



南方建筑

South Architecture

ISSN 1000-0232, CN 44-1263/TU

## 《南方建筑》网络首发论文

题目：通风节能视角中多尺度的风环境评估方法研究——以深圳前海中心区为例  
作者：陈日飙，陈竹，尹名强，胡纹，何宝杰  
网络首发日期：2023-01-11  
引用格式：陈日飙，陈竹，尹名强，胡纹，何宝杰. 通风节能视角中多尺度的风环境评估方法研究——以深圳前海中心区为例[J/OL]. 南方建筑.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//44.1263.TU.20230110.1358.005.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 通风节能视角中多尺度的风环境评估方法研究——以深圳后海中心区为例\*

Multi-scale Wind Environment Assessment Method Research from the Perspective of Ventilation and Energy Saving Objectives: A Case Study of Houhai Central District in Shenzhen

陈日飙<sup>1</sup> 陈竹<sup>2\*</sup> 尹名强<sup>3</sup> 胡纹<sup>4</sup> 何宝杰<sup>5</sup>

CHEN Ri-biao, CHEN Zhu, YIN Ming-Qiang, HU Wen, HE Bao-jie



开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

**本文引用格式：**陈日飙，陈竹，尹名强，等. 通风节能视角中多尺度的风环境评估方法研究——以深圳后海中心区为例[J]. 南方建筑.

**短摘要：**完善风环境评估方法和技术路线的多元性和科学性，为实现城市低碳节能目标、促进气候适应性规划设计提供基础补充。以深圳后海中心区为实证对象，在“双循环”+“多尺度”嵌套的风环境评估技术路线下，构建基于“城市形态及通风节能”的双循环评估体系。研究得出用地属性对局地气候的敏感性差异，水域用地是最低影响的下垫面形式；日间工况与全天盛行风况存在显著区别，典型时段的风速风向表现凸出；研究显示4月是通风节能潜力最大的月份，可以降低能耗52.73%。多尺度的风环境评估方法可以突破原有单一侧边界条件的限制，从“城市形态及通风节能”两个角度，融合局地气候风环境边界条件，有利于完善规划设计阶段方案评估过程，提高设计方案效益，推动规划设计发展。

**长摘要：**城市气候的形成和发展与城市建设紧密相关，高密度的城市建设削弱了城市内部的流动风场，形成了典型的城市静风特征。既有研究证明有效的自然通风有利于提升人居品质，实现气候适应性规划设计和低碳节能目标。但是风环境与城市形态的关联性研究在评估技术路线上存在工程化、表面化，局地气候关注不足、城市风环境边界乱用的问题。以深圳后海中心区为研究对象，将风环境评估作为城市规划与设计的中期环节，在“双循环”+“多尺度”嵌套的风环境评估技术路线下，构建基于“城市形态及通风节能”的双循环评估体系，强化典型时段“通风节能”的局地气候边界条件。后海中心区作为城市商务区，带有明显的日间工作属性，利用建筑形态数据、欧洲气象中心（ECMWF）气象数据、深圳气象站数据，进行多尺度的嵌套研究，基于ECMWF数据和气象站数据，驱动WRF模型进行后海中心区的精细化风场模拟，得到后海中心区的盛行风况以及城市用地的气候敏感性差异结果；建立后海中心区的计算流体力学（CFD）模型，提取WRF模式对后海中心区的高精度数值模拟结果，作为CFD模型的初始风场条件，实现WRF模式与CFD方法之间的数据传递，完成嵌套运算；基于局地气候舒适度因子筛选深圳适宜通风的自然月份，从通风量和能耗两个角度进行城市通风潜力节能减排研究，量化研究区域在7个不同月份的通风量。并通过研究后海中心区的舒适度月份中，每平方米的建筑能耗表征下城市自然通风对于节能的影响。分别从风速、风速比、涡流静风区以数值化、可视化的特征直观地展示出后海中心区城市形态中存在的风环境问题。研究结果表明：用地属性是影响城市风环境的重要要素。水域用地最有利于改善城市风环境，适当增加蓝绿基础设施尤其是水域面积可以积极改善城市的风环境，这一点在后海中心区中表现得尤为明显；在深圳后海片区，日间工况与全天盛行风况差异较大。除全天盛行风向的气象工况以外，城市风环境评估应根据分析地段的功能定位于用地性质，从性能角度探讨日间（8:00-20:00）的城市风环境状况，反映风环境的实际使用效能；在深圳，通风节能潜力主要集中于1、2、3、4、10、11、12月份。在4月，城市通风量最大、通风节能潜力最大，达到52.73%。但是研究也存在一定不足，尤其是在南方地区，需要在风环境的分析中综合考虑温度与湿度。气象观测

