

# 湘南地区高层住宅夏季室内风场影响因子数值分析

尹东衡<sup>1</sup>, 张九鹏<sup>2</sup>, 黄春华<sup>3</sup>, 刘晓红<sup>1</sup>

(1. 南华大学 建筑学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 融创中国青岛有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 湖南省健康城市工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 平均风速值体现了室内风场的整体通风水平。为明确高层住宅室内平均风速与影响因子(风向角度、楼层高度、进风向窗墙面积比、进出风口面积比、进深开间比和距地高度)的关联性,选取湘南地区高层住宅为研究对象,运用计算流体力学(CFD)的方法,采用 RNG K- $\epsilon$  湍流模型,对夏季室内风场进行模拟,通过多组模型的对比,定量分析了住宅室内平均风速与相关影响因子的关联度。结果表明:(1)室内平均风速与窗墙比和离地高度呈正相关关系;(2)在住宅进出风口面积比和进深开间比为 1.00 的情况下,室内平均风速达到最大值;(3)室内平均风速与各影响因子的密切程度由大到小依次为:进出风口面积比>进风向窗墙面积比>距地高度>进深开间比>风向角度>楼层高度。多元逐步线性回归表明,进出风口面积比和距地高度是引发湘南地区高层住宅室内平均风速差异的主导因子。该研究可为湘南地区高层住宅室内风环境的评估与优化提供科学依据。

**关键词:** 计算流体力学; 平均风速; 湘南地区; 高层住宅; 多元线性回归

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0729-08

## The numerical analysis of factors affecting indoor wind field of high-rise residential buildings in southern Hunan in summer

YIN Dongheng<sup>1</sup>, ZHANG Jiupeng<sup>2</sup>, HUANG Chunhua<sup>3</sup>, LIU Xiaohong<sup>1</sup>

(1. School of Architecture, Nanhua University, Hunan Hengyang 421001, China;

2. Sunac China Qingdao Co., Ltd., Shandong Qingdao 266000, China;

3. Hunan Healthy City Engineering Technology Research Center, Hunan Hengyang 421001, China)

**Abstract:** The average wind speed value reflects the overall ventilation level of the indoor wind field. In order to clarify the correlation between the indoor average wind speed of high-rise residential buildings and the impact factors (wind direction angle, floor height, air-to-window wall area ratio, air inlet-outlet area ratio, entrance-to-depth opening ratio, and height above ground), high-rise residences in southern Hunan were selected as the research object. The RNG K- $\epsilon$  turbulence model is used to simulate the indoor wind field in summer by the method of computational fluid dynamics (CFD). Through the comparison of multiple sets of models, the correlation between the average indoor wind speed of residential buildings and the related influencing factors is quantitatively analyzed. The results show that (1) the indoor average wind speed is positively correlated with the window-to-wall ratio and the height above the ground; (2) the indoor average wind speed reaches the maximum value when the area ratio of the air inlet and outlet of the residence and the ratio of the depth to the opening are 1.00; (3) The degree of closeness between the indoor average wind speed and the various influencing factors is as follows: air inlet/outlet area ratio>air inlet window/wall area ratio>height from ground>opening depth ratio>wind direction angle>floor height. Multiple stepwise linear regression shows that the area ratio of the air inlet and outlet and the height above the ground are the leading factors causing the difference of indoor average wind speed in high-rise residential buildings in southern Hunan. This research can provide a scientific basis for the evaluation and optimization of indoor wind environment of high-rise residential buildings in southern Hunan.

**Key words:** CFD; average wind speed; Souththern Hunan; high-rise residential ; multiple linear regression

收稿日期: 2020-05-11 修改稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876087); 国家自然科学基金联合基金项目(U1867221); 湖南省教育厅科研基金项目(2015C11872); 衡阳市科技局科研基金项目(2016KS33)

第一作者: 尹东衡(1975—), 男, 硕士, 研究方向为绿色建筑设计。E-mail: 1533352132@qq.com

通信作者: 黄春华(1968—), 女, 教授, 博士, 研究方向为绿色建筑设计。E-mail: 1977691619@qq.com

湘南地区位于亚热带季风性湿润区域,夏季住宅室内温度与湿度较高,采取适宜的气候设计措施极为必要.自然通风具有提高建筑舒适性、降低建筑运行能耗等优点,成为兼顾经济与节能、健康与舒适的最佳选择<sup>[1]</sup>.

室内风环境是城市住宅热环境的重要组成部分<sup>[2]</sup>.高层住宅占城市住宅建筑总量的 78% 以上<sup>[3]</sup>,研究表明:高层住宅的室内风场效果受到诸多因素的制约和影响<sup>[4]</sup>.因此,对室内风场与相关因素间的关联性进行研究,揭示高层住宅的室内自然风场调控机理,不仅有助于提升室内热舒适质量,而且能在最大程度上为城市住宅热环境的改善奠定基础.

