建筑覆盖面积小于整个计算域的 7%，目标建筑群设置在机场中心。参数 H1 设置为产业园区横向最大长度，H2 设置为产业园区纵向最大长度。根据工业园区建筑设计尺寸，XYZ 方向立体尺寸分别为 7500 m、13627 m、600 m。

3.2.2 边界条件

利用现场实测风速，边界条件分别采用南向速度入口和北向压力出口的组合。定义气域东、西、顶面为自由滑移面，剪切力为 0。形成了平均粒径为 10 μm 、分布范围为直径[1 μm ~ 100 μm]的空气漂浮颗粒作为释放源，COVID-19 附着在悬浮颗粒上。

3.2.3 网格简介

空气域网格总数为 3 369 万个，含构造面 715 个单元，构造线 3 127 个，四面体单元 3128 万个。为了在关键区域获得更高的精度，将靠近地面和建筑群的单元分别致密化为 2 133 263 和 17 955 个四面体。网格质量最好为 0.99，最差为 0.10（占总网格数的 4.12%），平均质量值为 0.74，网格质量最集中的区域为 [0.90,0.95]（占总网格数的 23.36%）。

3.2.4 计算设置

在瞬态计算条件下，对基于压力的模型进行了仿真。在模拟过程中，重力场和温度场是耦合的，多分量模型和离散相模型是相互作用的。为了保证粒子迁移的模拟精度，湍流结合拉格朗日扩散模式选择标准 k- ϵ 模型。为了保证效果收敛，连续性方程和能量方程的残差监测器分别定义为 1×10^{-3} 和 1×10^{-6} 。

依据中国绿色建筑评价标准（GB/T 50378-2019）对建筑设计方案进行了两个维度分析：（1）室外行人活动区，距地面 1.5 m 高平面；（2）建筑开窗通风区，距建筑立面 0.5 m 偏移。根据现有的设计方案，在易发生污染的区域，根据建筑方案创建了与排风口、行人出入口、出口相对应的污染源面共 35 个，如图 8 所示。

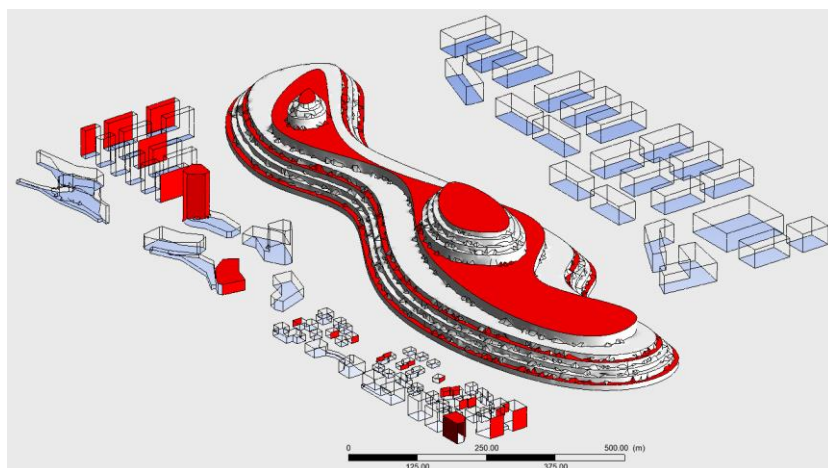


图 8 建筑设计方案中典型污染物扩散源的提取（红色平面所示）

3.3 模拟结果验证

对比模拟实验，以实际气象条件和实验期间施工现场工作粉尘颗粒浓度作为输入边界条件。在三维模型空间选取10个监测点，与对应监测点的现场实测数据进行对比。仿真结果与现场测试结果对比如图9、图10所示。在典型环境参数（风速、压力等）和颗粒浓度方面，模拟计算结果与现场试验结果吻合较好。模拟结果在变化趋势和数值量级上与现场试验结果一致，表明模拟结果反映了现场通风场景。