站地域分配不均和建站时间的长短有限也会影响本次研究的准确性和真实性。

**关键词:** 城市形态; 通风节能; 风环境评估; 多尺度

**ABSTRACT:** The formation and development of urban climate is closely related to urban construction. High-density urban construction has weakened the flowing wind field within the city, creating a typical urban static wind characteristic. The existing studies have proven that effective natural ventilation is conducive to enhancing the quality of human habitation, promoting climate adaptive planning and design, and achieving low carbon energy saving goals. However, research on the correlation between wind environment and urban morphology suffers from engineering and superficiality in the assessment of technical routes, insufficient attention to local climate, and indiscriminate use of urban wind environment boundaries. This paper takes the Houhaicentral area of Shenzhen as the study area and takes wind environment assessment as a mid-term part of urban planning and design. Under the technical route of "double cycle" + "multi-scale" nested wind environment assessment, a double cycle assessment system based on "urban morphology, ventilation, and energy saving" is constructed to strengthen the local climate boundary conditions for "ventilation and energy saving" at typical times. As an urban business district with obvious daytime work attributes, a multi-scale nested study was conducted using building morphology data, ECMWF meteorological data, and Shenzhen observation station data to drive the WRF model for refined wind field simulation in the central area of Houhai. The WRF model is used as the initial wind field condition for the CFD model, completing the nested operations. The study was carried out to quantify the ventilation capacity of the study area in seven different months. The impact of natural urban ventilation on energy saving is also characterized by the energy consumption per square meter of building in the centralHouhai area during the comfort months. The wind speed, wind speed ratio, and static wind zone are visualized in numerical and visual features to demonstrate the wind environment of the HouhaiCentral Area respectively. The results show that site attributes are an important element influencing the urban wind environment. Land use is most conducive to improving the urban wind environment, and an appropriate increase in blue-green infrastructure, especially water. There is a large difference between daytime work and all-day prevailing wind conditions. In addition to the meteorological conditions of prevailing wind direction throughout the day, the assessment of urban wind environment should be based on the functional position. The urban wind environment conditions during the daytime (8:00-20:00) should be explored from a performance perspective, reflecting the actual use effectiveness of the wind environment. In Shenzhen, the ventilation energy-saving potential is mainly concentrated in January, February, March, April, October, November, and December. In April, urban ventilation capacity is the largest, and potential energy efficiency is the most effective by 52.73%. However, the study also has certain shortcomings, especially in the southern cities, where temperature and humidity need to be considered in the wind environment analysis. The uneven geographical distribution of observation stations and the limited duration of their establishment may also affect the accuracy and authenticity of this study.

