

# 不同城市密度下建筑空间绿化布局对环境变化的模拟研究

姚海龙<sup>1</sup>, 王雪飞<sup>2</sup>, 童小康<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江同浩建设有限公司, 浙江 衢州

<sup>2</sup>浙江中樑门窗科技有限公司, 浙江 衢州

<sup>3</sup>浙江丰茂盛业建设有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2024年1月10日; 录用日期: 2024年1月25日; 发布日期: 2024年2月29日

## 摘要

随着都市化的加速, 人口密度逐渐升高, 高层建筑的发展成为趋势。这种高密度的发展模式对都市微气候产生了显著影响。为应对这一挑战, 本研究探讨了建筑墙面绿化的效果及其在不同都市密度下的作用。本研究以100%垂直绿化为基础, 针对低、中、高三种密度的都市环境, 设计了12种不同绿化比例(0%、35%、65%、100%)的方案。通过行人高度的风速和温度分析, 我们发现风速和温度在不同密度和方位上存在显著差异。无论是否配置绿化, 随着都市密度和建筑高度的增加, 人行高度的风速逐渐增大。然而, 绿化配置对风速有明显的抑制作用, 随着绿化比例的增加, 风速逐渐降低。特别地, 配置35%绿化比例的建筑可以显著降低各密度的风速并达到最佳的降温效果。在中、低密度下, 这种配置可以降低最少7%的风速和7%的温度。此外, 本研究还发现高密度都市的行人风场较高, 而中、低密度的平均温度较高但风速较低。在背风面的西侧进行绿化设计可以更有效地降低风速和温度。

## 关键词

绿化布局, 城市密度, 环境变化

## Simulated Study on the Impact of Green Spatial Layout of Buildings on Environmental Changes under Different Urban Densities

Hailong Yao<sup>1</sup>, Xuefei Wang<sup>2</sup>, Xiaokang Tong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Tonghao Construction Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Zhongliang Door & Window Technology Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

## Abstract

With the acceleration of urbanization, the population density is gradually increasing, and the development of high-rise buildings has become a trend. This high-density development model has a significant impact on the urban microclimate. To address this challenge, this study discusses the impact of greening building walls in different urban densities. Based on 100% vertical greening, this study designed 12 scenarios with different greening ratios (0%, 35%, 65%, 100%) for low, medium, and high density urban environments. Through the analysis of wind speed and temperature at pedestrian height, we found significant differences in wind speed and temperature across different densities and directions. Whether or not greening is present, as urban density and building height increase, wind speed at pedestrian height gradually increases. However, greening configurations have a significant inhibitory effect on wind speed, which gradually decreases as the greening ratio increases. In particular, buildings with a 35% greening ratio can significantly reduce wind speed and achieve optimal cooling effects across all densities. Under medium and low densities, this configuration can reduce wind speed by at least 7% and temperature by 7%. Additionally, this study found that high-density urban areas have higher pedestrian wind fields, while medium and low-density areas have higher average temperatures but lower wind speeds. Greening designs on the west side of the leeward face can more effectively reduce wind speed and temperature.

## Keywords

Green Layout, Urban Density, Environmental Change

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球城市化进程的加快,世界上超过一半的人口(54%)已经居住在城市,这一数字预计还会继续增长。城市人口的快速增长以及人类活动的影响,使得城市景观变得支离破碎,改变了原有的城市景观格局。此外,这些变化还加剧了地表温度的失衡,扩大了热环境的范围,使得城市热岛效应更加显著。热岛效应作为一种城市气候现象,对人体健康产生直接影响,同时显著增加了能源消耗[1]。为了缓解这些问题,越来越多的高校、研究机构和企业开始关注城市景观格局与城市热环境之间的关系。在这个过程中,景观生态学、建筑学、地理信息系统(GIS)、遥感科学以及计算流体力学等跨学科的理论与方法都被广泛应用于城市热环境的研究中。首先,景观生态学在城市热环境研究中起到了重要作用。通过对城市绿地、水体等生态基础设施的布局进行分析,可以有效降低城市地表温度,改善热环境。此外,绿地和水体还可以为城市提供生态服务,如调节气候、减缓洪水等,从而进一步提高城市生态环境的可持续性。其次,建筑学在城市热环境研究中关注建筑物的设计、布局以及材料等方面。优化建筑物的热性能,提高建筑物的保温、隔热性能,可以降低室内温度,提高居住舒适度。同时,合理的城市建筑布局有助于提高城市空气流通性,减少热岛效应的影响。再者,地理信息系统(GIS)和遥感科学在城市热环境

研究中具有重要作用。通过 GIS 和遥感技术,可以实时获取城市地表温度、植被覆盖率、建筑物密度等信息,为城市热环境的监测、预测和评估提供数据支持。此外,这些技术还可以帮助决策者分析城市热环境与景观格局之间的关系,为城市规划和设计提供科学依据。然而,当前研究主要关注建筑物本体绿化率设计或高层高密度都市空间的绿化与风热环境关系,较少从街廓尺度探讨建筑物绿化栋数对环境的影响。

在模拟方法上,本研究采用了计算流体力学(CFD)方法,对低、中、高不同都市密度理想城市进行模拟。CFD 是一种强大的数值模拟工具,它可以模拟和分析流体流动、传热、化学反应等多种物理和化学现象。在本研究中,我们利用 CFD 方法,对不同都市密度下的理想城市进行建模,并模拟了建筑物的布局、高度以及绿化栋数对风环境和温热环境的影响。在模拟过程中,我们主要考虑了以下主控影响因素,(1) 建筑高度:建筑高度是影响城市风环境和温热环境的重要因素。不同高度的建筑物会产生不同的气流和温度梯度,从而影响城市微气候。在本研究中,我们将探讨不同建筑高度对风环境和温热环境的影响。(2) 绿化栋数:绿化栋数是指建筑物表面绿化的比例。适量的绿化可以降低建筑物的温度,改善城市热环境。在本研究中,我们将模拟不同绿化栋数(0%、35%、65%、100%)对风环境和温热环境的影响。(3) 都市密度:都市密度是指城市中建筑物的密集程度。高密度的城市会导致地表温度升高,加剧热岛效应。在本研究中,我们将模拟低、中、高不同都市密度下的理想城市,分析其对风环境和温热环境的影响。因此,通过这些模拟和影响因素分析,我们将深入了解建筑高度、绿化栋数和都市密度对城市风环境和温热环境的影响,以期为我国都市规划和建筑设计提供有益的参考[2] [3]。

