

基于CFD模拟的高密度典型住区模块通风效率与承污韧性提升策略

孙川淇, 陈翔宇, 贺孟冉, 袁晓念

天津城建大学, 天津

收稿日期: 2021年10月17日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年11月29日

摘要

城市高密度住区越来越多, 住区内部复杂的风环境将直接影响到居民的舒适程度。本项目聚焦城市高密度典型住宅, 以天津市为例, 利用CFD模拟技术对目标地区进行风环境评价, 并以提升通风效率与承污韧性从而提升人体居住舒适度为目标探讨高密度典型居住区。利用CFD模拟技术, 探索不同典型高密度住区模式的风-污环境时空分布特征, 总结不同季节下不同组合模块的通风效率、承污耐受度与建筑布局形态的关系, 为提出高密度住区通风效率与承污韧性的优化策略提供有力支撑。

关键词

高密度住区, CFD模拟, 风环境, 承污韧性

Strategy of Ventilation Efficiency and Pollution Toughness of High Density Typical Housing Module Based on CFD Simulation

Chuanqi Sun, Xiangyu Chen, Mengran He, Xiaonian Yuan

Tianjin Chengjian University, Tianjin

Received: Oct. 17th, 2021; accepted: Nov. 19th, 2021; published: Nov. 29th, 2021

Abstract

There are more and more high-density urban settlements, and the complex wind environment within the settlements will directly affect the comfort degree of the residents. The project focuses

on urban high-density typical housing. Taking Tianjin as an example, CFD simulation technology is used to evaluate the wind environment in the target area, and discusses the high-density typical residential areas with the goal of improving ventilation efficiency and pollution bearing toughness and thus improving human residential comfort. Using CFD simulation technology, it is used to explore the spatial and temporal distribution characteristics of wind-pollution environment in different typical high-density residential modes, summarize the relationship between ventilation efficiency, pollution tolerance and structure layout form of different combination modules in different seasons, and provide strong support for the optimization strategy of ventilation efficiency of high-density housing and pollution bearing toughness.

Keywords

High-Density Residence Area, CFD Simulation, Wind Environment, Pollution-Bearing Toughness

Copyright © 2021 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

随着城市化进程的飞速发展，城市里高层住区越发普遍，加上城市用地有限，因而在城市中形成了形态各异的高密度住区；并且住区室外空间环境能直接影响到居民舒适度体验和身心健康。已有研究表明：空气湿度、空气温度、太阳辐射、风速、风压等微气候因素能够影响人们的舒适度水平，截止目前为止，还缺少关于城市高密度住区微气候的研究。本文以天津市为例，选取城市典型高密度住区为研究对象，利用流体力学原理模拟分析法、实证调查法、统计学方法(SPSS)等多种研究方法，对多层行列式、多层围合式、单一点状高层式等多种不同模式的高密度住区进行通风效率与承污韧性的调查与分析，并建立天津高密度住区的风、污环境“模拟实验数据库”。分析实验数据，针对不足处提出优化提升策略，从而达到优化住区“风-污”环境的目的，提升居民舒适度。

2. 研究内容

本文选取天津市住区案例进行现场调研，识别住区中具有不同绿化和建筑布局特征的空间，对其建筑、绿化布局情况进行调查记录，并采集风速、通风截面积、空气污染物浓度等评价指标参数。同时，对住区内各布局中心聚集度、建筑密度与开放空间率、建筑高度进行上述指标的数据模拟，借助PHOENICS模型，将单一变化量个体参数及实测气象数据进行对比分析。在此基础上，运用统计学方法，建立各变量情况下，风速风压与住区布局指标之间的关联，得出住区不同季节下的通风效率、承污耐受度与建筑布局形态的关系，并尝试探究提高住区通风效率与承污韧性的提升性策略。

3. 研究对象

选取笔者所在的天津——位于我国靠北位置的冬冷夏热的季风气候群为研究城市，选取天江格调花园、远洋天地、富力城等7个城市内部的建筑类型为板塔混合式的高层建筑，内部建筑布局模式以平行式分布为主，是天津市住区的典型布局模式，对该建筑布局下的“风-污”环境进行实测和模拟，并结合高密度的特点和PDF模拟软件的特性及优势，提出具有普遍适用性的城市规划设计优化策略。

4. 研究方法与评价标准

4.1. “风 - 污” 环境研究

4.1.1. “风 - 污” 要素现场实测

现场测试时间为 2020 年 1 月 11 日 7:00~19:00, 天江格调花园、远洋天地、富力城等 7 个住宅区进行室外风环境现场实测, 为保证测点选取的典型性和代表性, 测点主要布置在: ① 行人出行次数较多的空间, 如开敞公共空间、小区主要道路等; ② 易导致风环境不佳的空间, 如裙两个建筑正中间、围合封闭空间等。

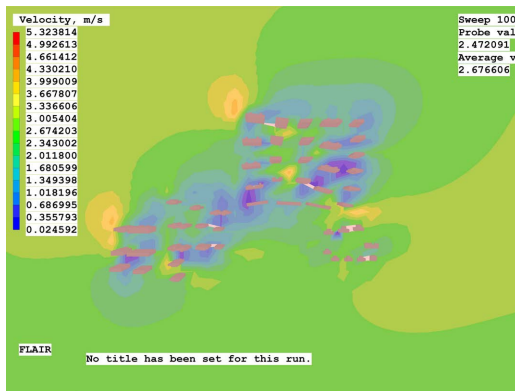
4.1.2. “风 - 污” 环境数值模拟

本研究中, 笔者针对混合高层住区风环境的模拟运用 PHOENICS 2019 软件结合现场实测数据, 进行三维稳态计算模拟, 选用标准 k-ε 模型进行模拟运算, CFD 模拟案例的结果如下图 1。

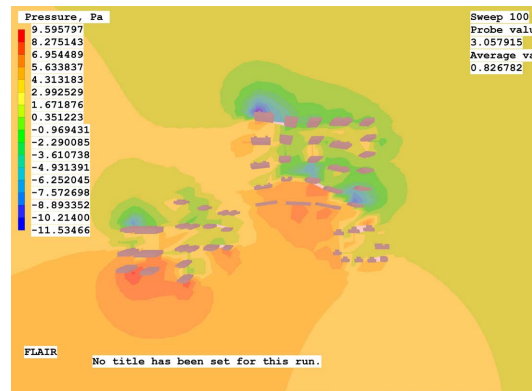
通过对所选的七个高密度典型住区建模并进行风压分压的模拟分析得出以下结论:

- 1) 建筑布局: 对比时代奥城与阳光星期八的风速风压数据可以看出, 开放式的布局与半包围式的布局其外部的风速风压较为相似, 但开放式内部整体的风速明显大于半包围式并且风压较低, 环境更为适宜。
- 2) 建筑高度: 对比远洋天地与天江格调的风速风压数据可以看出, 建筑高度高的住宅区, 因建筑对风产生的阻挡面积较大, 所以风压较强, 风速也较低, 风的流动效率也较低。
- 3) 拥挤度: 对比富力城内部上中下三部分的风速风压数据可以看出, 上部建筑布局较为宽松的部分风速较高, 风压较低。

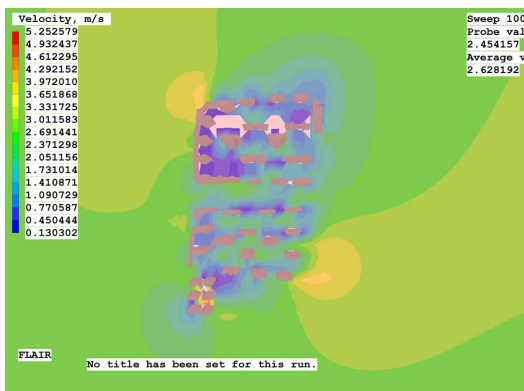
通过对这七个典型住区案例的风环境分析模拟可以发现, 不同的建筑布局、建筑高度、拥挤度等对通风效率均有一定的影响, 其为下一步确定影响通风效率的评价因子提供了进一步的数据支撑。