**KEY WORDS:** Urban Morphology; Ventilation and Energy Saving; Wind Environment Assessment; Multiscale

**\*基金项目:** 中建股份科技资助 (CSCEC-2018-Z-14): 全生命周期超高层建筑成套技术研究 (一)

**作者简介:** <sup>1</sup>正高级工程师; <sup>2</sup>正高级工程师, 通信作者, 电子邮箱: 609078945@qq.com; <sup>1&2</sup>香港华艺设计顾问(深圳)有限公司; <sup>3</sup>博士; <sup>4</sup>教授; <sup>5</sup>教授; <sup>3&4&5</sup>重庆大学建筑城规学院

## 1 引言

随着近些年全球范围内寒潮、酷暑、飓风、洪水以及森林大火等极端天气和自然灾害的频繁发生，叠加疫情冲击，有关人类生存安全、生命健康和可持续发展的问题受到了更多的关注。其中，应对气候变化已成为关键议题。风是气候的关键要素，但是在诸多气候要素中，人们对风环境的变化并不敏感。城乡规划作为分配地面空间资源的主要手段，必然影响城市的风环境乃至城市气候环境<sup>[1-2]</sup>。

高密度的城市建设行为，削弱了城市的内部流动风场，进而致使风环境每况愈下；人工地表取代了自然地形，城市三维空间形态进而变得层次多样。香港从 2003 年开始进行城市空气流通的评估研究，并基于研究成果出台了改善建筑地块的通风设计导则<sup>[3-4]</sup>。有效的自然通风被认为是改善城市热岛（UHI）、提升空气质量和人体舒适度的重要举措之一。20 世纪 70 年代开始，Davenport、Isyumov、Hunt、Lawson、Penwarden、Melbourne 等学者先后围绕特定风场人行高度的风安全阈值进行研究，但也仅是针对行人的机械舒适度；石邢等结合机械舒适度、安全性、风速放大效应以及行人对风环境的主观心理容忍度，提出不同场所类型和行人状态的风速评价标准<sup>[5]</sup>；《绿色建筑评价标准》（GB/T50378-2019）基于建筑视角提出风速、风速比、风压和湍流个数等室外风环境评价标准。基于目前风环境的评价标准<sup>[6]</sup>，围绕城市形态与风环境的耦合关系，城市形态参数被用来表征空气流动特征，例如：街道层面的街道高宽比、长高比等，城市层面的零位移平面、粗糙度长度、粗糙度高度、建筑覆盖率、迎风面指数和天空开阔度等<sup>[7-9]</sup>。

此外已有学者对风环境与城市空间形态的关联性展开研究，如城市整体层面的通风廊道识别<sup>[10]</sup>、街道层面的街谷风环境评估<sup>[11]</sup>、建筑层面的室外风环境评价等<sup>[12-14]</sup>。从上世纪 90 年代开始，数值模拟技术拓宽了城市风环境的研究宽度，形成了“数值模拟+实地观测”定量分析与定性分析相结合的研究方法，其中数值模拟技术包括中观尺度的天气预报模型（WRF）、微观尺度的计算流体力学（CFD）。

城市风环境的评估过程依赖于侧边界条件，但是典型条件、典型时段对局地气候风环境的内在影响机制并未明确。基于城市形态的风环境评估侧重于全年盛行风况下风环境数据的变化特征，描述城市风场受到城市形态影响的全时段无差别结果，是一种单一边界条件下的评估研究。既往城市风环境评估依托评价标准进行工程化的范式研究，忽略城市地域性，导致风环境边界乱用，局地气候分析不足。如何突破单一边界条件下传统风环境的分析方法，融合边界环境的时空特征，完善既有的风环境评估方法体系是本文的研究目的。研究选取深圳高密度开发典型地段，从“城市形态与通风节能”两个方面，深入研究动态视角下城市风环境的评估结果。

## 2 数据来源与研究案例

### 2.1 数据来源

本文数据主要包括：2018 年深圳后海片区的单体建筑数据（<https://www.udparty.com/index.php/lists/data>）、深圳国家气象站的气象数据（<https://opendata.sz.gov.cn/data/dataSet>）、欧洲预报中心气象数据（ECMWF，<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>）。除此之外，研究区内其他未建地块的建筑数据，是通过《深圳市南山后海中心区城市设计》的公示文件整理绘制。