## 2. 国内外相关文献与理论探讨

### 2.1. 都市热岛效应与温热环境

都市热岛效应(Urban Heat Island Effect)是由 Luck Howard 于 1833 年提出,其定义为都市环境由于绿地不足、人口过度集中、人工散发热大、建筑物材料影响等因素,使得都市有如一座发热的岛屿,因而有“热岛”之称。都市热岛效应是城市环境中的一种重要现象,它对城市的气候、生态系统和居民生活等方面都有显著影响。从专业角度来看,都市热岛效应与温热环境的形成机制、影响因素和缓解措施等方面值得深入探讨。

#### (1) 形成机制

城市化进程中,大量自然植被被建筑物、道路和硬化地面等替代,使得城市的表面反照率高于周围乡村地区,吸收的太阳辐射能更多,导致城市地表温度升高。城市中的人工构筑物和交通工具等会产生大量的热量,这些热量排放到城市环境中,进一步提高了城市地表温度。城市中的人口密集,建筑物高密,使得空气流通受到限制,散热效果差,这也促进了城市热岛效应的形成。

#### (2) 影响因素

气象条件:如气温、风速、湿度、云量等气象因子都会对都市热岛效应产生影响。例如,无风的天气会使热量在城市中积聚,加剧热岛效应。城市规划布局:不合理的城市规划布局会加剧热岛效应。例如,城市中的绿地、水体等自然元素较少,建筑密度大,都会使得城市地表温度升高。能源消耗:城市中的大量能源消耗,如交通、工业和居民生活等,会产生大量的热量,对热岛效应产生影响。地表覆盖物:城市地表的覆盖物类型对热岛效应有显著影响。例如,水泥、沥青等材料的高反照率和高吸热性会使得城市地表温度升高。

葛亚宁等人[4] (2016)探讨北京建筑区,发现高层建筑区栋距较大,有利于空气流通,同时热岛效应具有减弱的趋势。温靖儒(2018)研究透过实地量测法、问卷调查法、热环境因子调查与 CFD 软件模拟,验

证校园开放空间步行环境的高温化现象影响温热环境之因子, 研究结果显示天空可视率(SVF)在热季校园开放空间步行环境中, 是影响步行环境的遮蔽程度与太阳直射步行环境的比例, 需降低步行环境之可视率, 如有绿化植栽、铺面材质、水体、人工发散热、风环境、天空可视因子、建城区密度与高度等七项。李仲翊(2019)等人[5]在研究中分析透空式高密度高层建筑对微气候影响, 结果显示透空式高层建筑能增加空气流通性, 改善原有背风面都市风场弱风之情形, 也能有效降低街谷中温度及污染物浓度, 但随距离增加改善效果会有递减情形。

## 2.2. 都市密度对都市风环境影响

吴志刚等人[6] (2016)通过卫星遥控反演技术分析地表温度, 发现建筑覆盖率较高的地区地表温度较高。郑颖生等(2017) [7]研究高速的城市化进程, 改变了城市的地表材质和空间结构, 引发城市气候的改变。Shuo-Jun Mei 等人(2017)提出较低的建筑密度能提高通风效率, 并在紧凑城市发展中获得更好的通风性能。张至柔[8]以沈阳市浑河两岸风环境作为研究对象, 基于粗糙度理论将城市形态与风环境联系起来, 通过现场实测, 三维建模计算八个地块内的迎风面密度, 建立迎风面密度地图, 直观的描述研究区域内的风环境, 发现迎风面密度越大, 建筑对风的阻碍作用越大。林中立等[9] (2022)以我国新晋“火炉城市”福州的主城区为研究区, 使用 2019 年 9 月 22 日过空的 Landsat-8 影像, 对基于 LCZ 的热环境空间分布特征与 LCZ 类间/类内差异进行分析, 并就福州城市热环境的改善提出规划建议。王斐[10] (2021)通过选取典型商业区绿化规模和绿化结构量化指标, 以 DUTE (Design Urban Thermal Environment)为模拟平台建立模型, 基于数值统计, 从平均热岛强度, WBGT, CTTC 三个方面探讨不同绿化规模和绿化结构对商业区热环境的影响.其中涉及到的问题有绿化量化指标的选取与定义, 指标体系的建立, 模拟软件的实测分析与验证, 典型商业区数值模拟方案设计, 模拟结果的数据整理与分析。Man Lin (2014)研究分析了不同建筑高度、建筑覆盖率及环境风向对 UCL 通风的影响, 并利用清除流率(PFR)和空气换气率(ACH)进行评估, 发现建筑物高度变化会增强高层建筑周边的气流, 但降低低层建筑附近的通风效果。综合相关文献, 影响都市微气候的因素包括建筑形态(建筑覆盖率、平均高度、容积率), 其中建筑平均高度对风环境影响尤为显著。