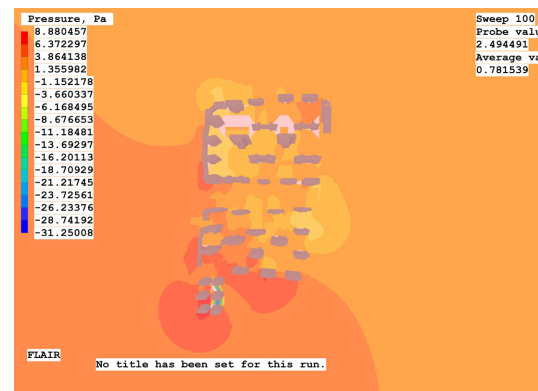
时代奥城 - 风速



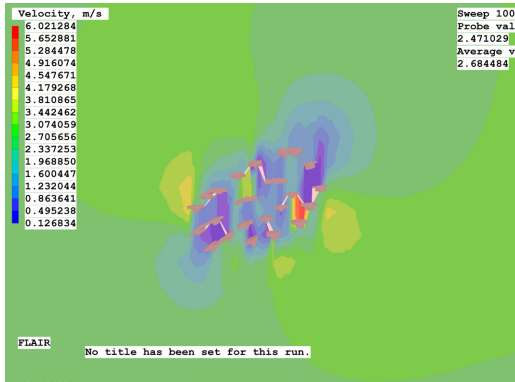
时代奥城 - 风压



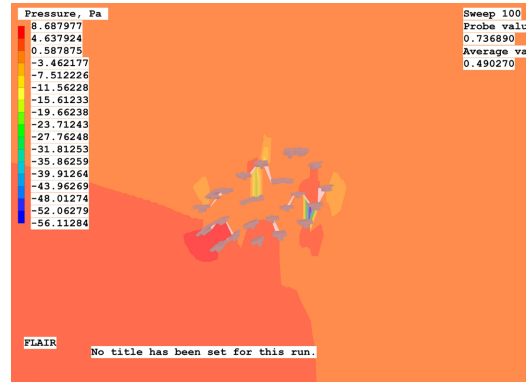
阳光星期八 - 风速



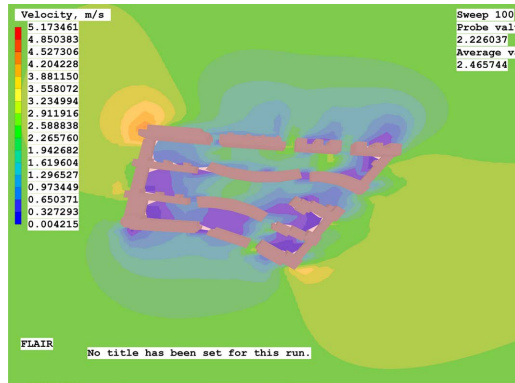
阳光星期八 - 风压



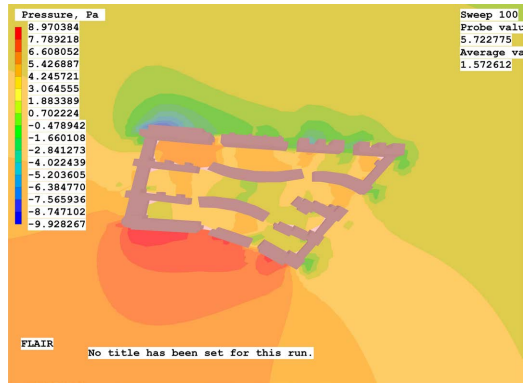
远洋天地 - 风速



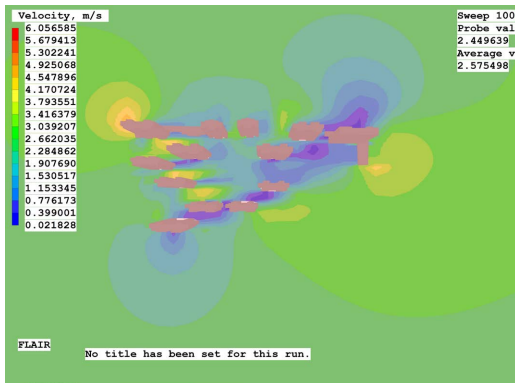
远洋天地 - 风压



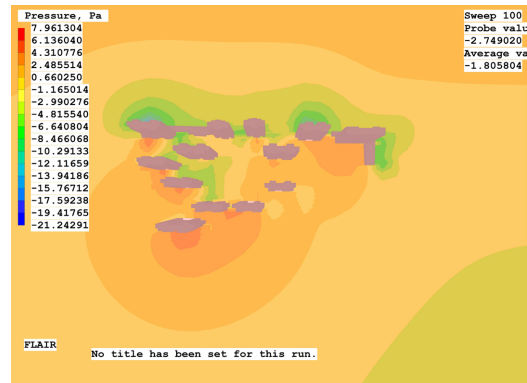
天江格调 - 风速



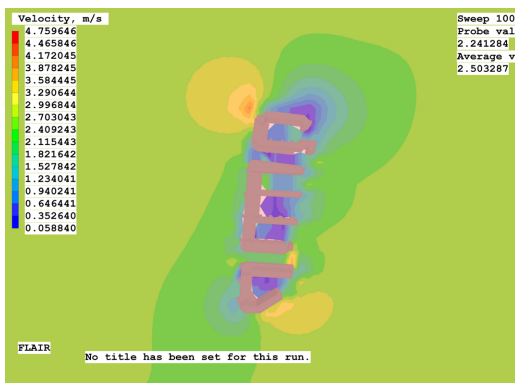
天江格调 - 风压



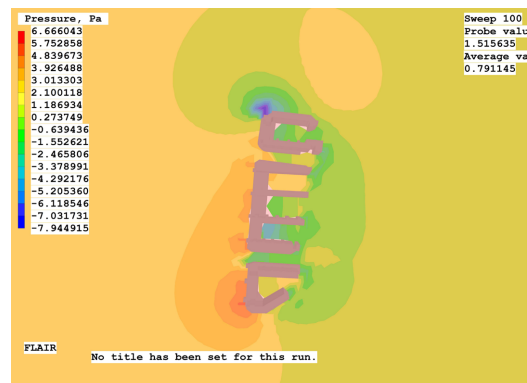
壹街区静德 - 风速



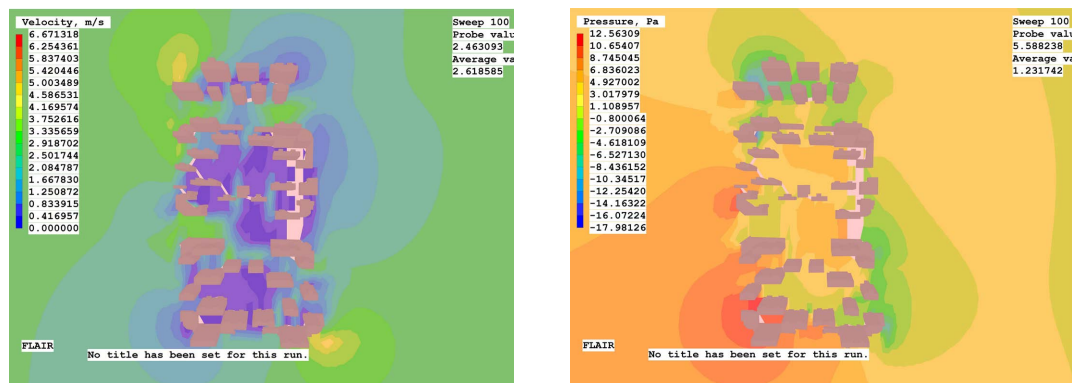
壹街区静德 - 风压



新文化花园 - 风速



新文化花园 - 风压



富力城 - 风速

富力城 - 风压

图片来源：笔者自绘

Figure 1. Simulation of the wind environment in each residential area

图 1. 各住区风环境模拟情况

4.1.3. 通风效率评价因子确定

住区环境因子中，可测量的环境因子包括表征物理环境特征的风速、通风面积，反映了空间对于使用者的生理适应性；可通过调研定性描述因子包括住区建筑布局形式、室外空间绿化布局、建筑密度等与建筑及外部空间相关的环境因子。

通过对七个典型住区模拟风环境所得数据分析以及相关资料的查阅，可以确定影响通风效率的评价因子包括：风速、通风截面积、建筑布局、建筑高度、拥挤度、绿化布局、绿化形式等，下面将对各项环境评价因子进行定义和具体解析：