当前研究建筑风环境的方法主要包括实测研究、风洞实验和计算机模拟研究 3 种<sup>[5]</sup>.由于实测研究对室外天气的要求较高且周期较长,难以对影响建筑风环境的各个因素进行一一实验来得到其规律;而风洞实验则花费昂贵,难以广泛应用于实际研究中;目前比较流行的研究方法是计算机流体力学数值模拟(CFD)的方法<sup>[6]</sup>.当前国内外诸多学者在住宅 CFD 领域开展了研究,如 Per Hejselberg、A.Jajn Bastjde、M. A . Hassan 等人研究了在窗户的不同开启方向、不同开口形状以及不同的窗户大小、位置等情况下的室内通风情况<sup>[7-9]</sup>; Leila Moosavi 等对建筑物中庭在不同气候条件下的自然通风效果进行了研究,分析了建筑中庭自然通风保持高效的影响因素参数<sup>[10]</sup>;石峰等以福建历史民居为例,选取天井面宽进深比和檐口高度两个影响因子为控制变量,运用 CFD 模拟的方法归纳出天井几何形态特征与建筑风环境之间的关系<sup>[11]</sup>.胡晓军等以一梯多户高层住宅内天井不同的平面开口尺寸、平面开口方式及自身平面尺寸为研究对象,采用数值模拟方法,得出内天井自身进深尺寸存在的室内风环境最优值<sup>[12]</sup>.

综上研究,发现以下问题:(1)主要集中在室内通风效果评估与空间特征分析等方面,缺少对风场影响机理与综合效应的研究;(2)大多停留 CFD 风场模拟阶段,对数值进行后期回归分析的并不多见;(3)缺少对具体气候条件下的高层住宅室内风场的研究.针对上述问题,本研究以湘南地区高层住宅为研究对象,运用 CFD 模拟的方法研究夏季室内风场与主要影响因子间的关联性,在数值分析的基础上,建立室内风场与影响因子之间的回归模型,探索影响因子对室内风场的作用机理,以期为湘南地区高层住宅室内风环境的

评估提供借鉴.

## 1 建筑风环境模拟

### 1.1 样本概况

选取湘南地区某住宅小区高层住宅楼户型作为研究对象(图 1).通过实地测量与记录,得到样本住宅的建筑特征信息(表 1).

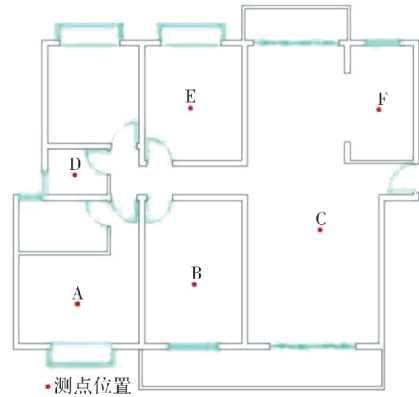


图 1 建筑样本平面图

Fig. 1 Floor plan of the sample building

表 1 样本住宅建筑的基本特征数据值进行对比验证

Tab. 1 Basic characteristics of sample residential buildings

项目	参数
距地高度/m	28.2
住宅层高/m	3.0
进深面宽比	0.95
南向窗墙面积比	0.38
前后风口面积比	1.40
南向与风向夹角/(°)	0

### 1.2 模拟步骤

根据高层住宅样本的信息建立建筑模型,运用软件 Phoenics 进行室外风环境模拟,得到建筑外立面表面的风压值<sup>[13]</sup>.依据风压值进行住宅室内风环境模拟,将模拟得到的风速数据值与实测的风速.

### 1.3 模拟设置

计算域的尺寸设置会对计算精度产生直接的影响<sup>[14]</sup>.本模拟采用日本建筑协会 AIJ 的研究建议,即建筑模型与模拟区域边缘的距离在水平方向至少 5 倍于建筑模型高度,高度方向 3 倍于建筑模型高度.最终确定本研究计算域的长度为 500 m,是建筑高度的 10 倍;宽度为 500 m,是建筑高度的 10 倍;高度为 150 m,是建筑高度的 3 倍(表 2).网格划分设置为 137 m×91 m×53 m,对建筑所在区域进行网格局部加密处理,以获得较准确的模拟数值.

由于地表摩擦作用的影响，风速存在着梯度变化，即接近地表的风速随着离地高度的减小而降低，风速与高度的关系通常采用指数律，即

$$\frac{V_h}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o}\right)^n \quad (1)$$

式中： $V_h$  为高度为  $h$  处的风速； $V_o$  为基准高度  $h_o$  处的风速； $n$  为与地面粗糙度有关的指数。根据《中国建筑热环境分析专用气象数据集》可知，湘南衡阳地区夏季盛行偏南风，风向频率为 85%，平均风速  $V_o=2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，代表 10 m 高度处  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏南风。根据模型计算要求，应依据建筑周围的实际环境，采用相应的地面粗糙指数。考虑场地周边是密集的高层住宅建筑小区，即计算认定的建筑周围存在高大障碍物的工况，因此地面粗糙指数  $n$  设定为 0.5。