## 2.3. 都市立体绿化及方位对温热场影响

根据 Irina 等人(2014)的实地测量, 建筑立面各方向的墙表面温度平均降低 0.7 度, 其中东向最大降温约为 12.6 度。空气温度平均降低约 0.8 至 2.1 度, 相对湿度比裸墙周边高 2 至 4%。Aflaki 等人(2017)的研究表明, 相较于玻璃建筑表面, 100%覆盖率的立体绿化系统可以降低环境温度约 1°C。Ouyang 等人(2020)在实验中探讨了不同都市密度配置绿化覆盖的情况, 绿化范围从 2%到 30%, 以及整个区域覆盖绿化(建筑物以外的 56%绿化)。在设定树高(9 M)、树干高度(3 M)、冠宽(7 M)的条件下, 研究发现低密度 20%~30%的植栽覆盖率最为有效。Peng 等人(2020)模拟了南京典型的都市形态, 配置绿覆率 35%~100%, 结果表明高密度绿化 61%~81%可以实现日间节能 3%。Morakinyo 等人(2019)利用 ENVI-met 研究了香港典型高密度都市配置立体绿覆率及方位对降温的效益, 风向以夏季西南风为设定。研究结果显示, 在绿化量相同的情况下, 中午之前, 东立面降低 12 至 14 度, 其次是南向降低 7 至 11 度。当东西向及南北向采用相同的绿覆率时, 前者产生更好的热效益。

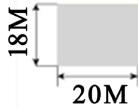

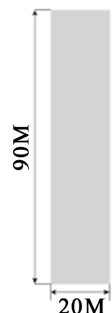
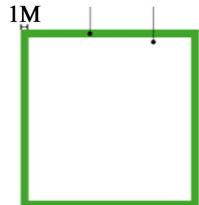
## 3. 数值模拟计划

本研究设定 6 × 6 共计 36 栋建筑的概念城市模型, 单栋建筑量体尺寸长 20 m (B) × 宽 20 m (B), X 轴向通道与 Y 轴向通道宽度(W)为 20 m (B), 研究区域配置范围为 220 m × 220 m。透过 CFD 数值模拟解

析都市风场与温度场分布状态, 探讨低、中、高都市密度建筑物配置绿化栋数(0%、35%、65%、100%)对于都市微气候及环境风场变化的影响, 详如表 1 所示。

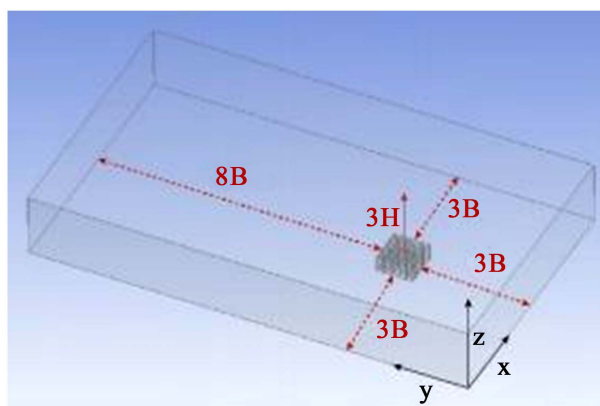
**Table 1.** Architectural model and planting layer medium setting diagram

**表 1.** 建筑模型及植栽层介质设定图

低密度(18 m)	中密度(54 m)	高密度(90 m)	植栽设定
			

采用 ANSYSFluentv18 数值模拟软件进行高速端流与不可压缩流、稳态以及导热与热流传热的三维空间模拟分析, 边界条件设定入风口为  $3B$  的距离、横向为  $3B$  的距离、建筑物上方的边界距离则以建筑物高度  $H$  的三倍, 设定为  $3H$ , 出口边界与模型保持  $8B$  的距离, 以实现完整的尾流, 如图 1 所示。材质条件设定, 将建筑壁面设定为混凝土、地面设定为沥青, 植栽材质部分综合 Buccolieri 等人(2009)将植栽将植栽层设定为均匀填充分布且无弹性的多孔隙材质, 植栽孔隙率设定为 0.9, 讨论方式分为  $Y$  轴向通道(平行风向通道)及  $X$  轴向通道(垂直风向通道) 2 部分, 以探讨行人高度 1.5 m (距离建筑外墙 1 公尺)处建筑四个面向的风及温热环境变化。每行设置 6 个测点,  $X$  轴分为东向 A、B、C 行 18 个测点及西向 D、E、F 行 18 个测点,  $Y$  轴分为南向 G、H 行 12 个测点及北向 I、J 行 12 个测点, 作为分析平均风速及温度的数据, 如图 2 所示。

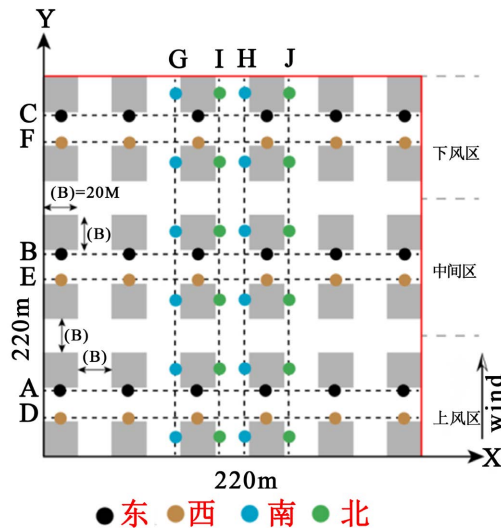
模拟气象参数采用交通部中央气象局台衢州站, 计算 2012 年至 2021 年共十年的夏季(6~8 月)平均气象资料作为参数设定依据, 计算结果可得知平均风速为 1.92 m/s、平均温度为 29.67°C, 主要是东风 35%, 如表 2 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of boundary conditions