1) 物理环境因子

物理环境因子包括风速、通风截面积、通风面积。风速指在住区内部测得的风力数值，单位为 m/s，通风截面积指风通过某一空间时，与该空间某一面相切的面积，单位为 m²，通风面积为： $Q = v \times S$ ，式中 Q 为风量单位 m³/h， v 为风速， S 为通风截面积。

2) 建筑布局

建筑围合所形成空间的封闭或开敞程度，主要取决于建筑围合方式，常见的建筑布局方式有围合式、行列式、点群式、混合式，可以描述所处室外空间的尺寸与四周建筑布局之间的关系。在住区实际环境中，居民视野前方一般有多个建筑物，建筑物因布局不同会在视野中形成不同频率的建筑界面，因而会形成不同的通风界面，进而影响通风效率。

3) 建筑高度

这里的建筑高度指居民所处住区内建筑单体的普遍高度，不同的建筑高度会形成不同程度上的通风阻碍，从而影响通风效率。相应的建筑高度评价尺度确定为住区层数类型，低层居住区、多层居住区(4~6层)、中高层居住区(6层以上)。

4) 拥挤度

空间是否拥挤与周边建筑的建筑间距、形成的空间规模、空间性质、绿化量、使用者人数等因素有关，较为开敞的空间其风速、通风截面较大，空间流通性强，因此拥挤度是影响通风效率的一个重要因子，它的改变标准主要取决于建筑间的间距。

5) 绿化的布局

绿化布局的位置也是影响通风效率极其重要的一个因子，迎风面放置较矮的灌木，背风处培育较高的乔木，可最大程度上保证空气流通的顺畅程度，便于提高通风效率，提高空气质量。

6) 绿化形式

绿化形式指植物的种类及搭配种植方式，一般来说，同一住区中的室外空间

采用的配置方式较为一致，主要包括以乔木为主、乔木 + 草地、乔木 + 灌木、混合式四种。不同的绿化形式，也会直接性的影响建筑间的通风截面，从而影响通风效率。

4.2. 大气污染程度研究

4.2.1. 大气污染程度采样分析

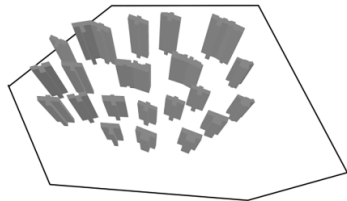
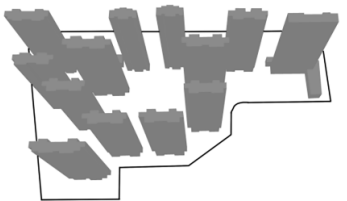
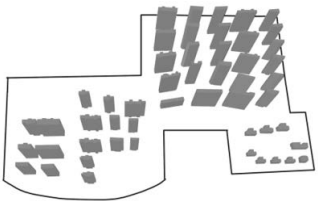
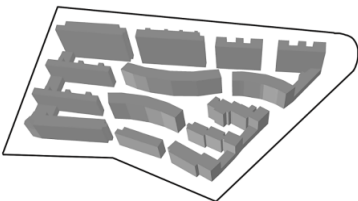
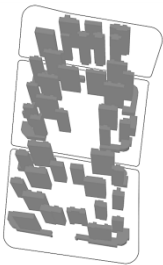
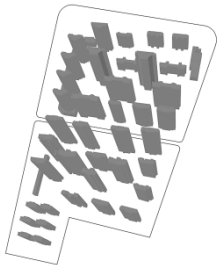
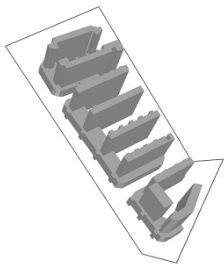
本文通过对影响空气污染的主要成分选取，针对上文选取的天津典型住区，对大气污染程度采样做前期准备。

1) 大气污染采样范围确定

本文大气污染的研究对象主要是颗粒物、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物等成分。由于不同住区形态各异导致住区内部流场的不同，从而影响住区内部污染物分布的情况。

本文通过对这七个典型住区的风—污染环境分析模拟。住区形态包括行列式、围合式、点群式、组团式等多种模式，具体模式如下表 1 所示。

Table 1. Typical residential pattern table
表 1. 典型住区模式表

		
<p>远洋天地 错落行列式</p>	<p>壹街区静德 点式 + 行列式</p>	
		
<p>时代奥城 正行列式</p>	<p>天江格调 曲行列式+半围合式</p>	
		
<p>富力城 组团式 + 点式</p>	<p>阳光星期八 点式 + 半围合式</p>	<p>新文化花园 半围合式</p>

资料来源：笔者自绘。

2) 测量因子的确定

空气污染受到多种因子共同作用影响，其中主要的空气污染物为颗粒物 PM2.5 为空气悬浮颗粒物。通过测量住区内各位置的 PM2.5 浓度，得出现有住区风环境对大气污染扩散的有效程度。同时，PM2.5 的扩散受温度与风速影响较大，当温度与风速较高时，大气对流运动加强，PM2.5 的扩散增大，PM2.5 浓度降低。研究住区的形态对风环境的影响，从而改善住区内微环境，提高住区内大气承污能力，改善居民生活。

4.2.2. 承污韧性评价体系确定

本文评价体系主要以空气质量指数与国家规定的污染物浓度作为标准和依据，参考空气污染物浓度限值指标。

1) 大气污染布置点设置说明

由于住区污染源分布相对均匀，本文采用网格布点法，将住区分成大小相同的网格，采用点设置在两条直线的交点或方格的中心，作为测量点进行模拟分析。

2) 承污韧性评价体系确定

① 空气质量指数评价体系

空气质量指数(AQI)是一种反映和评价空气质量的方法，将常规检测气体颗粒物(PM2.5、PM10)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(NO₂)、臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)六项空气污染的空气污染物浓度通过计算得到空气质量分数(IAQI)，并取污染物最高的数值作为该地区空气质量数 AQI。为直观表示空气质量与空气污染程度，将空气质量指数通过数值等级划分为六级，如表 2。

通过天津市生态环境检测中心发布的信息查询天津市管辖区的空气污染指数，并且空气质量数评价体系将空气污染物浓度与人的健康舒适度结合，可以有效指导居民生活行为。

Table 2. Air pollution index scale
表 2. 空气污染指数等级表

空气质量指数	空气质量指数级别	空气质量指数表示颜色		对健康的影响	建议采取的措施
0~50	I	优	绿色	空气重量令人满意，基本无空气污染	各类人群可正常活动
51~100	II	良	黄色	空气质量可以接受，某些污染物对极少数敏感人群健康有较弱影响。	极少数敏感人群应减少户外活动。
101~150	III	轻度污染	橙色	易感人群有症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状。	老人、儿童、呼吸系统等疾病患者减少时间、高强度的户外活动
151~200	IV	中度污染	红色	进一步加剧易感人群症状，会对健康人群的呼吸系统有影响	儿童、老人、呼吸系统等疾病患者及一般人群减少户外活动
201~300	V	重度污染	紫红色	心脏病和肺病患者症状加剧运动耐受力降低，健康人群出现症状	儿童、老人、呼吸系统等疾病患者及一般人群停止或减少户外活动
>300	VI	严重污染	褐红色	健康人群运动耐受力降低，有明显强烈症状，可导致疾病。	儿童、老人、呼吸系统等疾病患者及一般人群停止户外活动

资料来源：文献参考[1]。

② 承污韧性评价标准的确定

参照 IAQI 评价指标, 综合空气质量指数(AQI)评价体系, 参考居住区空气污染物浓度限制指标, 基于居住区的空气污染等级分区标准作为评价标准, 如表 3。

Table 3. Air pollution grade standards and zoning in this paper

表 3. 本文空气污染等级标准及分区

污染物项目	单位	平均时间	空气质量优秀区浓度标准	空气质量良好区浓度标准	空气质量过渡区浓度标准	轻度污染区浓度标准	中度污染区浓度标准	重度污染区浓度标准	严重污染区浓度标准
CO	mg/m ³		0~5	5~10	10~20	20~35	35~60	60~90	>90
SO ₂		1 小时平均	0~150	150~300	300~500	500~650	650~800	800~1600	>1600
NO ₂			0~100	100~200	200~400	400~700	700~1200	1200~2340	>2340
O ₃	μg/m ³		0~50	50~100	100~200	200~300	300~400	400~800	>800
PM2.5		24 小时平均	0~15	15~30	30~75	75~115	115~150	150~250	>250
PM10			0~25	25~50	50~150	150~250	250~350	350~420	>420