### 2.2 区位与发展概况

深圳作为中国城市化建设进程中最为发达的典型地区之一，是粤港澳大湾区具有代表性的中心城市，地处东南沿海，隶属亚热带季风气候，夏季天气潮湿酷热。随着土地资源的日益稀缺，深圳先后采取了填海造城、高层高密度的土地集约利用建设模式。

深圳后海中心区位于南山蛇口东部，深圳湾与珠江出海口交汇处，东到沙河西路，北到滨海大道，西至后海大道，南抵东滨路，由填海造陆而成，地势平坦，地形方正（图 1）。后海作为城市的滨水生活中心，办公、商业、文化、体育、娱乐等业态高度聚集（图 2）。本次研究为减少模型的边界效应，更为科学与准确地反映研究范围内的风场变化特征，研究范围西扩一个街区，西达建南路。虽然后海中心区还未完全建成（图 3），接近 30%地块尚未有明确的权属信息，但可以根据相关城市设计资料进行空间形态建模。通过港澳海洋研究中心的海洋数据可视化平台分析可知，后海中心区的洋流状况相对较弱，处于一个相对稳定的风环境流动区域（图 4），受海洋洋流影

响较小，更有利于本文的研究。



图 1 深圳前海中心区的区位图（根据自然资源部测绘底图进行改绘）



图 2 深圳中心区的土地利用图



图 3 实证范围示意图



图 4 海洋洋流分布图（资料来源：港澳海洋研究中心）

### 2.3 气象数据分析

深圳市长夏短冬，属夏热冬暖地区，年平均气温 23.0℃。春季盛行偏东风，夏季盛行偏南风，冬季节盛行东北季风。深圳前海中心区作为商务区，带有明显日间工作属性。本次研究系统筛选深圳国家站建站以来的气象数据（2002 年 1 月—2021 年 8 月），选用工作时间即（8:00—20:00）的深圳国家基本站近 20 年的气象平均值（表 1）。

表 1 深圳全年工作时段气象数据均值一览表

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
最高气温	日间	24.03	25.84	27.38	29.35	31.63	33.4	34.89	34.85	34.5	32.39	29.52	25.91
	全天	22.3	22.5	24.8	25.2	29.2	30.2	30.7	30.3	29.5	28.3	27	21.2
最低气温	日间	7.79	8.77	11.51	15.48	20.99	23.61	24.59	24.45	23.52	19.44	13.59	8.04
	全天	7	8.2	10.5	15.1	20.5	23.4	24.3	24.2	22.9	19	13.1	7.4
风速平均值	日间	3.08	3.02	3.06	3.22	3.4	3.86	3.6	3.18	3.04	3.08	3.13	3.21
	全天	1.8	1.6	1.6	1.7	1.9	2.3	2.6	1.6	1.5	2.5	2.1	2.4
风向	日间	N	N	N	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	NNE	N
	全天	N	ENE	ENE	NE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	NNE	NNE	ENE

### 3 城市风环境的评估流程体系

风环境评估从主体类型上可以将整个流程分为：自然风环境分析、城市风环境分析、行人风环境分析<sup>[5]</sup>。整体流程如下图所示（图 5）。自然风环境强调对城市背景风场的溯源与摸底，根据气象站数据法分析平均风速和风向，使用中尺度模式叠加多层嵌套得到典型条件下的风场信息，其中运用广泛的软件是天气预报模型（WRF）。例如杜吴