**图 1.** 边界条件示意图





**Figure 2.** Urban concept setting and measurement point configuration diagram  
**图 2.** 城市概念设定及测点配置图

**Table 2.** Study area and observation sites  
**表 2.** 研究区域和气象观测站

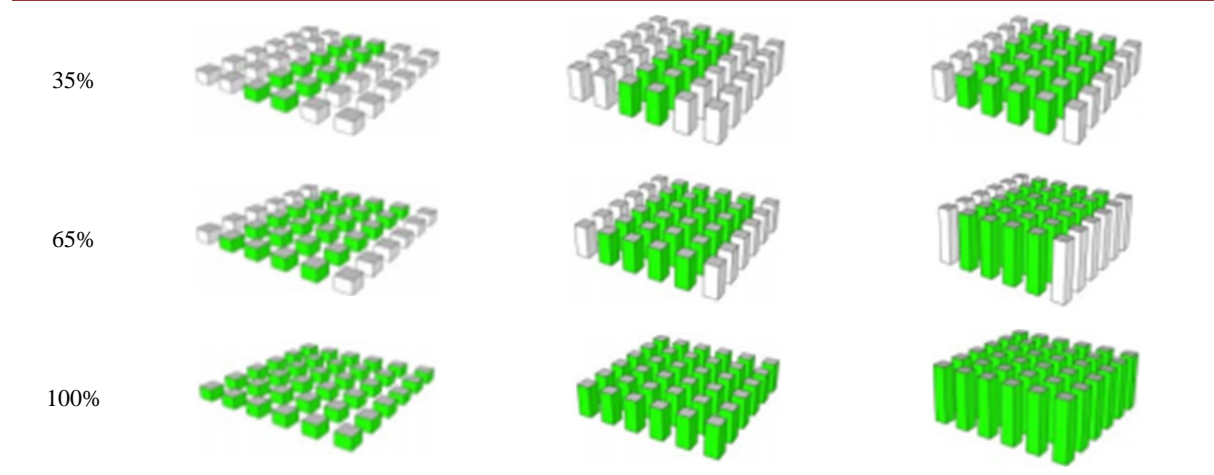
内容		图表	
测站地点	衢州		
测站高度	5.3 m		
主要风向	东风		
平均风速	1.92 m/s		
平均气温	29.67°C		

模拟变项包括楼高 18 m (低密度)、54 m (中密度)、90 m (高密度) 不同都市密度的设定，配置建筑四面立体 100% 绿化，绿化栋数比例(0%、35%、65%、100%)，共低中高都市密度配置不同绿化栋数 12 个模拟方案，如表 3 所示，并探讨建筑物各向对于都市街道空间风速与温度的影响。

**Table 3.** Summary table of variable types  
**表 3.** 变项型态汇总表

	低密度(18 m)	中密度(54 m)	高密度(90 m)
0%			

续表



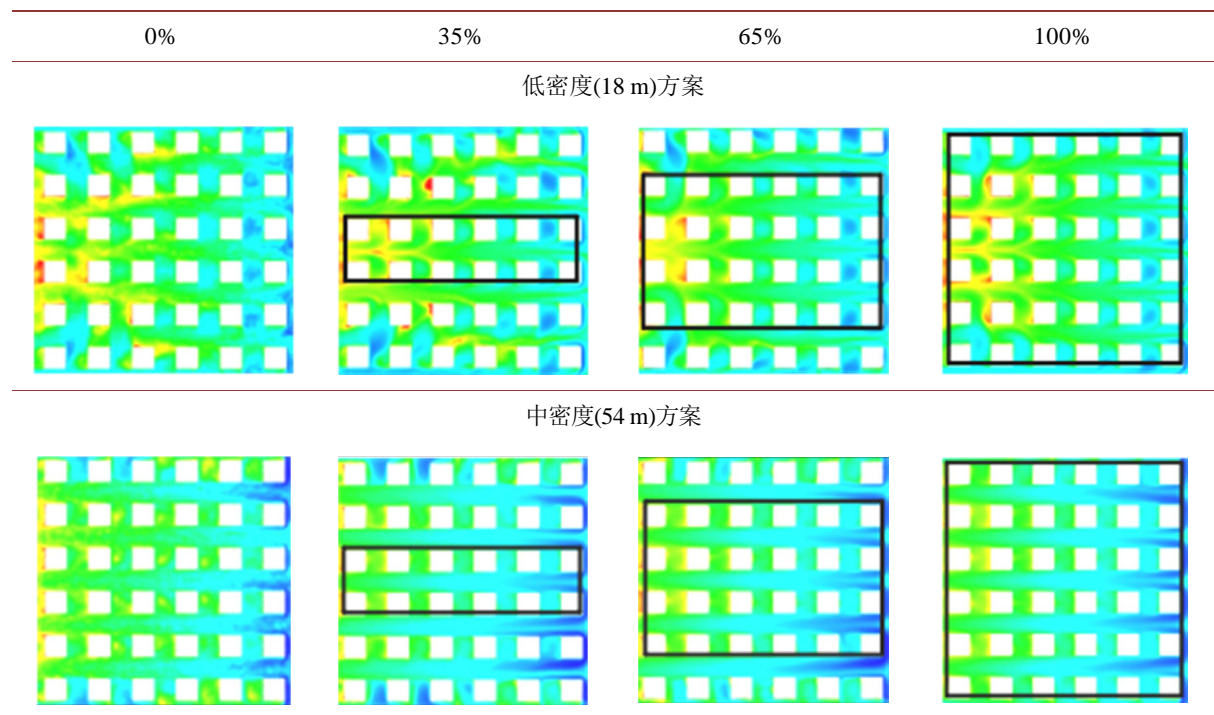
## 4. 模拟分析

### 4.1. 风速模拟结果分析

#### 4.1.1. 低中高密度绿化对风环境的影响差异

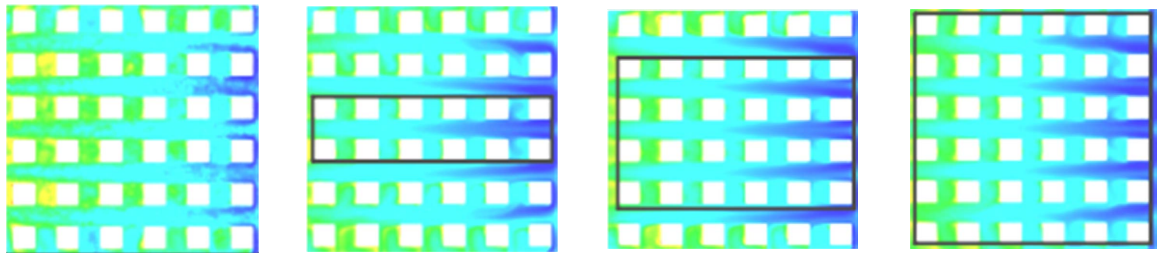
低、中、高密度型态配置不同绿化栋数方案人行高度的风环境分析结果如表 4 所示。无论是否存在绿化配置，随着城市密度的增加和建筑量体高度的提高，建筑物角隅处产生的涡流会间接提升风速，从而使风速逐渐增大。对比 0% (无绿化)低、中、高密度方案的风速，可知“高密度(90 m)方案(0.811 m/s) > 中密度(54 m)方案(0.481 m/s) > 低密度(18 m)方案(0.422 m/s)”。在配置 35%绿化栋数的条件下，平均风