资料来源: 文献参考[1]。

③ 根据国内外空气污染物浓度的浓度限值, 综合各地区与组织的浓度标准, 提出本文居住区空气污染物浓度限值指标, 如表 4。

Table 4. The pollutant concentration limit standard is in this paper

表 4. 本文污染物浓度限值标准

污染物项目	平均时间	浓度限值	单位
PM2.5	24 小时平均	30	μg/m ³
PM10		50	
CO	1 小时平均	10	mg/m ³
SO ₂		300	μg/m ³
NO ₂		200	
O ₃		100	

3) 承污韧性与高密度住区规划设计的关系

分析住区形态对风环境和空气质量的共同影响得知, 住区形态不同导致住区内部风环境形成差异, 从而影响住区内空气污染物的扩散。通过合理布局住区形态, 改善住区内部风环境情况, 从而增加住区空气污染扩散程度, 改善住区内部整体空气环境。

5. 结果及分析

高密度住区的通风效率及承污韧性会受到空间布局、建筑密度、开放尺度等方面的影响, 不同方面要素对于“风-污”环境的作用效果也不尽相同。实测结果分析, 首先以风速、风压、空气龄作为衡量住区风阻系数的指标, 描述性统计分析各形态风阻系数数值分布情况及其产生原因; 其次, 统计各空间形态下“风-污”模拟情况; 之后基于模拟结果进行比分析, 剖析基于空间形态的作用机理; 最后, 应用相关性分析, 检验所有形态模拟的风阻系数与其影响因子之间的相关显著性和相关性水平。

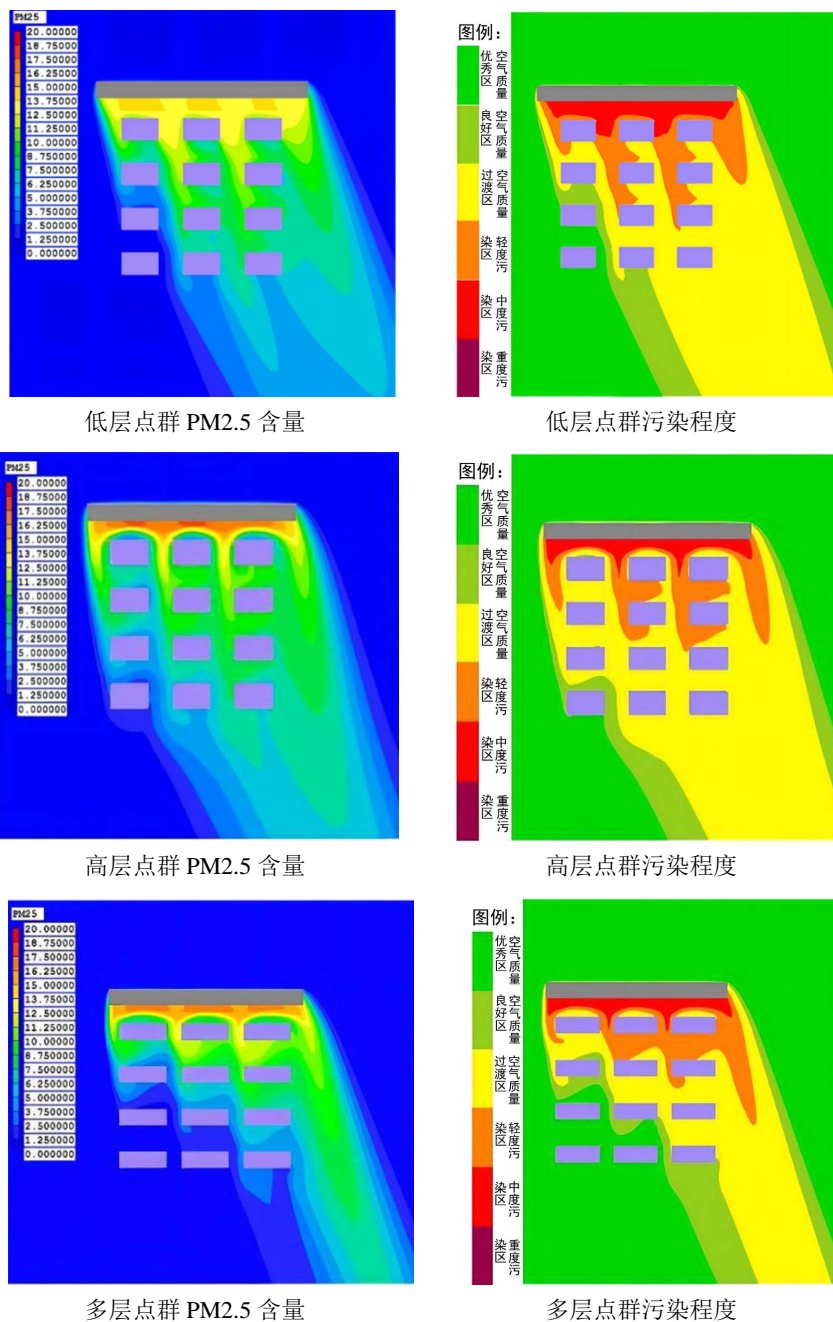
5.1. “风 - 污” 环境 “模拟试验数据库” 分析

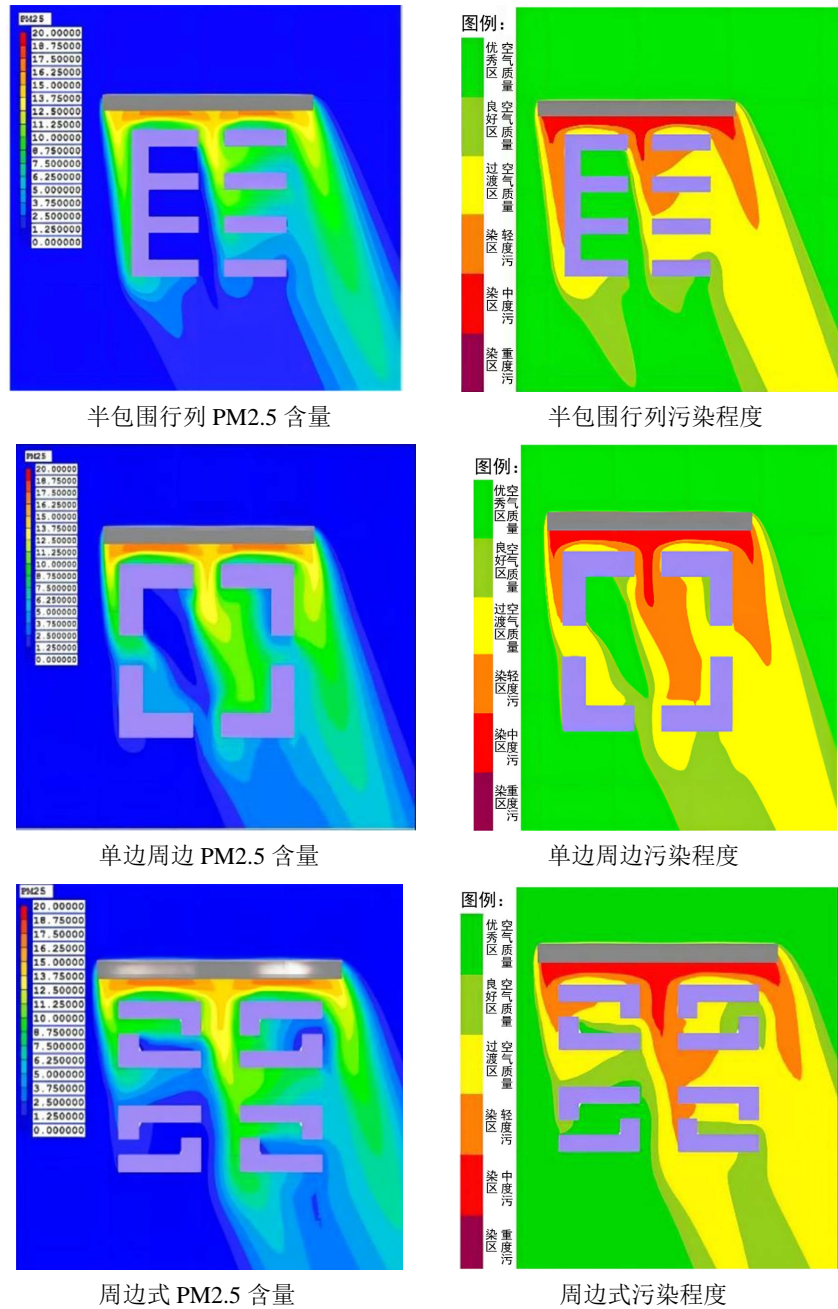
天津地处寒冷地区，为充分还原现有建筑布局模式、了解居住建筑的微气候环境，研究将 20 个实验模块归纳为地块尺寸为 150 m × 170 m 的居住组团，并抽象为多层、高层、点板结合的三种模块[2]。