二方程标准 K- $\epsilon$  模型计算成本低，在数值计算中波动小、精度高，在低速湍流模拟中应用较为广泛<sup>[15]</sup>。在考虑计算成本与精度的前提下，本研究在室外风场模拟中采用标准 K- $\epsilon$  模型描述湍流。

在软件 Phoenics 中，按照表 2 中的参数条件要求进行设置，经计算收敛后得到样本建筑外立面风口的风压值(图 2)。为样本住宅建立模型，依据计算得到的建筑室外表面风压值，采用改进型 RNG K- $\epsilon$  湍流模型对住宅室内风环境进行模拟，可以得到室内各坐标点的精确风速值(图 3)。

表 2 风压模拟设置参数

Tab. 2 Setting parameters of wind pressure simulation

项目	解析条件
计算域尺寸/m	500×500×150
建筑尺寸/m	58×13.2×40
网格划分	137(x)×91(y)×53(z)
风轮廓	$\frac{V_h}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o}\right)^n$
风向/(°)	偏南风 180
来流风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.3
湍流模型	标准 K- $\epsilon$ 模型

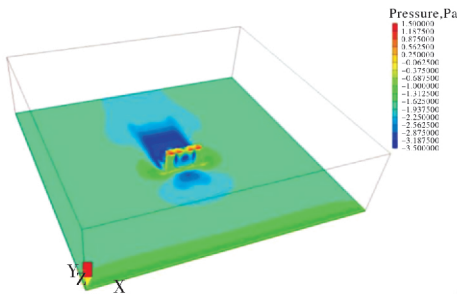


图 2 建筑外立面表面的风压值

Fig. 2 Wind pressure values on the facade of the building

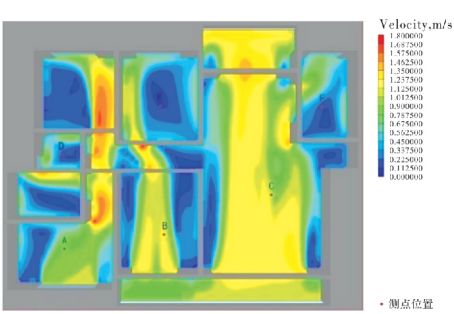


图 3 住宅风场模拟云图与室内测点

Fig. 3 Simulated cloud image of residential wind field and indoor measuring points

1.4 对比验证

本研究采用实测数据与模拟数值进行对比的方法，以检验模拟研究结果的准确程度。实地测试时间为 2019 年 7 月 15 日，测试时段为 09:00—15:00。经测试，室外风速平均值为  $2.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与模型所采用的来流风速值偏差为 1.7%，且风速为南向，与软件中的风向设定一致，完全符合室外风速的测试条件。测试期间窗户处于全开启状态，且无人在家逗留，以保证测试准确度。测点分布情况见图 1。主要测试室内各测点距室外地面 28.2 m(距室内地面 1.2 m 处，人体坐姿头部位置)处的平均风速，风速每 5 min 采集一次。

图 4 为各测点平均风速实测值与模拟值的对比图，可知对模型进行软件模拟得到的风速值与实测所得结果相近，其  $R^2=0.839$ ，显示模拟结果与实测结果具有高度相关性。

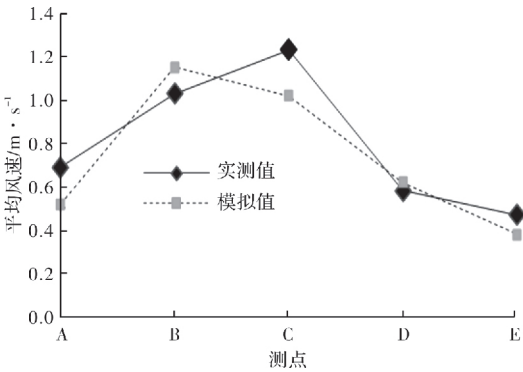


图 4 各测点平均风速模拟值与实测值的对比图

Fig. 4 Comparison between the simulated and measured average wind speed of each measuring point

2 室内风场影响因子研究

一个完整的自然通风体系包括进风口、风道与出风口<sup>[16]</sup>。在风压通风的工况下，高层住宅室内通风效果受到室外风速大小、进风角度、前后开口的尺寸大小与形状、风道长度、楼层高度、

室内障碍遮挡情况和布局形式等诸多因素的影响<sup>[17]</sup>。根据公式(1),在采取梯度风求解的情况下,室内通风状况与房间所处的离地高度密切相关。为了直观地揭示风场与空间影响因子间的关联性,本研究暂不考虑室内障碍遮挡与布局的情形。从空间形态特征可控视角出发,将上述影响因素转化为相应的量化风场因子:风向角度(WDA)、楼层高度(FH)、进风向窗墙面积比(WWAR)、进出风口面积比(FRAR)、进深开间比(DOR)和距地高度(HAG)。