**Table 4.** Analysis table of 1.5 m high Z-axis wind environment simulation results for each scheme  
**表 4.** 各方案 1.5 m 高 Z 轴风环境模拟结果分析表



续表

高密度(90 m)方案



速降低最小,为“高密度方案(0.612 m/s) > 中密度方案(0.459 m/s) > 低密度方案(0.364 m/s)”,其中中、低密度方案的风速降低最少 0.03 m/s。这一结果表明,随着各方案绿化栋数的增加,由于植栽孔隙率及表面摩擦力的影响,风速逐渐降低,呈现反比趋势。这一结论与密度越高,建筑高度增加,风速逐渐增加以及建筑物高度变化会增强高密度风速,降低低密度通风效果的观察相符。

#### 4.1.2. 低中高密度建筑量体各向绿化对风环境影响分析

不同建筑密度不同百分比绿化栋数方案的建筑物各向风环境分析结果如图 3 所示,显示低密度(18 m)方案建筑量体绿化方案各向平均风速呈现出“东向(0.554 m/s) > 西向(0.456 m/s) > 南向(0.351 m/s) > 北向(0.323 m/s)”；中密度(54 m)方案及高密度(90 m)方案皆呈现“东向 > 南向 > 北向 > 西向”。低密度配置 35%绿化栋数方案为各方案的方位衰减幅度最小,东西南北向依序递减 15%、35%、39%。各方案的东向迎风面风速最高,随着密度越高衰减幅度越大,相较 0%无绿化的风速“高密度方案(0.894 m/s) > 中密度方案(0.725 m/s) > 低密度方案(0.542 m/s)”,配置 35%绿化栋数“高密度方案(0.782 m/s) > 中密度方案(0.719 m/s) > 低密度方案(0.532 m/s)”为各方案风速降低最少的,其中低密度方案风速降低 0.01 m/s 及中密度方案降低 0.02 m/s。此结果显示与风向平行的东向,会增加风速,提升通风效果相符,本研究加入不同密度的变项,随密度越高风速衰减幅度越大。

无论有无绿化,建筑物东向迎风面、北向、南向立面行人高度平均风速显示高密度(90 m) > 中密度(54 m) > 低密度(18 m)方案,背风处的西向立面则是低密度方案 > 中密度方案 > 高密度方案。随都市密度越高,东向迎风面、南向及北向立面平均风速逐渐提升,但背风处的西向立面平均风速逐渐下降。相较 0%无绿化的西向立面风速“低密度方案(0.456 m/s) > 中密度方案(0.3238 m/s) > 高密度方案(0.328 m/s)”,配置 35%绿化栋数西向立面风速为“低密度方案(0.431 m/s) > 中密度方案(0.298 m/s) > 高密度方案(0.292 m/s)”衰减幅度最小,依序递减 36%及 39%,其中低密度方案的西向立面风速降低 0.025 m/s 最少。此结果随都市密度越高,相较其他向立面,背风面的西侧风速逐渐下降,与李仲翊(2019)研究提出背风面都市风场有弱风的情形相符。