建筑尺度方面，多层建筑设定为 6 层，高度为 20 m，高层建筑高度为 60 m [2]。

以偏南向为最佳朝向，日照间距，多层建筑前后日照间距按照天津市的日照间距 1.61 h 设定，高层点式建筑间距为前排建筑面宽的 1.2 倍。侧向间距满足各防火规范[2]。

归纳总结出低层点群、高层点群、多层行列、半包围行列、单边周边、周边式 6 种典型布局模块，并分析其风环境、污染环境排布情况，如下图 2 所示。





图片来源：文献参考[3]。

Figure 2. Typical module pollution and environmental arrangement situation
图 2. 典型模块污染环境排布情况

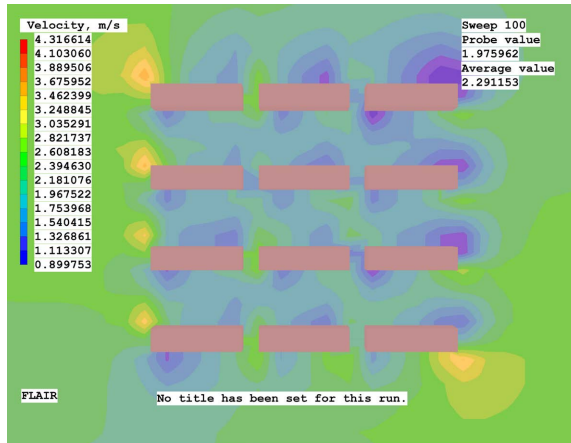
① 平行、斜截形式的行列式和点群式的结构易形成通风廊道，“狭管通风”长形建筑之间 PM2.5 含量相对较低、污染程度降低。

② 周边式、半包围式的结构由于有建筑界面阻挡，不易形成贯穿风而易于形成“角隅风”，会造成 PM2.5 滞留，污染程度较高的现象。

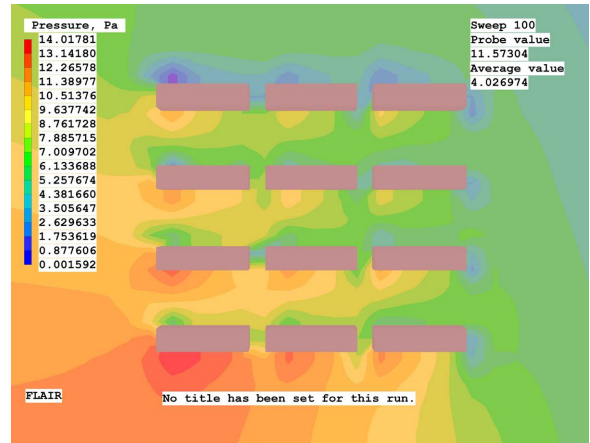
可见，住区空间布局形式通过影响 PM2.5 含量、周边污染程度、风阻系数来改变通风效率与承污韧性，通风效率与承污韧性与住区空间形态的相关性较为明显。

5.2. 各空间形态“风-污”模拟对比分析

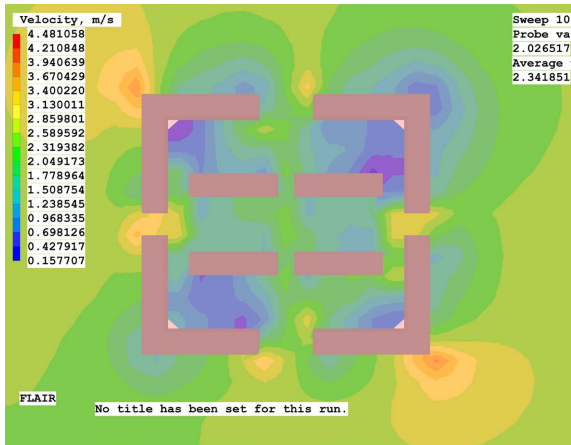
运用风速风压等指标, 归纳总结出行列式、围合式 2 种不同空间形态下, 风阻系数指标的大小。采用单一变量的方法, 通过对每一项形态因子影响住区风环境的分布情况的具体机制进行比横向对分析, 得出适应性结论, 如下图 3 所示。