平均风速(AIWS)是对室内通风进行评估的重要指标之一,平均值的高低直接体现了室内风场的整体通风效果<sup>[18]</sup>。改变室内的风场因子,通过运用CFD模拟风场,可以得到风场因子发生变化后的室内平均风速值,从而归纳出室内平均风速与影响因子的关系。

### 2.1 风向夹角(WDA)

在不改变样本住宅的距地高度、层高、进风向窗墙面积比、进出风口面积比和开间进深比的情况下,调整住宅南向窗户开口与风向的夹角。设定室外风速为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以  $30^\circ$  角为单位,分别模拟风向夹角为  $-60^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  时的住宅室内风速云图(图 11)。由图 5 可以看出,当风向由负向夹角转为正向夹角的过程中,模型的室内平均风速开始逐渐增大,在风向夹角为  $30^\circ$  时室内平均风速达到最大值;而随着正向夹角的继续增大,平均风速值开始回落;室内平均风速值整体呈现先变大后变小的趋势。

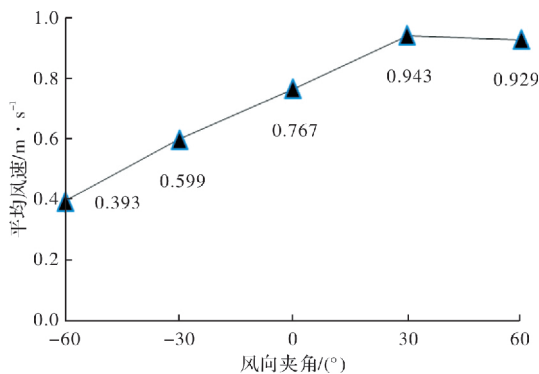


图 5 不同风向夹角时的室内平均风速值

Fig. 5 Average indoor wind speed at different angle

### 2.2 楼层高度(FH)

在不改变其他因子数值的情况下,仅改变住宅楼层的高度,设定室外风速为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别模拟

不同层高条件下(目前高层住宅设计普遍采用的楼层高度)的室内风速云图(图 12)。由图 6 可以

看出,在模型的层高在最小值  $2.8 \text{ m}$  时,室内平均风速达到最大值;随着层高的逐渐增大,平均风速呈下降趋势,在层高  $3.1 \text{ m}$  时,室内平均风速值最小;而随着层高的继续增大,室内平均风速值不降反升。

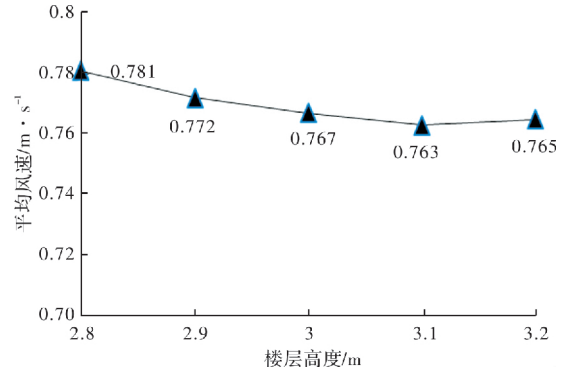


图 6 不同楼层高度时的室内平均风速值

Fig. 6 Average indoor wind speed at different floor height

### 2.3 进风向窗墙面积比(WWAR)

在不改变其他因子数值的情况下,仅调整住宅的进风向窗墙面积比,设定室外风速  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别模拟不同窗墙面积比下的室内风速云图(图 13)。由图 7 可以看出,在模型的窗墙比为  $0.30$  时,室内平均风速值最小;随着窗墙比的逐渐增大,室内平均风速也依次变大,两者之间呈正相关线性关系。

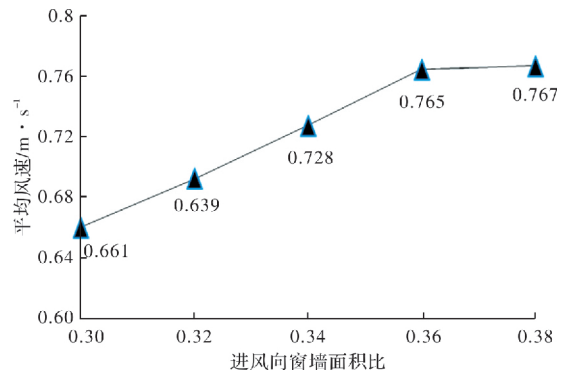


图 7 不同窗墙面积比时的室内平均风速值

Fig. 7 Average indoor wind speed at different window-wall area ratios

### 2.4 前后风口面积比(FRAR)

在不改变其他因子数值的情况下,仅改变住宅的前后风口面积比,设定室外风速为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别模拟不同层高下的室内风速云图(图 14)。由图 8 可以看出,在模型的进出风口面积比为  $1.00$  时,室内平均风速达到最大值;当进出风口面积比  $< 1.00$  时,随着面积比的变大,室内平均风速值同步变大;当进出风口面积比  $> 1.00$  时,随着面积比的变大,室内平均风速值逐渐变小。