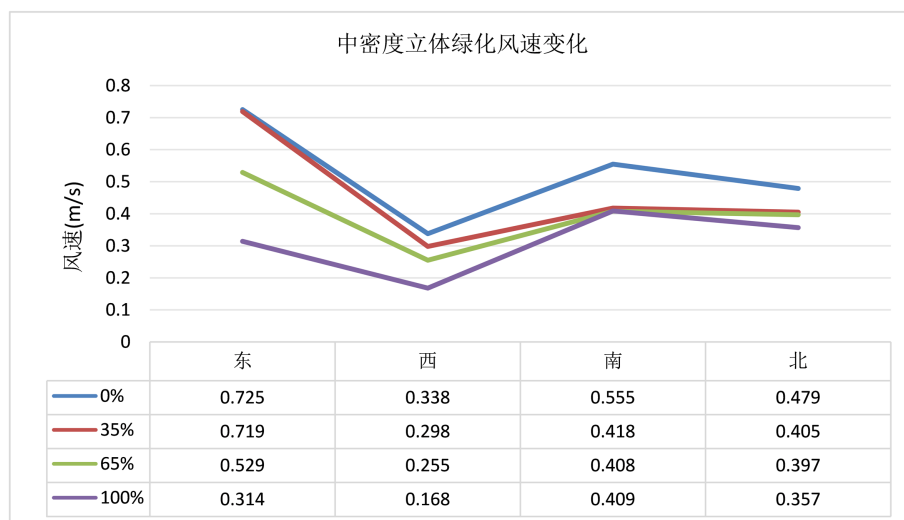
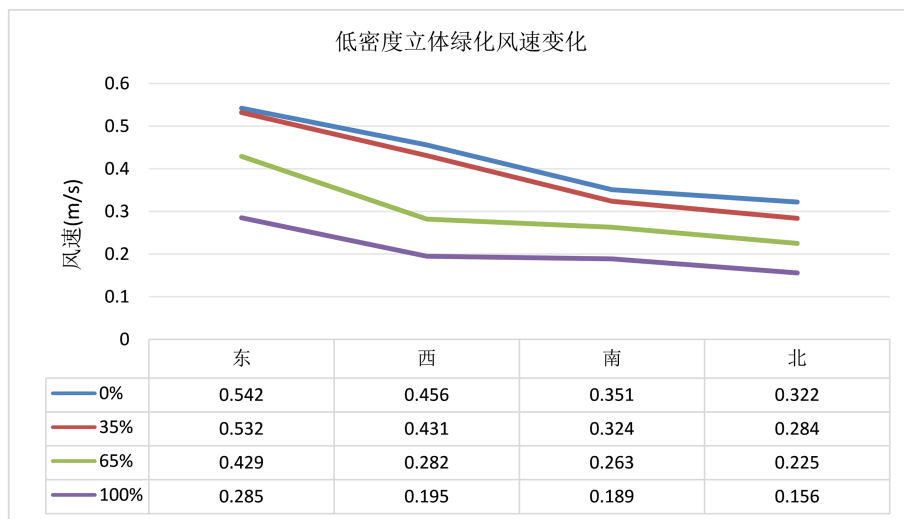
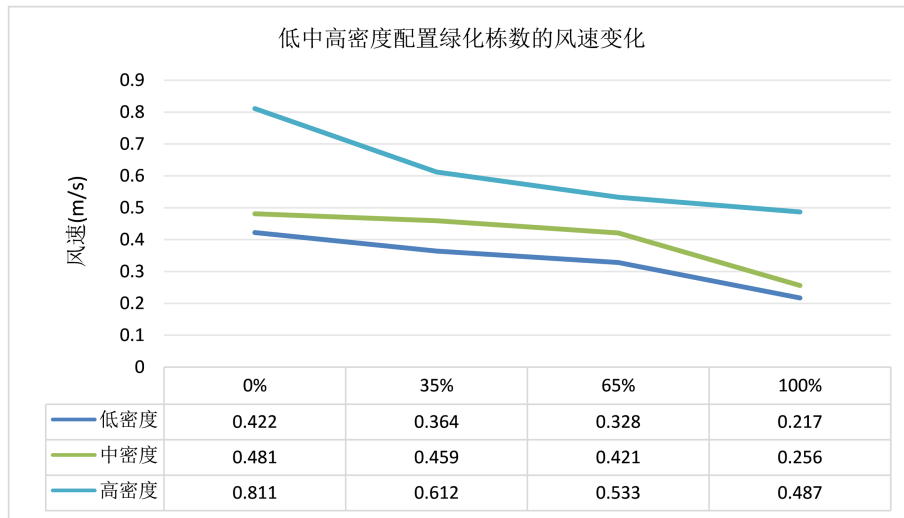
## 4.2. 温热环境模拟结果分析

### 4.2.1. 低中高密度绿化温度分析

表 5 分别为低中高密度型态配置不同绿化栋数方案的温度分析结果如表 5 所示,无论有无绿化配置,随都市密度越低,人行高度平均温度逐渐增加成反比趋势。不管低、中、高密度都市立体绿化皆能降低温度,相较 0%无绿化的平均温度“低密度(18 m)方案(37.85℃) > 中密度(54 m)方案(36.94℃) > 高密度(90 m)方案(36.44℃)”,绿化栋数 35%比例降温最明显,平均温度呈现“低密度(18 m)方案(35.22℃) > 中密度(54 m)方案(34.45℃) > 高密度(90m)方案(34.49℃)”,显示低密度方案降低温度 2.6℃效果最佳。随着



绿化比例增加，温度略有上升，于高密度方案温度衰减幅度最小，呈现“0%无绿化 > 100%绿化 > 65%绿化 > 35%绿化”，依序递减 4%、5%及 6%温度，显示绿化越高未必呈现都市降温的最佳状态。