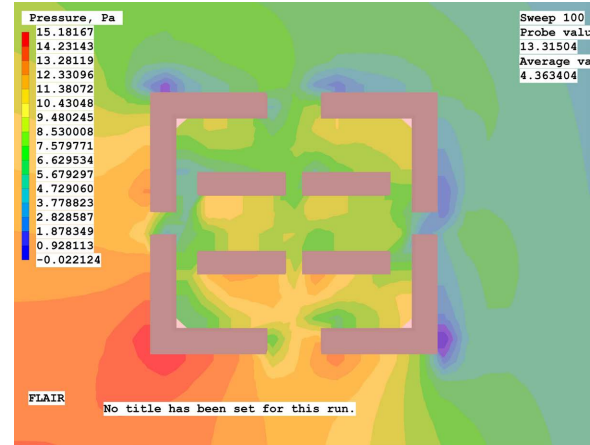
行列式(中心聚集)风速



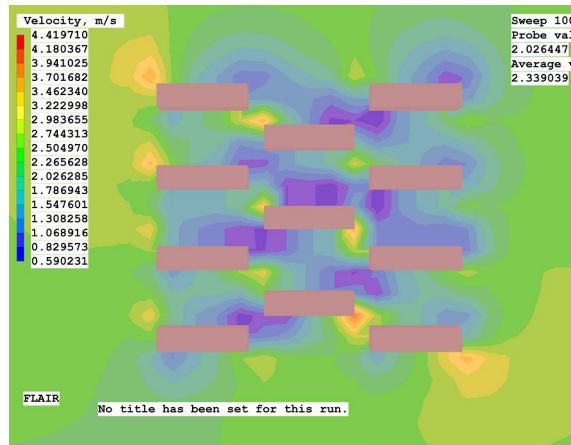
行列式(中心聚集)风压



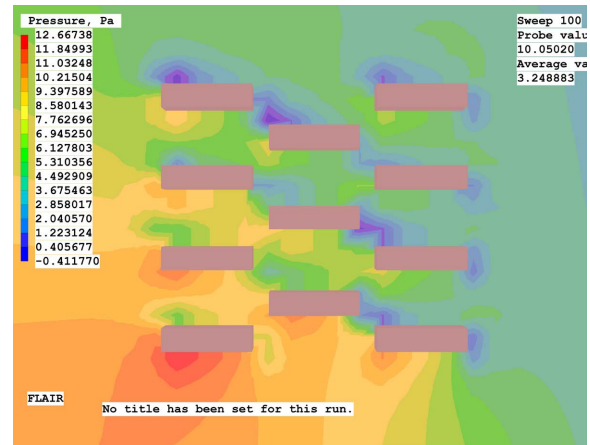
围合式(中心聚集)风速



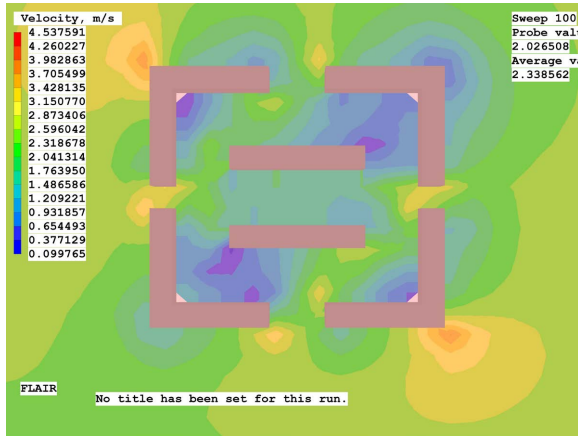
围合式(中心聚集)风压



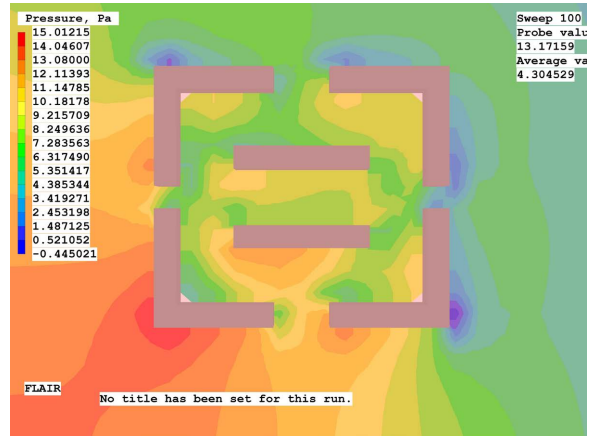
行列式(开放率高)风速



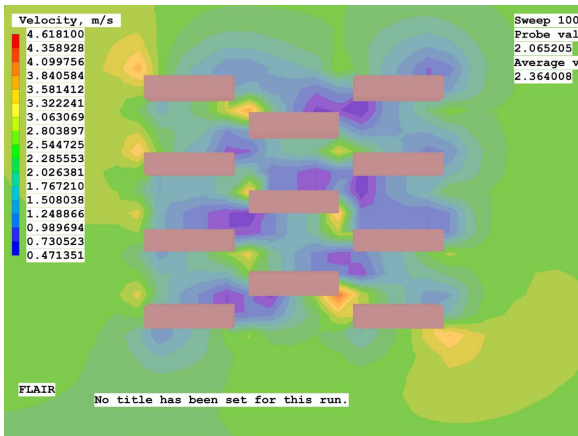
行列式(开放率高)风压



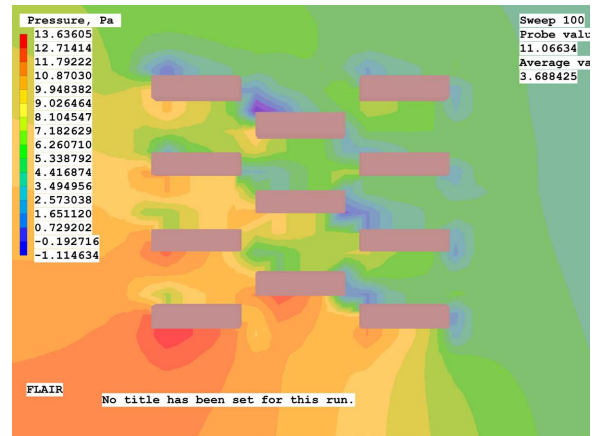
围合式(开放率高)风速



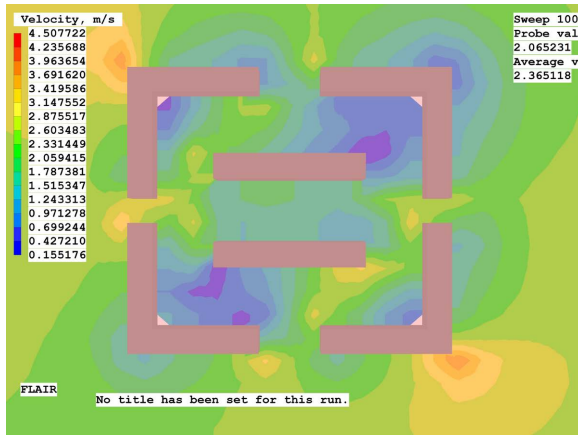
围合式(开放率高)风压



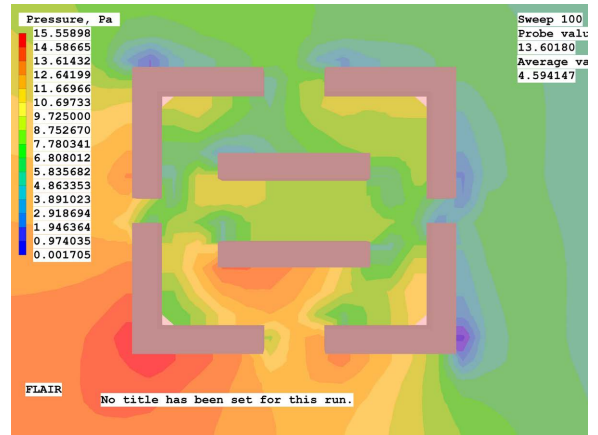
行列式(中部较高)风速



行列式(中部较高)风压



围合式(中部较高)风速



围合式(中部较高)风压

图片来源：作者自绘

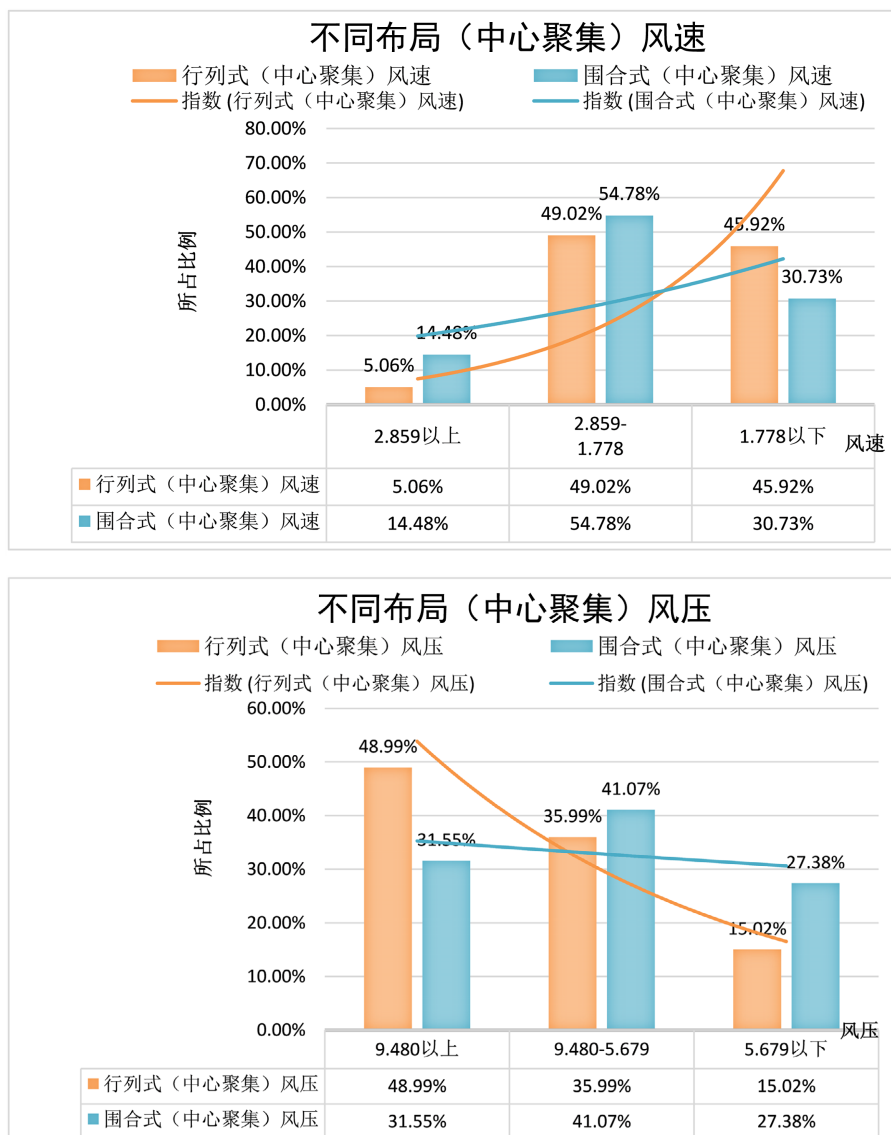
Figure 3. Horizontal comparison of the downwind environment between the two forms