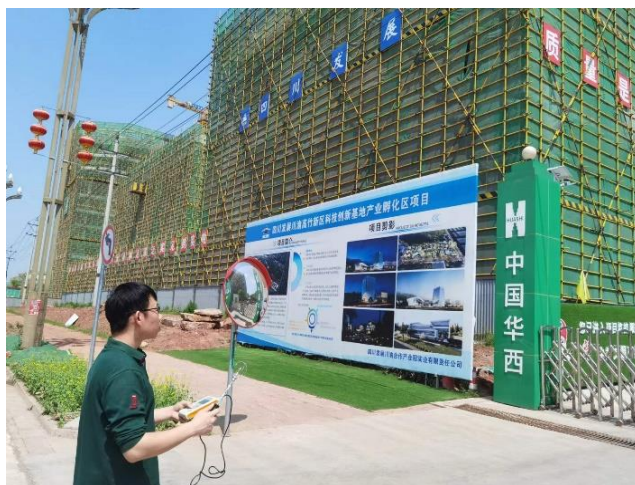


图9 以粉尘颗粒浓度为检测对象的施工现场监测点实测

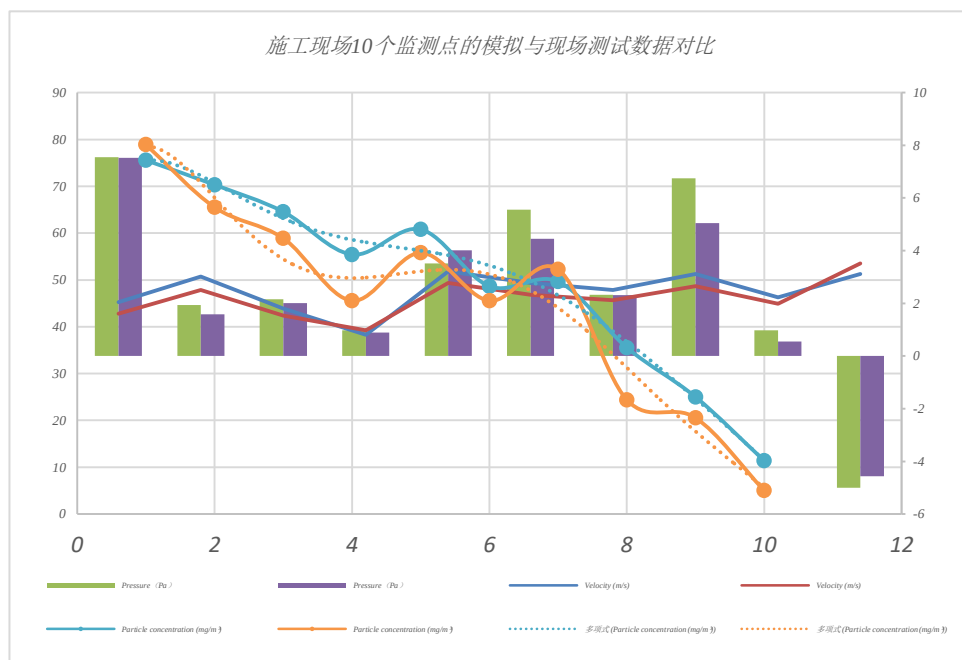


图10 施工现场 10 个监测点的模拟与现场测试数据对比

3.4 理论成果应用

在以上模拟及测试工作的基础上，我们选取园区后排建筑作为典型建筑（后排建筑受到建筑间的耦合影响等最多，代表性最强），分析其在建筑高度方向及水平方向上压力、竖向速度分量以及湍流耗散率之间的关系，如下图11、图12所示。可以看出，在水平方向上以上三项特征变量的分布特点与本研究中理论分析部分结果一致，表现出一致性的波动趋势或变化趋势。理论研究所得的基础拟合关系在复杂建筑群中仍然适用，有其应用价值。