鹏等通过对北京城市背景风场的分析得出城市风环境容量，进而精细化分析城市的通风廊道<sup>[15]</sup>。城市风环境强调城市空间形态对于风场的作用，计算流体力学(CFD)被广泛运用以描述空气流体在建筑单元中的运动轨迹，但由于CFD方法强烈依赖于高性能计算机，所以计算周期长、计算能力有限，更多地侧重于城市小微尺度，如建筑单体和街道空间，面对更广的空间尺度应用潜力有限<sup>[16]</sup>。CFD模拟方法受到侧边界条件的控制，即输入的风向、风速和温度，不同的边界条件计算结果不同<sup>[17]</sup>。一般情况下，边界条件的数据会选取来自气象网站的预报数据或是气象站点的实测数据，都会存在一定的数据获取局限和差异。既往风环境分析侧重城市形态对空气流动的影响，较少涉及城市风环境与节能的关系。

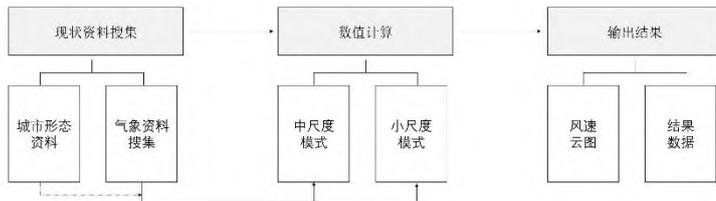


图5 风环境评估流程图

本文借鉴城市通风廊道的技术路线与分析框架<sup>[18]</sup>，突破单一尺度的分析局限，从多尺度的分析思路着手，提出多尺度风环境评估流程。风环境评估作为城市规划与设计的中期设计环节，利用建筑形态数据、欧洲气象中心ECMWF气象数据、深圳气象站数据，进行多尺度的嵌套研究，构建基于“城市形态与通风节能”的双循环评估体系。首先，基于ECMWF数据和气象站数据，驱动WRF模型进行前海中心区的精细化风场模拟，得到前海中心区的盛行风况以及城市用地的气候敏感性差异结果；其次，建立前海中心区的CFD模型，提取WRF模式对前海中心区的高精度数值模拟结果，作为CFD模型的初始风场条件，实现WRF模式与CFD方法之间的数据传递，完成嵌套运算；再次，基于舒适度因子筛选深圳适宜通风的自然月份，进行CFD风场分析，量化研究区域的通风量。并通过研究前海中心区的舒适度月份每平方米的建筑面积表征城市自然通风对于节能的影响。最后，增加城市形态因子对于城市通风潜力的评估以完善与验证基于城市形态的风环境研究（图6）。