图 3. 两种形态下风环境横向对比

1) 建筑中心聚集度

实地调研中可以发现，住区内部中心不同的聚集程度是影响该住区风环境和承污韧性的一个重要因

素。住区中心的聚集程度取决于以下三个方面：中心绿地的设置和排布，有无底商的围合，靠近住区中心位置是否有建筑，如下图 4 所示。



图片来源：作者自绘

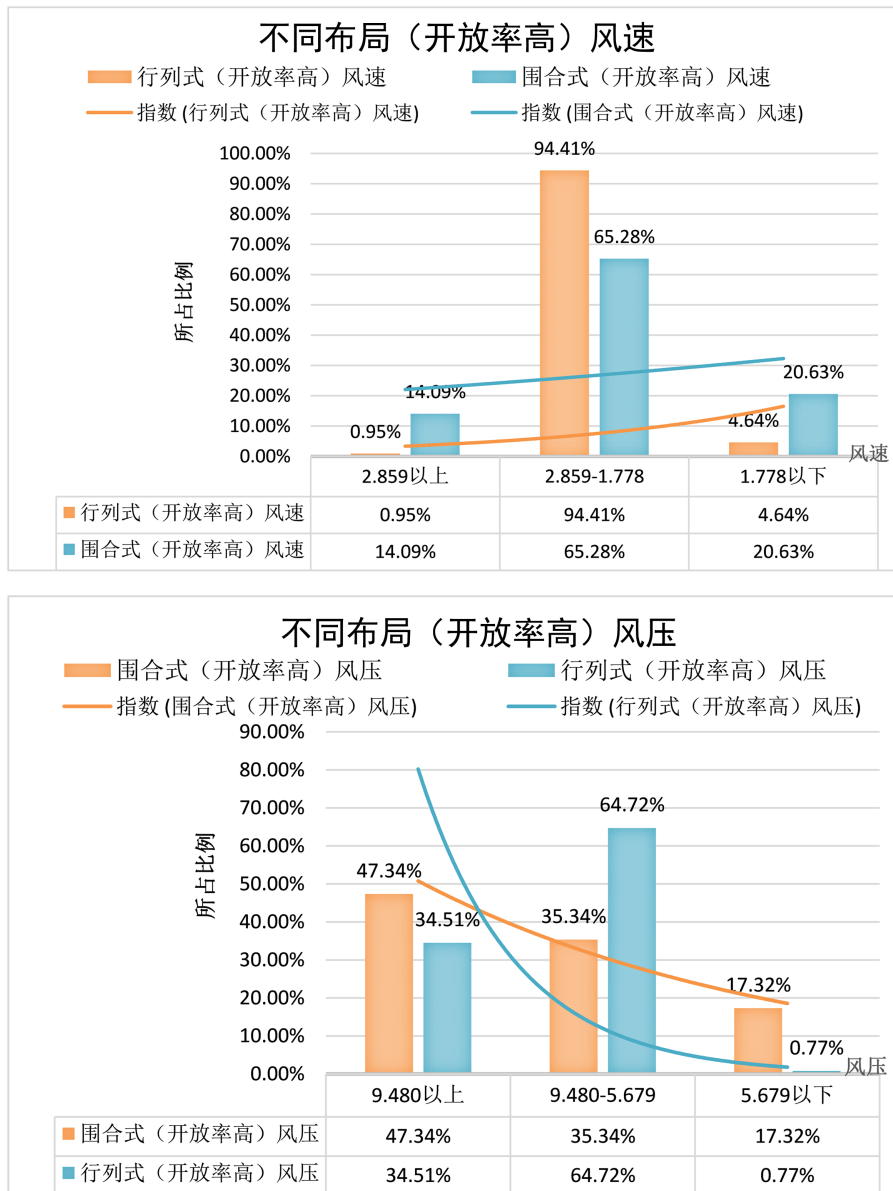
Figure 4. Different layouts (center gathering) wind speed, wind pressure

图 4. 不同布局(中心聚集)风速、风压

- ① 中心聚集导致建筑界面的挡风作用增强，下风侧建筑之间的风速明显降低，日风速波动性增大。
- ② 中心聚集导致建筑界面错位，从而形成的风速带贯穿的情况及占比会明显下降，“贯穿风”不易形成，静风面积较大，涡流较多，空气污染物滞留，不利于春冬雾霾的驱散。

2) 建筑密度与开放空间率

在住区模型中，建筑密度、开放空间率的变化会带来住区反射面总长度的变化，下面将对建筑密度和开放空间率进行变化，其他形态因子数值相同的住区模型进行对比分析，观察建筑密度与开放空间率对住区风环境的影响规律，如下图 5 所示。



图片来源：作者自绘

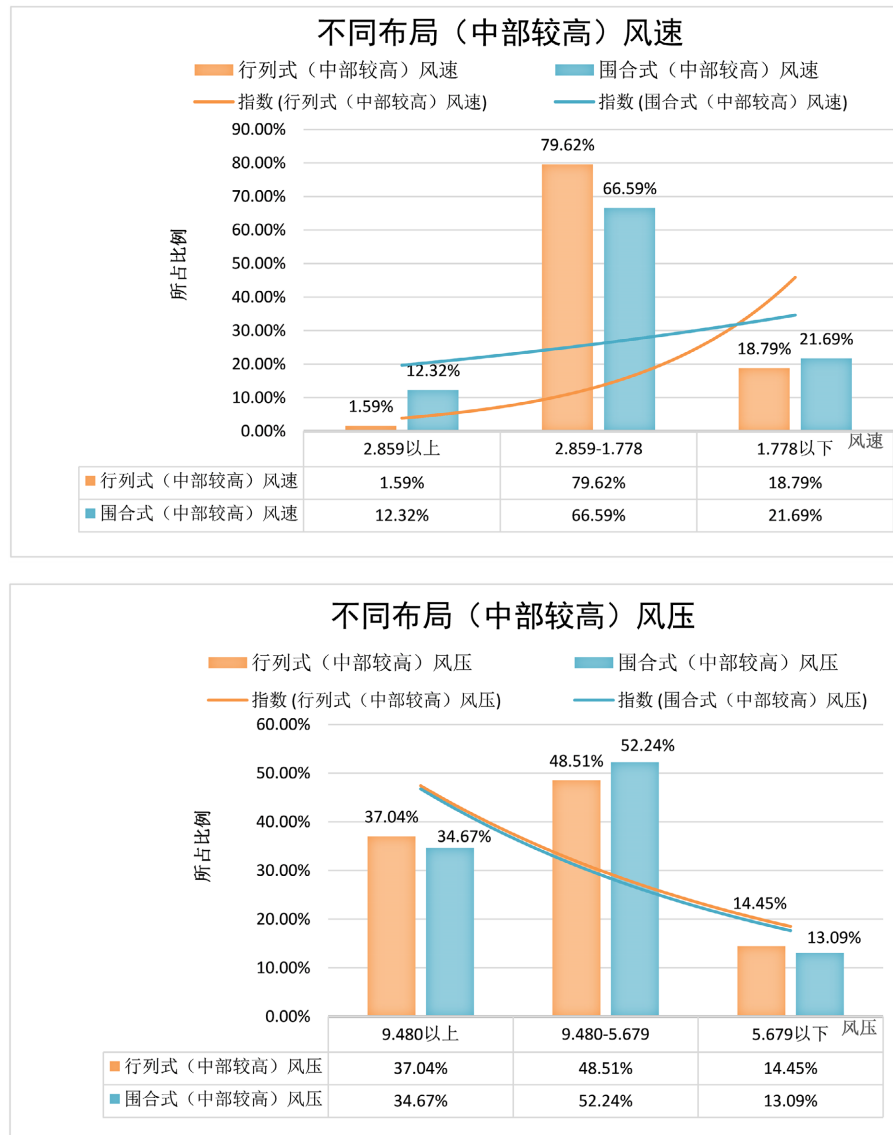
Figure 5. Different layouts (high open rate) wind speed, wind pressure
图 5. 不同布局(开放率高)风速、风压