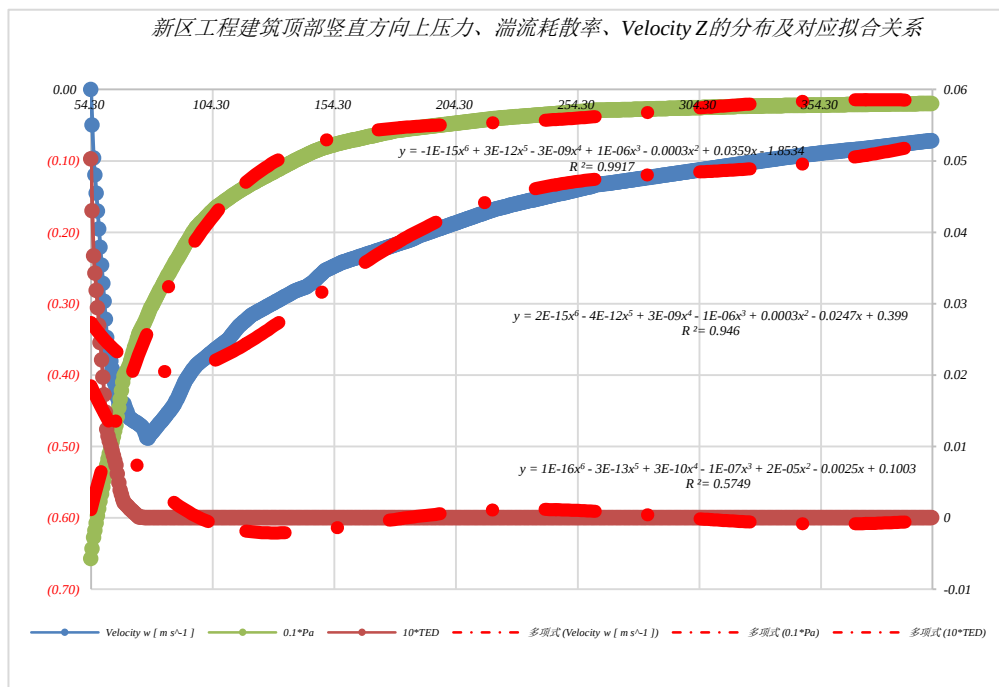


图 11 新区工程建筑顶部竖直方向上压力、湍流耗散率、Velocity Z 的分布及对应拟合关系

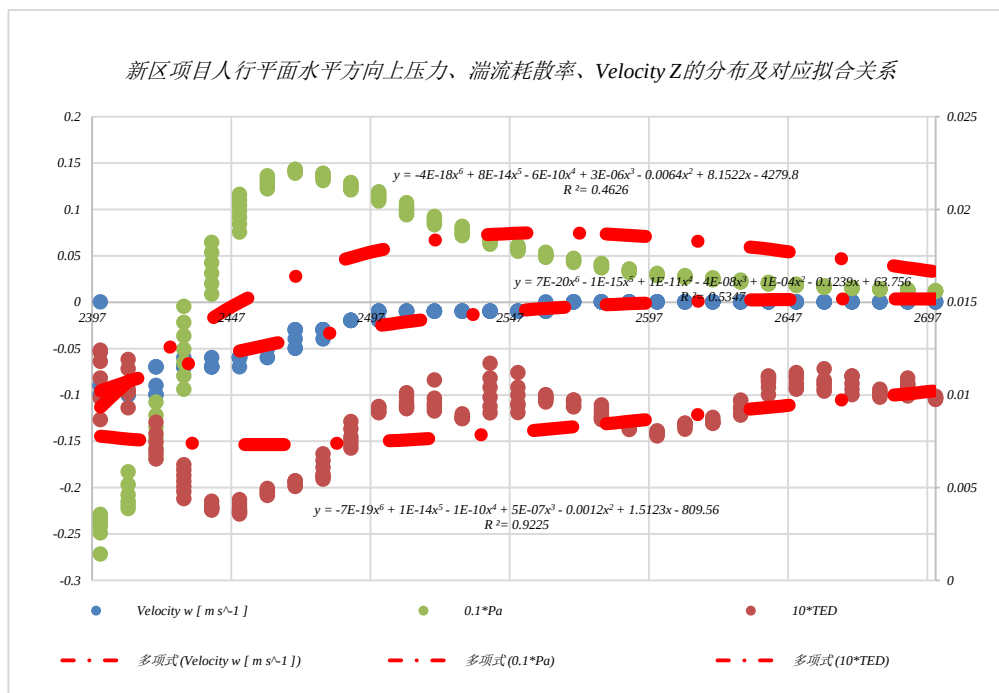


图 12 项目人行平面水平方向上压力、湍流耗散率、Velocity Z 的分布及对应拟合关系

4 结论与展望

本研究采取数值模拟为主，实验测量与理论分析为辅的研究方法，定性及定量的描绘建筑健康通风设计的要求。以实际在建项目为示范基地，验证模拟所得理论的可靠性，同时对于已形成建筑方案，进行健康通风综合评价。在所测得气象条件下，得到如下主要结论。

(1) 建筑顶部高度方向上：涡流主要集中于 $H=45\text{ m}$ 以内，在此高度以上负压迅速消失。竖向速度在 $H=35\text{ m}$ 以下迅速增大，当高度超过 35 m 时，竖向速度逐渐减小至 0 。在 $0\sim 5\text{ m}$ 范围内湍流耗散率迅速减

小, 在 $Z=50\text{ m}$ 处逐渐归零。污染物浓度稳定在 $Z=30\text{ m}$ 高度处耗散, 且在 $Z=15\text{ m}$ 处达到最大。

(2) 建筑尾流水平方向上: 建筑尾流区最大负压值出现在约 $Y=90\text{ m}$ 处, 在 $Z=360\text{ m}$ 处才逐渐归零。尾流区域竖向速度在 $Y=450\text{ m}$ 处衰减到基本接近于 0。湍流耗散率在 $Y=100\text{ m}$ 范围内迅速增大, 在 $Y=400\text{ m}$ 处才逐渐过渡到接近 0 的平稳状态。污染物浓度归零位置约在 $Y=700\text{ m}$ 处, 影响范围巨大, 且受多阶涡流的影响, 污染物浓度最大值位置较难预测。

以上本研究所得出的系列定性及定量分析, 为实际工程案例的应用提供了切实可行的设计指导原则。在未来的进一步研究中, 我们将在建筑安全通风设计原则基础上, 进一步探讨建筑安全通风机理, 以实现:

(1) 污染物的最优疏散路径计算方法 (包括最小紊流度衰减、致病区域识别、城市冠层最佳疏散效率等指标)。

(2) 病毒或化学衰减污染物全生命周期内动态传播机理 (包括动态扩散形态、高致病性风险区域预测、室内通风逻辑及人员行为模型)。

(3) 街道峡谷尺度及城市尺度下的建筑健康通风规划设计原则。

5 致谢

感谢“重庆市博士后科研项目特别资助 (编号2211013357670761)”, “重庆市科技局自然科学基金项目 (编号CSTB2024NSCQ-MSX0825)”, “重庆市博士后出站留 (来) 渝资助 (编号2025-18)”, “重庆科技大学青年科学基金项目 (编号ckrc20241216)”, “重庆市沙坪坝区2025年度技术创新项目 (编号2025058)”, “2025年度市教委科学技术研究计划项目 (编号2025-592)” 的支持。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13. 001(11-0065). Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Vision for 2035[N]. People's Daily, 2021-03-13. 001(11-0065). (in Chinese)