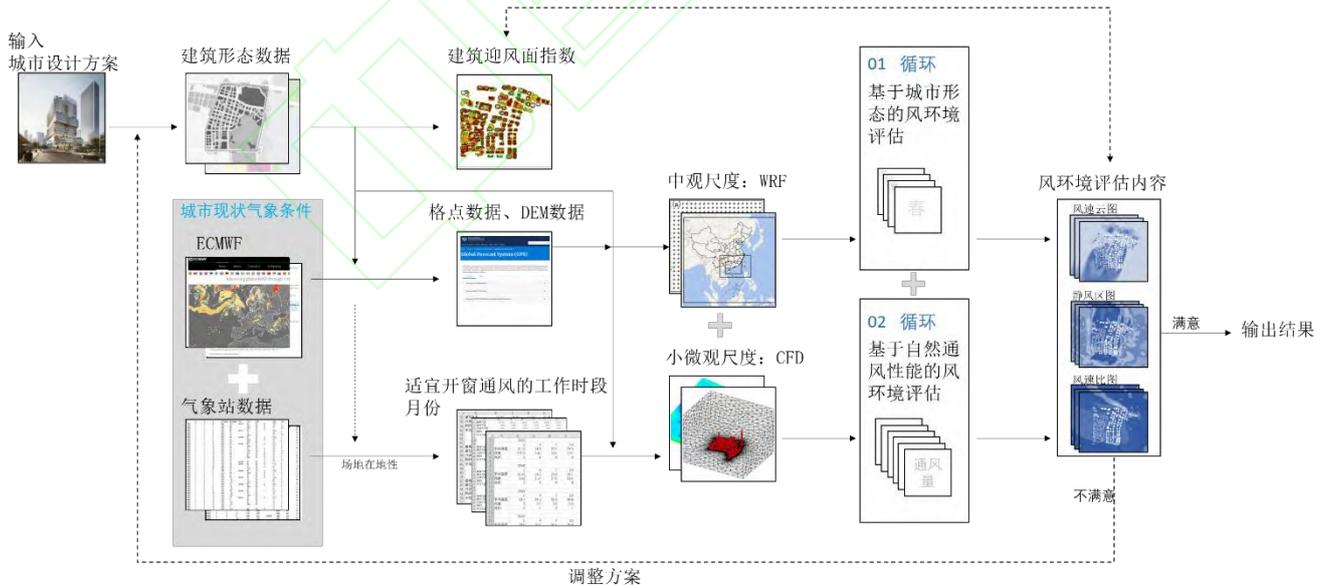


图6 风环境评估技术路线图

## 4 循环一：基于城市形态的风环境评估

### 4.1 季节性背景风场

首先利用WRF模式开展3km分辨率数值模拟，并利用广东省地面气象站数据进行资料同化得到各气象

要素背景场；然后利用微尺度模式，挑选典型气象日做动力降尺度得到项目所在地的局地风场。进行 WRF 模拟时，选用了 WRFv4.2 版本，物理参数化方案组合为：WSM6 微物理方案、RRTMG 长波和短波辐射方案、Noah 地表参数化方案、YSU 边界层参数化方案、KF 积云对流方案等。图 7 给出了 WRF 模拟时的网格嵌套分布情况，从外到内分辨率分别为 27km、9km 和 3km。最终只取 3km 分辨率网格，作为微尺度模式降尺度模拟输入数据。

由于微尺度模式积分时间较长，为节省计算量，这里基于 WRF 模式模拟结果，挑选当月典型日作为代表开展分析。具体的挑选方法为：首先根据 WRF 逐小时模拟结果计算每日近地面 u、v 风和气温的平均值，并统计其与当月多年平均气候态之间的空间相关系数，挑选相关系数较大的自然日作为典型日。经分析，最终决定分别以 2019 年 1 月 15 日（冬季）、2019 年 4 月 18 日（春季）和 2019 年 7 月 15 日（夏季）以及 2019 年 10 月 20 日（秋季）作为不同季节的典型气象日开展模拟。微尺度模式水平分辨率为 30m，垂直层次 36 层，模式顶高 2km。图 8 给出了微尺度模式模拟范围及土地利用情况。