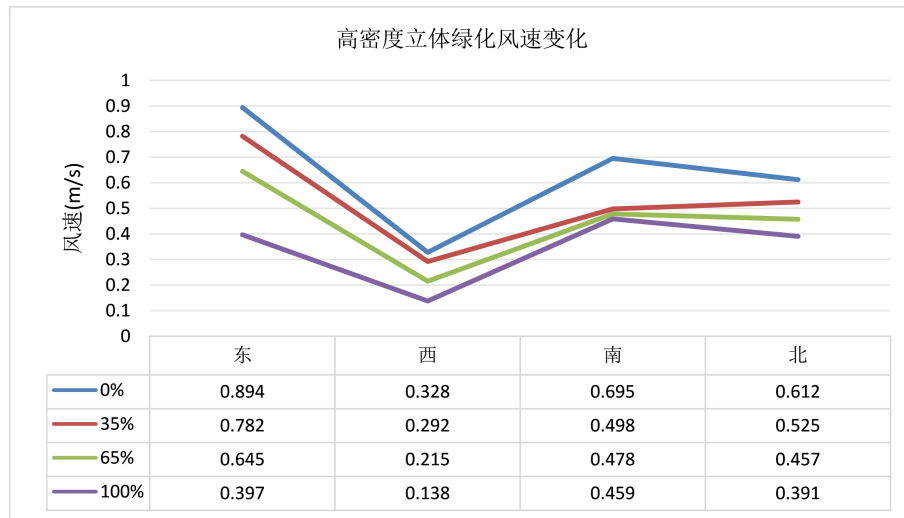
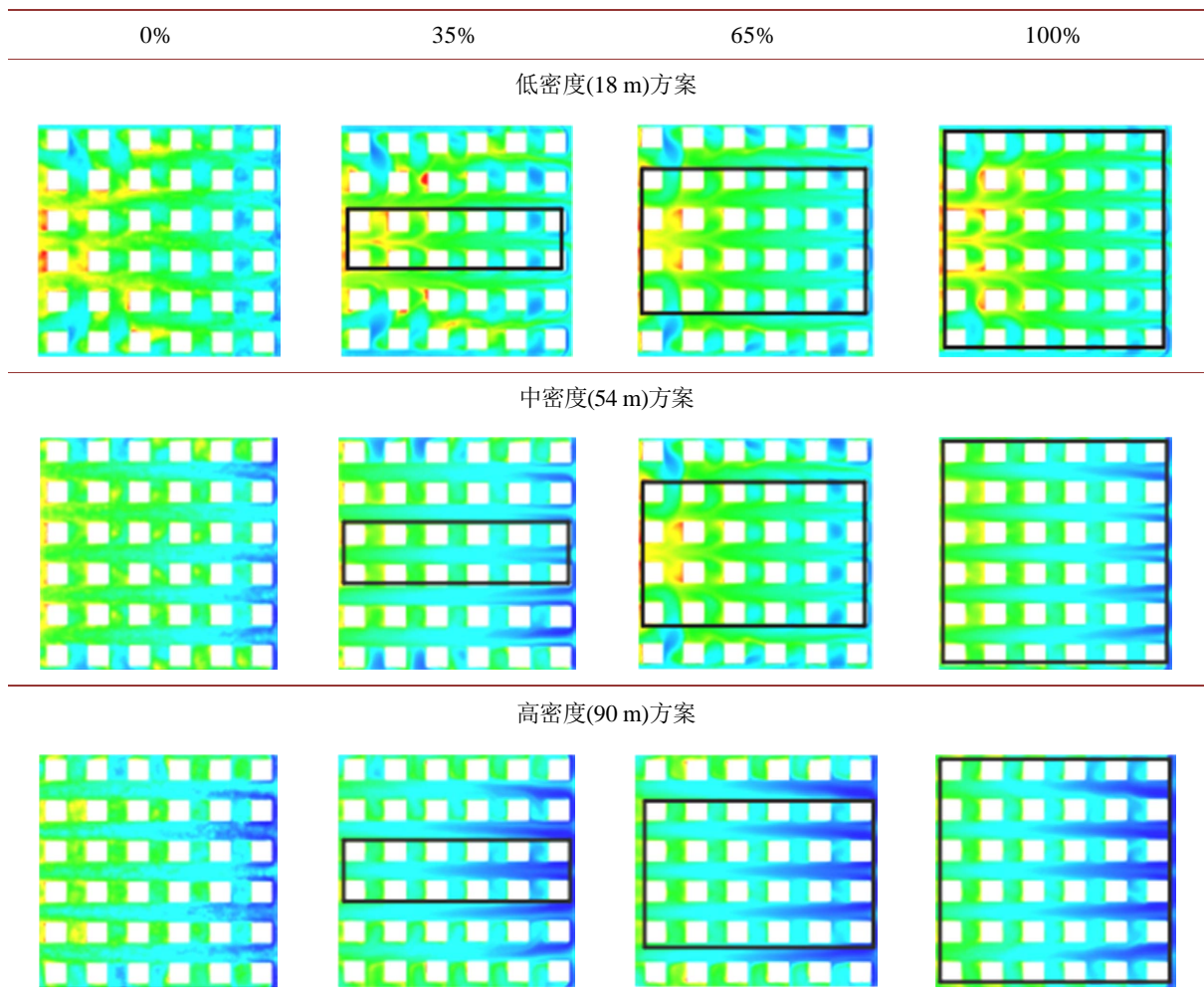


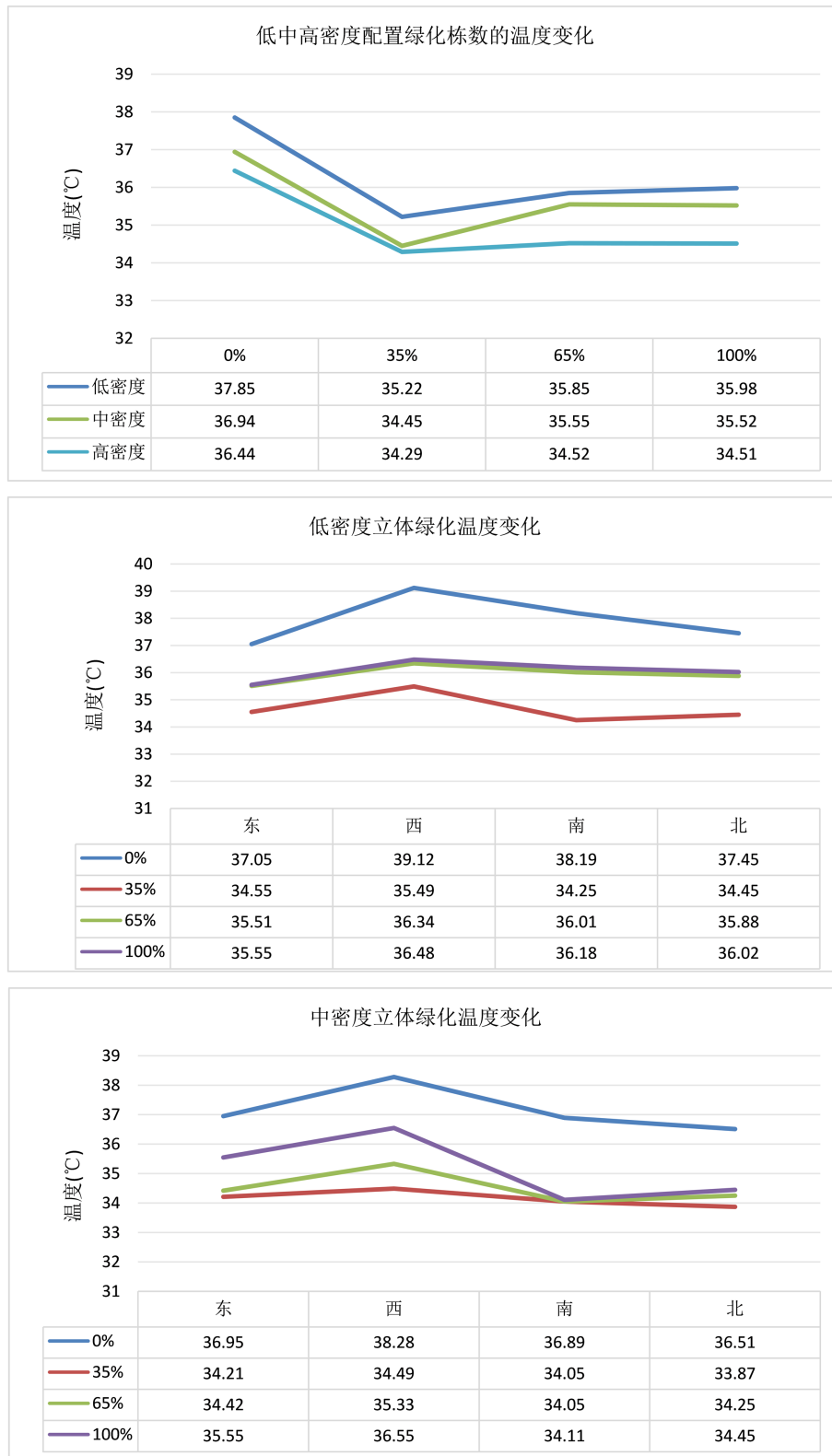
Figure 3. Summary table of 1.5 m high Z-axis wind speed change trends for each scheme  
 图 3. 各方案 1.5 m 高 Z 轴风速变化趋势汇总表