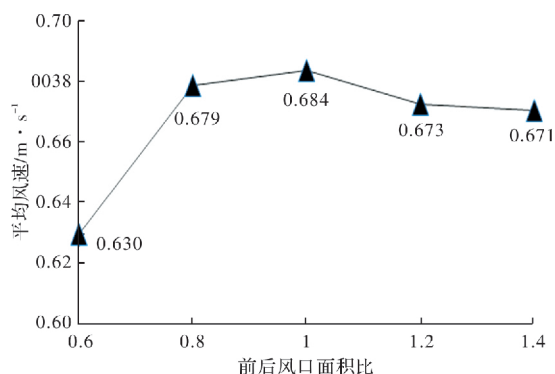


图8 不同进出风口面积比时的室内平均风速值

Fig. 8 Average indoor wind speed values at different air inlet and outlet area ratio

## 2.5 距地高度 (HAG)

在不改变其他因子数值的情况下,仅调整住宅与室外地面的距地高度,设定室外风速为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,通过 CFD 分别模拟距地高度为 16.2 m、22.2 m、28.2 m、34.2 m、40.2 m 时的住宅室内风速云图(图 15)。由图 9 可以看出,当离地高度逐渐变大时,室内平均风速值同步变大,两者之间呈正相关线性关系。

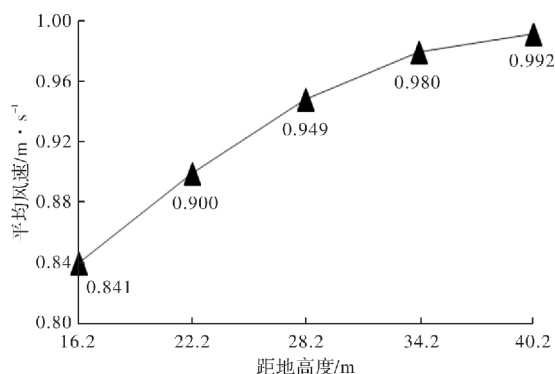


图9 不同距地高度时的室内平均风速值

Fig. 9 Indoor average wind speed at different heights from the ground

## 2.6 进深开间比 (DOR)

在不改变其他因子数值的情况下,仅调整住宅进深开间比。设定室外风速为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,模拟不同进深开间比下的室内风速云图(图 16)。由图 10 可以看出,在模型的进深开间比为 1.00 时,

室内平均风速达到最大值;当进深开间比  $< 1.00$  时,随着进深开间比值的变大,室内平均风速值先变大后变小;当进出风口面积比  $> 1.00$  时,随着进深开间比的增大,室内平均风速值反向变小。

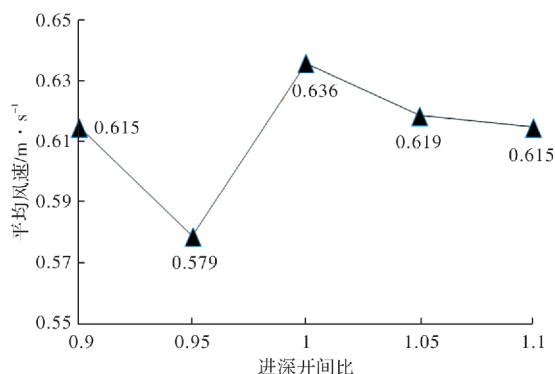


图10 不同进深开间比时的室内平均风速值

Fig. 10 Average indoor wind speed values at different depth ratio

## 3 室内风场影响因子与回归分析

### 3.1 室内风场影响因子的相关性分析

在实地测量的基础上,结合上述风场影响因子作用研究,对湘南地区(衡阳、郴州、永州)的7个城市小区不同户型的高层住宅样本进行 CFD 模拟,共计得到 210 组数据信息。随机抽取其中 120 组模型数据,在 SPSS 软件中采用皮尔逊相关系数确定室内平均风速与各风场影响因子的相关性。由表 3 可见,室内平均风速与各风场影响因子的密切程度由大到小依次为  $FRAR$ 、 $WWAR$ 、 $HAG$ 、 $DOR$ 、 $WDA$ 、 $FH$ 。其中,  $FRAR$ 、 $WWAR$  和  $HAG$  呈现极显著水平,相关值分别为  $-0.834$ 、 $-0.712$  和  $0.513$ ,这表明  $FRAR$  是风场最主要的影响因子。同时,从表 3 看出,各风场影响因子也并不是孤立存在,如  $FRAR$  与  $WWAR$  存在极显著负相关,相关系数达到  $-0.872$ ,  $HAG$  与  $WWAR$  也存在极显著负相关,相关系数为  $-0.597$ ,因子间存在较高的多重共线性,说明如果利用多个因子来解释室内平均风速的变化会存在一定不确定性。