- [2] Lin B Q, and Zhu J P, Changes in urban air quality during urbanization in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 312-321.
- [3] Xu G, Jiao L M, Yuan M, et al. How does urban population density decline over time? An exponential model for Chinese cities with international comparisons[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 183: 59-67.
- [4] Yang L, Yu X, Wu X L, et al. Emergency response to the explosive growth of health care wastes during COVID-19 pandemic in Wuhan, China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105074.
- [5] Cruz M P, Santos E, Velázquez Cervantes M A, et al., COVID-19, a worldwide public health emergency[J]. Revista Clínica Española (English Edition), 2021, 221(1): 55-61.
- [6] 刘伟. 自然风速场下微生物气溶胶的室内外扩散与风险研究[D]. 天津大学, 2011. Liu W. Indoor and outdoor dispersion and risk of microbial aerosols under natural wind speed field[D]. Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [7] 郑云昊, 李菁, 陈灏轩等. 生物气溶胶的昨天、今天和明天[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 878-894. Zheng Y H, Li J, Chen H X, et al. Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(10): 878-894. (in Chinese)
- [8] Qian Y, and Fan W. Who loses income during the COVID-19 outbreak? Evidence from China[J]. Research in Social Stratification and Mobility, 2020, 68, 100522.
- [9] 段进, 杨保军, 周岚等. 规划提高城市免疫力——应对新型冠状病毒肺炎突发事件笔谈会[J]. 城市规划, 2020, 44(02): 115-136. Duan J, Yang B J, Zhou L, et al. Planning improves city's immunity: a written