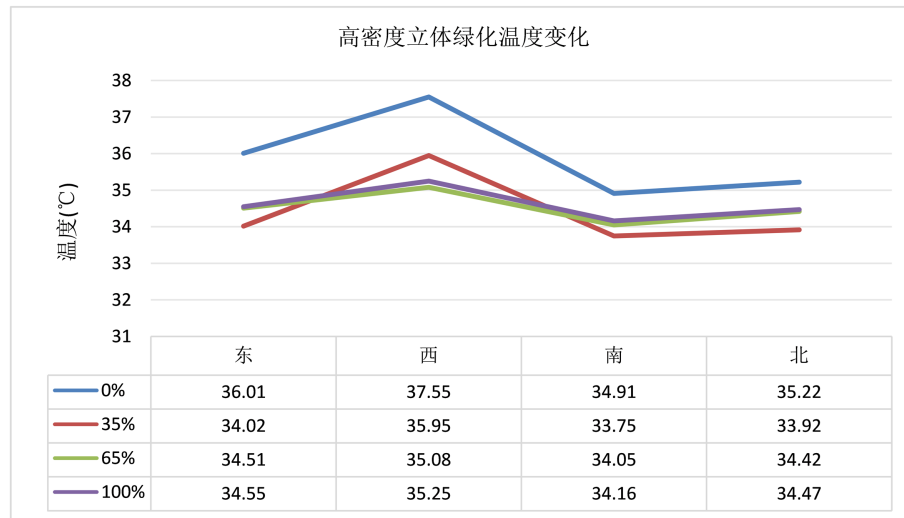
Table 5. Analysis table of 1.5 m high Z-axis thermal environment simulation results for each scheme  
 表 5. 各方案 1.5 m 高 Z 轴温热环境模拟结果分析表



### 4.2.2. 低中高密度建筑量体各向绿化温度分析

不同建筑密度不同百分比绿化株数方案的建筑物各向温度分析结果如图 4 所示。低密度(18 m)及中密





**Figure 4.** Summary table of 1.5 m high Z-axis wind speed change trends for each scheme  
**图 4.** 各方案 1.5 m 高 Z 轴温度变化表

度(54 m)方案各向平均温度皆呈现“西向 > 南向 > 北向 > 东向”，高密度(90 m)方案呈现“西向 > 东向 > 北向 > 南向”，显示各方案的背风处的西向平均温度最高，推测因热堆积效应较其他方位温度高。以高密度方案配置 35%绿化栋数的方位温度衰减最大“西向(35.49°C) > 东向(34.0°C) > 北向(33.92°C) > 南向(33.75°C)”。相较 0%无绿化的西向立面温度“低密度(18 m)方案(35.95°C) > 中密度(54 m)方案(35.08°C) > 高密度(90 m)方案(35.25°C)”，配置 35%绿化栋数的西向具最佳降温效果“低密度方案(35.22°C) > 中密度方案(34.45°C) > 高密度方案(34.29°C)”，以低密度方案的西向立面降低温度最大。本研究西向背风面温度较高降温效果较明显，与 Morakinyo 等人(2019)研究东向背风立面降温效果最佳(风向为西南风)的结果相符。

## 5. 结论

综上所述，风速和温度随着都市密度和建筑物高度增加而变化。绿化配置越多，风速和温度越低。低密度和中密度方案的降温效果最佳，尤其配置 35%绿化栋数。东向迎风面的风速最高，绿化密度增加则风速衰减幅度增大。垂直绿化能带来整体降温效果，但城市密度等因素也影响温热环境。绿化比例为 35%时降温效果最佳。后续研究将进行街道宽度变化因子的考量，以获得最佳降温组合。

## 参考文献

- [1] 康博文, 王得祥, 刘建军, 李林. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 54-56.
- [2] 孟庆林, 高云飞. 万科建筑研究中心大厅自然通风分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(8): 154-157.
- [3] 周淑贞. 气象气候学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 68-74.
- [4] 葛亚宁, 徐新良, 李静, 等. 北京城市建筑密度分布对热岛效应的影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1698-1706.
- [5] 苏瑛敏, 李仲翔. 透空式高层建筑对都市街谷中污染物扩散之影响[J]. 物业管理学报, 2019, 10(2): 1-15.
- [6] 吴志刚, 江滔, 樊艳磊, 等. 基于 Landsat8 数据的地表温度反演及分析研究——以武汉市为例[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 135-142. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7940.2016.01.023>
- [7] 郑颖生, 史源, 任超, 等. 改善高密度城市区域通风的城市形态优化策略研究——以香港新界大埔墟为例[J]. 国际城市规划, 2016, 31(5): 68-75.



- 
- [8] 张至柔. 基于粗糙度理论的沈阳市浑河两岸住区风环境分析与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [9] 林中立, 徐涵秋. 基于局地气候分区体系的福州城市热环境研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 189-200.  
<https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2022.210669>
- [10] 王斐. 基于热时间常数(CTTC)模型的绿化对商业区热环境影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.