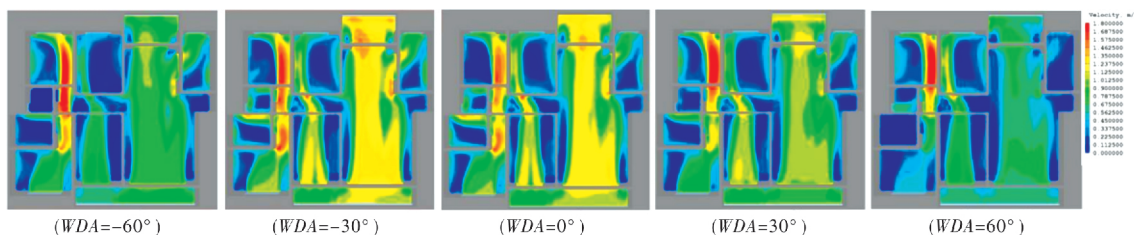


图11 不同风向夹角时的室内风速云图

Fig. 11 Indoor wind speed cloud images of different wind angles

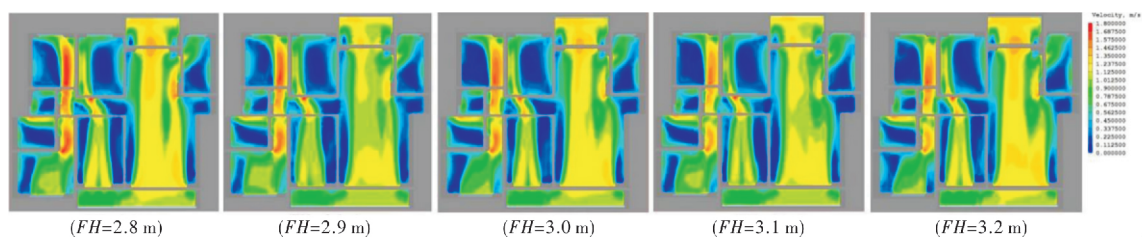


图 12 不同楼层高度时的室内风速云图

Fig. 12 Indoor wind speed cloud images of different floor heights

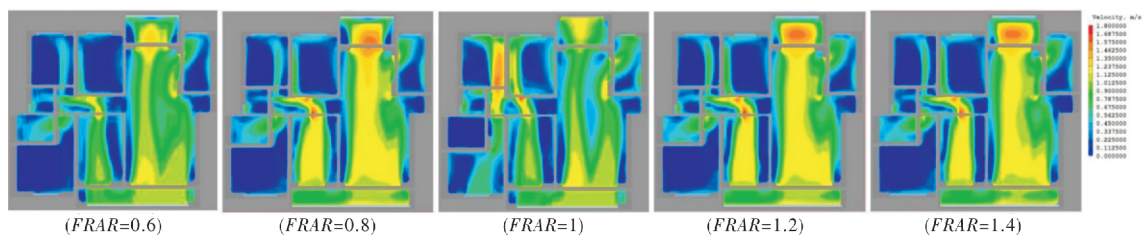


图 13 不同窗墙面积比时的室内风速云图

Fig. 13 Indoor wind speed cloud images of different window-to-wall area ratios

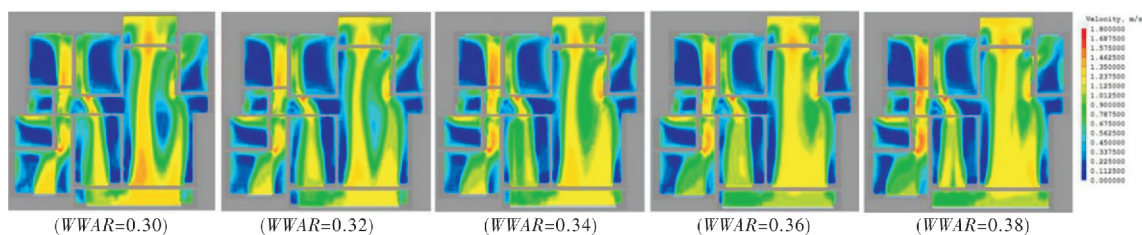


图 14 不同进风口面积比时的室内风速云图

Fig. 14 Indoor wind speed cloud images of different air inlet and outlet area ratios