- conversation on COVID-19 breakout[J]. *City Planning Review*, 2020, 44(02): 115-136. (in Chinese)
- [10] 范如国, 王奕博, 罗明等. 基于 SEIR 的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(03): 369-374. Fang R G, Wang Y B, Luo M, et al. SEIR-Based COVID-19 transmission model and inflection point prediction analysis[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020, 49(03): 369-374. (in Chinese)
- [11] Pullen J, P. Boris J, Young T, et al. A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(6): 1049-1068.
- [12] Yuan C, Norford L, Britter R, et al, A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities[J]. *Building and Environment*, 2016, 97: 152-165.
- [13] Bauer T J, The Effect of the Urban Parametrization on Simulated Contaminant Atmospheric Transport and Dispersion[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2019, 170(1): 95-125.
- [14] Gromke C, Jamarkattel N, and Ruck B, Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 139: 75-86.
- [15] Ramponi R, Blocken B, B. de Coo L, et al, CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths[J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 152-166.
- [16] Li X X, Britter R, and Norford LK, Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation[J]. *Atmospheric environment*, 2016, 144: 47-59.
- [17] Yuan C, Shan R Q, Zhang Y Y, et al, Multilayer urban canopy modelling and mapping for traffic pollutant dispersion at high density urban areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 255-267.
- [18] Hang J, Ma L, Wang D, et al, On the influence of viaduct and ground heating on pollutant dispersion in 2D street canyons and toward single-sided ventilated buildings[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(5): 817-832.
- [19] Peng Y L, Buccolieri R, Gao Z, et al, Indices employed for the assessment of "urban outdoor ventilation" - A review[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 223, 117211.
- [20] Liu Y S, Miao S G, Cui G X, et al, Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107: 106-117.
- [21] Dai Y W, Mak C M, Zhang Y, et al, Investigation of interunit dispersion in 2D street canyons: A scaled outdoor experiment[J]. *Building and Environment*, 2020, 171, 106673
- [22] Hang J, Wang Q, Chen X Y, et al, City breathability in medium density urban-like geometries evaluated through the pollutant transport rate and the net escape velocity[J]. *Building and Environment*, 2015, 94: 166-182.
- [23] 杨俊宴, 史北祥, 史宜等. 高密度城市的多尺度空间防疫体系建构思考[J]. *城市规划*, 2020, 44(03): 17-24. Yang J Y, Si B X, Si Y, et al, Construction of a multi-scale spatial epidemic prevention system in high-density cities[J]. *City Planning Review*, 2020, 44(03): 17-24. (in chinese)
- [24] Mac V V, Elon L, Smith D J, et al, A modified physiological strain index for workplace-based assessment of heat strain experienced by agricultural workers[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 2021, 64(4): 258-265.
- [25] Nakayama H, Takemi T, and Yoshida T, Large-Eddy Simulation of Plume Dispersion in the Central District of Oklahoma City by Coupling with a Mesoscale Meteorological Simulation Model and Observation[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(7): 889.