① 开放率高易于形成通风廊道，下风侧建筑之间的风速明显增大，日风速波动性减小，使适宜风速、适宜风压下模块的通风效率较为稳定。

② 提高建筑开放程度会使住区内部气流畅通，风速均匀，风速带贯穿，风的舒适性有较大提升。阻风作用减小、滞留区面积减小，污染排出更为便捷。

3) 建筑高度

在住区模型中，住区内建筑不同的高度变化会影响通风截面的大小进而影响到该住区通风效率，下面将对建筑高度进行变化，其他形态因子数值相同的住区模型进行对比分析，观察建筑高度对住区风环境的影响规律，如下图 6 所示。



图片来源：作者自绘

Figure 6. Different layouts (high in the middle) have wind speed and wind pressure
图 6. 不同布局(中部较高)风速、风压

- ① 高风速区与低风速区间间隔界限不明显，导致风速波动大，通风效率较低。
- ② 中心存在较高建筑的遮挡，局部形成空腔区，形成“空腔区”，住区内部风环境的舒适性不佳，风阻系数增加，存在挡风现象，污染存在较大滞留面积。

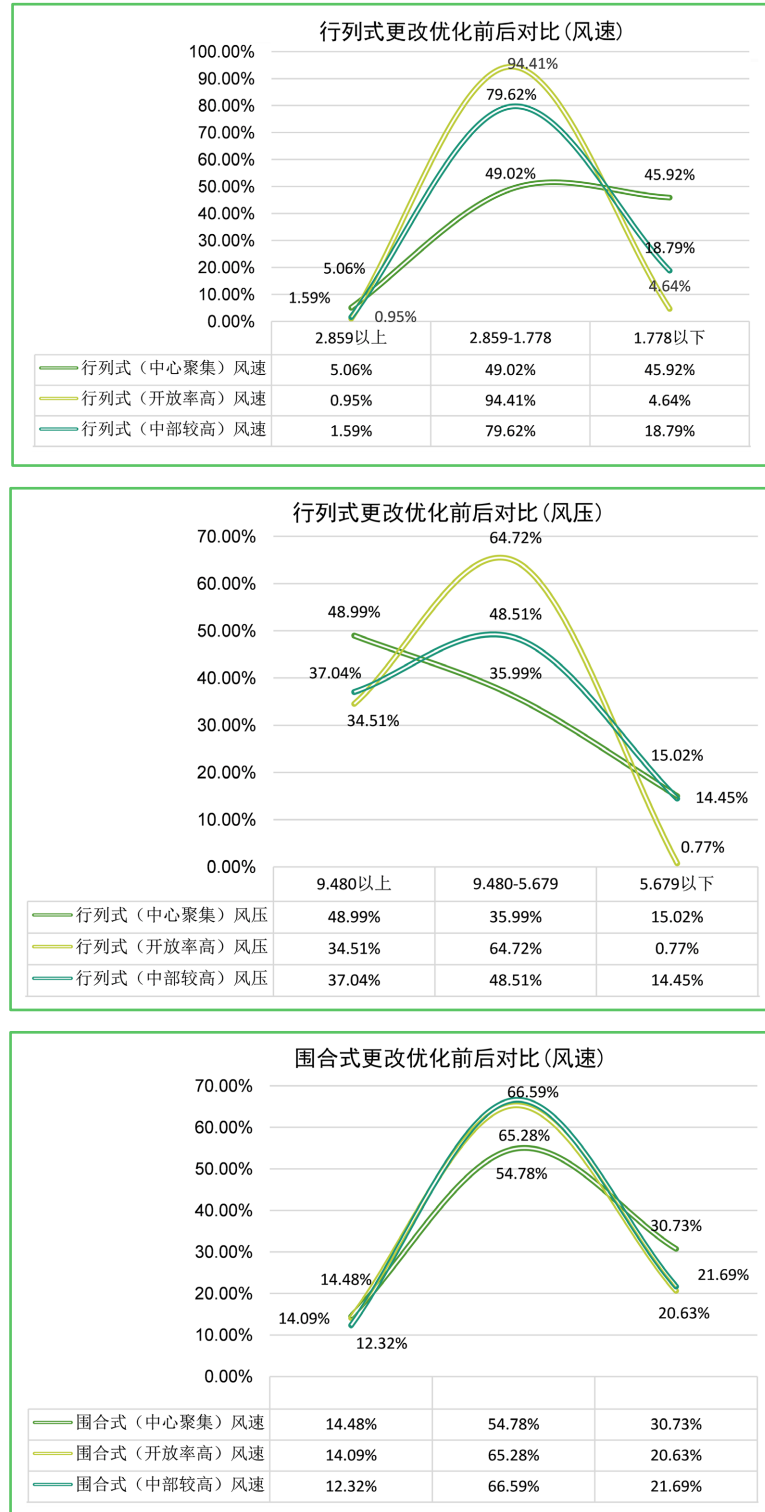
5.3. 高密度住区空间形态与“风-污”环境作用机理

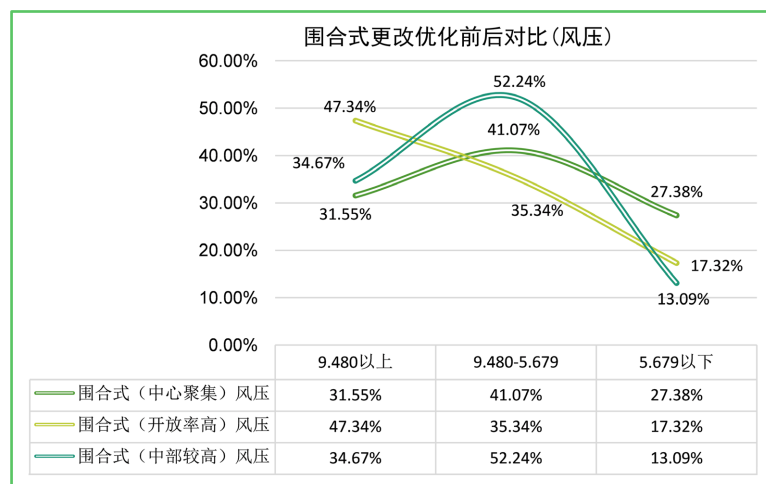
居住区的建筑形态不同会导致居住区内部出现不适宜居住的弱风区和强风区，从而导致居住区域的静风面积、涡流数值、风阻系数改变，居住区的空间形态通过影响局部风环境，进而影响居住区空气污染物的扩散情况。

因此在规划设计时，需要统筹街区风环境与污染物扩散情况，调整空间形态，改善住区承污韧性，从而改善住区内部空气环境。

5.4. “风 - 污”环境及其影响因素之间的相关性分析

根据各模型不同空间形态的变化可以看出，影响通风效率的因素包括：中心聚集度、建筑密度与开放空间率、建筑高度总结如下：如下图 7 所示。





图片来源：作者自绘

Figure 7. Comparison before and after each of the two morphological changes
图 7. 两种形态更改前后对比

- 1) 住区内中心聚集度越高，通风效率越低，大致呈负相关。
- 2) 建筑密度越低、开放空间率越高，继而通风效率越高，两者呈正相关。
- 3) 建筑高度越高，通风效率越低，两者亦呈负相关。

6. 结论

提升居住区通风效率是缓解居住区污染、改善气候宜居性的重要切入点。本项目以天津市高密度典型住区为研究对象，运用 CFD 模拟与数理分析，探索多层行列式、多层围合式、多层与高层混合式等典型高密度住区模式的风-污环境时空分布特征，探索冬季、夏季不同情境下不同组合模块的通风效率、承污耐受度与建筑布局形态的耦合规律，提出通过优化高密度住区布局形态提升效率和承污韧性的设计策略，尽管上述的居住建筑模块来自于天津，但其中不少类型在我国大部分地区均有使用，因此，可以结合不同的地区特点，依据所总结的设计策略，优选不同的布局模式，为不同地区优化风环境和承污韧性的建筑布局提供一定的参考依据。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目资助，项目编号：202010792001。

参考文献

- [1] 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2012, 22(1): 44.
- [2] 曾穗平, 田健, 曾坚. 基于 CFD 模拟的典型住区模块通风效率与优化布局研究[J]. 建筑学报, 2019(2): 24-30.
- [3] 崔洋. 基于街区通风与空气污染防控的居住区空间优化研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.