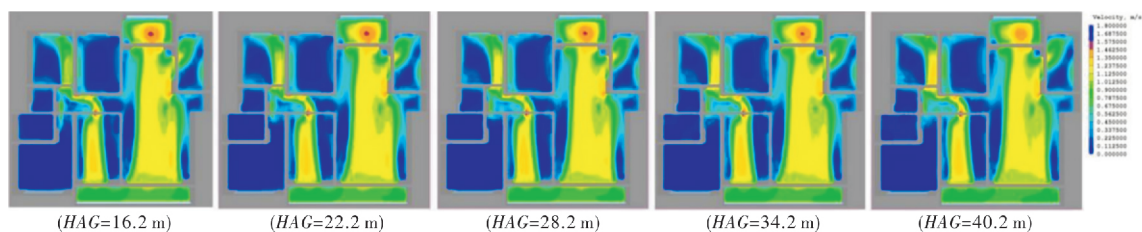


图 15 不同距地高度时的室内风速云图

Fig. 15 Indoor wind speed cloud images of different heights from the ground

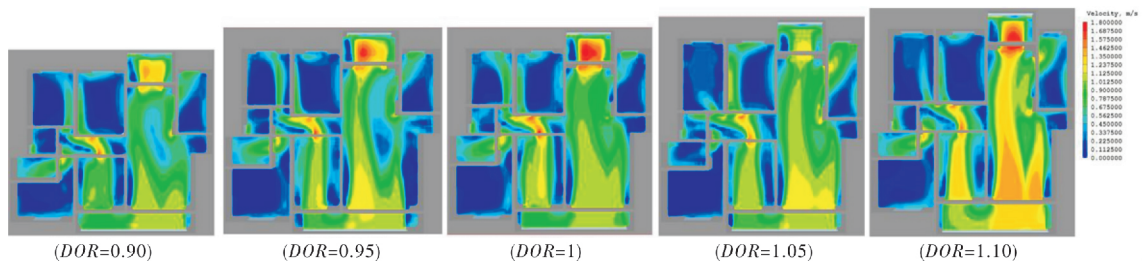


图 16 不同进深开间比时的室内风速云图

Fig. 16 Indoor wind speed cloud images of different depth to depth ratios

表 3 室内平均风速与各空间影响因子的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of indoor average wind speed and various spatial influence factor

	WWAR	FH	WDA	FRAR	DOR	HAG	AIWS
WWAR	1	.442**	.336*	-.872**	-.735**	-.597**	-.712**
FH	.442**	1	.040	-.086	-.605**	-.472**	.231*
WDA	.336*	.040	1	-.069	-.186	-.284	.256*
FRAR	-.872**	-.086	-.069	1	.192	.093	-.834**
DOR	-.735**	-.605**	-.186	.192	1	.648**	-.284*
HAG	-.597**	-.472**	-.284	.093	.648**	1	.513**
AWS	-.712**	.231*	.256*	-.834**	-.284*	.513**	1

\*\* . 相关性达到极显著水平  $p<0.01$ .

\* . 相关性达到显著水平  $p<0.05$ .

3.2 室内风场与影响因子间的多元线性回归

为进一步探讨 FRAR、WWAR、HAG、DOR、WDA、FH 等 6 个空间影响因子对室内风场的综合效应，先对上述影响因子和室内平均风速的原始数据进行标准化处理，以解决各因子间量纲和单位不同造成的影响，然后采用逐步回归法将各因子的标准化数据与室内平均风速进行多元线性回归，去除偏回归系数不显著的因子，最终建立最优拟合回归方程式：

$$AIWS=0.801-0.096FRAR+0.004HAG$$
 (2)

式(2)决定系数  $R^2=0.732$ ，并通过了  $p=0.01$  水平的显著性检验。由式(2)可看出，与室内平均风速相关的 6 个影响因子中，仅有 FRAR 和 HAG 保留下来，说明前后风口面积比和距地高度是引发湘南地区高层住宅室内平均风速差异的主导因子，前后风口面积比越大，室内平均风速就越低；离地高度越大，室内平均风速就越大。而从方程回归系数大小来看，前后风口面积比对室内平均风速的影响程度要大于距地高度。

通过随机选取 30 组样本数据，对上述回归模型拟合方程式进行有效性检验，最终有效率大于 75%。因而，回归方程式(2)能为湘南地区高层住宅夏季室内风场的评估提供可靠的依据。

4 结 论

(1)室内平均风速随着层高的逐渐增大呈下降趋势，而在最低值出现后，随着层高的继续增大，室内平均风速值不降反升；室内平均风速与窗墙比和离地高度呈正相关关系；

(2)在前后风口面积比=1.00 时，室内平均风速达到最大值；当进出风口面积比<1.00 时，随着面积比的变大，室内平均风速值同步变大；当进出风口面积比>1.00 时，随着面积比的变大，室内平均风速值逐渐变小；

(3)当模型的进深开间比为 1.00 时，室内平均风速达到最大值；当进深开间比<1.00 时，随着进深开间比值的变大，室内平均风速值先变大后变小；当进出风口面积比>1.00 时，随着进深开间比的增大，室内平均风速值反向变小；

(4)室内平均风速与各影响因子的密切程度由大到小依次为：进出风口面积比>进风向窗墙面积比>距地高度>进深开间比>风向角度>楼层高度；前后风口面积比和离地高度是影响湘南地区高层住宅夏季室内风场的主导因子；前后风口面积比越大，室内平均风速就越低；离地高度越大，室内平均风速就越大。

参考文献 References

[1] 张群,车晓敏,刘加平,等. 苏南地区居住建筑夏季自然通风实测分析与设计策略[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,32(2): 88-91.  
ZHANG Qun, CHE Xiaomin, LIU Jiaping, et al. Residential buildings in southern Jiangsu province ran ventilation measurement analysis and design strategy [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 32(2): 88-91.

[2] WENG W, Taylor, WALMSLEY P A J J. Guidelines for airflow over complex terrain; model developments [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2000,86(2/3):169-186.

[3] 王雅娜,米红甫等. 高层住宅建筑火灾防治研究现状及评价体系[J]. 价值工程,2018,37(33):37-39.  
WANG Yana, MI Hongfu. Research status and evaluation system of fire prevention in high-rise residential buildings[J]. Value Engineering, 2018, 37 (33): 37-39.

[4] 杜晓辉,高辉等. 天津高层住宅小区风环境探析[J]. 建筑学报,2008(4):42-45  
DU Xiaohui, GAO Hui, et al. Analysis on the wind environment of Tianjin high-rise residential district

- [J]. Architecture Journal, 2008 (4): 42-45
- [5] 应小宇,任昕,阚琪等. 风环境视野下高层建筑群朝向—以杭州钱江新城四季青路地块为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(6): 84-89  
YING Xiaoyu, REN Xin, KAN Qi, et al. Orientation of high-rise buildings in the wind environment: Taking the Sijiqing road block in Qianjiang new city, Hangzhou as an example[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50 (6): 84-89
- [6] TAKAHASHI T, KATO S, MURAKAMI S, et al. Wind tunnel tests of effects of atmospheric stability on turbulent flow over a three-dimensional hill[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(2): 155-169.
- [7] HEISEIBERG P, SVIDT K, NIEISEN P V. Characteristics of airflow from open windows[J]. Building and Environment, 2001, 36(7): 859-869
- [8] BastHe A, LAURET P, Garde F, et al. Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates: Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural Ventilation[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(9): 1093-1103.
- [9] HASSAN M A, GUIRGUJS N M, SHAALAN M R, et al. Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort buildings[J]. Desalination, 2007, 209: 251-260
- [10] 刘加平, 罗戴维, 刘大龙, 等. 湿热气候区建筑防热研究进展[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 1-91.  
LIU Jiaping, LUO Dawei, LIU Dalong, et al. Building heat protection in humid and hot climate zones Research progress[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 39 (1): 1-91.
- [11] 石峰, 金伟等. 福州“多进天井式”民居天井几何形态对建筑风环境的影响研究[J]. 建筑学报, 2016, (14): 18-21.  
SHI Feng, JIN Wei. Fuzhou “multi-entry patio style” residential patio geometry on the influence of the state on the building wind environment[J]. Journal of Architecture, 2016, (14): 18-21.
- [12] 胡晓军, 蔡李凯, 应小宇, 等. 一梯多户高层住宅内天井平面形态对中间户型室内风环境影响研究[J]. 建筑学报, 2015(6): 58-62.  
HU Xiaojun, CAI Likai, YING Xiaoyu, et al. In a multi-family high-rise residential building study on the influence of the plane shape of the patio on the indoor wind environment of the middle house[J]. Journal of Architecture, 2015(6): 58-62.
- [13] 王辉, 李新俊, 韩涵等. 高层建筑群平面布局对风环境影响的数值分析[J]. 建筑结构, 2011, 41 (4): 1423-1426.  
WANG Hui, LI Xinjun, HAN Han, et al. The layout of high-rise building complexes against the wind environment numerical analysis of influence[J]. Building Structure, 2011, 41 (4): 1423-1426.
- [14] RAMPONI R, BLOCKEN B, COO L B D, 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.
- [15] 李琼, 持田灯, 孟庆林, 等. 建筑室外风环境数值模拟的湍流模型比较[J]. 华南理工大学学报(自然科学版) 2011, 39(4): 121-127.  
LI Qiong, CHI Tiandeng, MENG Qinglin, et al. Numerical modeling of outdoor wind environment in buildings comparison of quasi-turbulence models[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition) 2011, 39 (4): 121-127.
- [16] 陈勇, 王旭, 孙炳楠, 等. 单体房间室内通风多影响因素的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012(4): 658-664.  
CHEN Yong, WANG Xu, SUN Bingnan, et al. Experimental research on multiple influencing factors of indoor ventilation in single room[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2012 (4): 658-664.
- [17] 徐永平. 湿热气候区高层公寓建筑自然通风组织设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
XU Yongping. Research on natural ventilation organization design of high-rise apartment buildings in humid and hot climate areas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [18] 张伟捷, 晋文. 基于 CFD 建筑热环境模拟的建筑方案优化设计研究[J]. 建筑技术, 2013(27): 614-616.  
ZHANG Weijie, JIN Wen. Building scheme based on CFD building thermal environment simulation research on optimization design[J]. Architecture Technology, 2013(27): 614-616.

(编辑 沈 波)