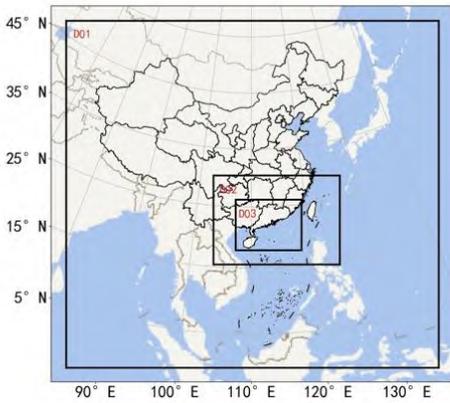


图 7 WRF 模拟网格嵌套分布

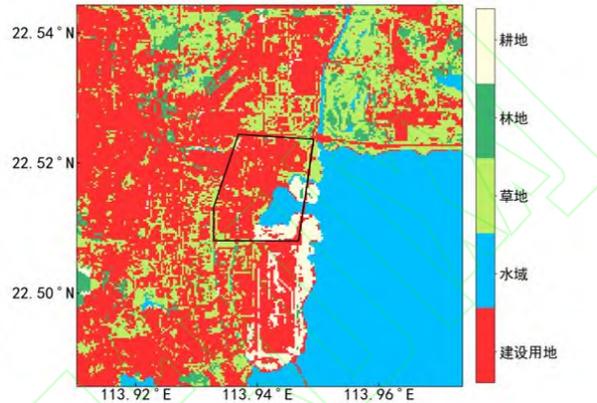


图 8 微尺度模式模拟范围及土地利用分布情况

图 9 给出了最终模拟得到的不同典型日近地面日平均风向和风速。可见项目所在地有很明显的季风特征：冬季以北风为主要入流风，夏季以南风为主要入流风，春季和秋季以东风为主要入流风。日平均风速以夏季最大，约 2.6m/s，以冬季最小，约 1.4m/s，春季和秋季的平均风速约 2.2m/s 和 1.8m/s。风速呈明显的东南方向高于西北方向的特征，这与当地的用地分布关系密切（东南方向主要为海洋，建筑物较少，风速衰减少）。这也证明了当地的局地气候与深圳的全市风环境存在一定的区别。

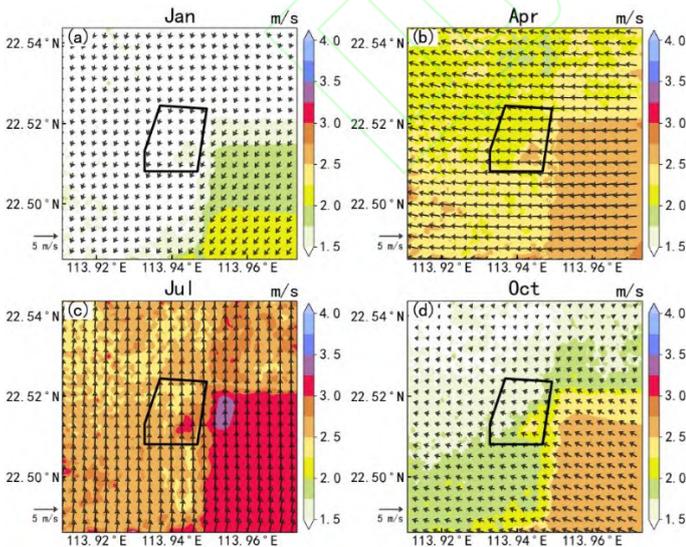


图 9 不同季节典型日项目区域近地面风场，其中填色为风速，箭头为风向

## 4.2 城市形态的精细化风场

通过 WRF 计算分析，采集后海中心区一年四季的昼夜城市风场，春季的风向是东风，风速是 2.2m/s；夏

季的风向是南风，风速是 2.6m/s；秋季的风向是东南东，风速是 1.8m/s；冬季的风向是东北东，风速是 1.4m/s（表 2）。利用商用 CFD 软件 Fluent，选取 RANS 湍流方程，为保证堵塞率小于 3%的要求，计算域的尺寸选取为 L\*B\*H=4000\*2000\*2000。采用内、外域分区域网格划分方法，利用非结构网格四面体网格进行离散，由于近壁面流场速度梯度较大，近壁面网格需进行加密，从而提高计算效率并减小数值扩散误差。本研究采用 6 层嵌套，将离地面低层最小网格高度设置为 0.1m，网格垂直高度变化比率为 1.06，网格总量 996 万。按照《广东省建筑风环境测试与评价标准》（DBJ/T15-154-2019）对于粗糙度指数的指引，本次粗糙度指数选用 0.3（代表中高层建筑密集地区、起伏较大的丘陵地），得出以下四个工况的风速云图（图 10 和表 3）。

表 2 基于城市形态的工况明细一览表

类型	工况一	工况二	工况三	工况四
季节	春	夏	秋	冬
风向	E	S	ESE	ENE
风速	2.2	2.6	1.8	1.4

根据人行高度处风速数值评价标准，对研究范围内各个区间风速所覆盖的面积进行统计，在四个工况条件下，风速区间为 0.17-1.86m/s 的软轻风占比最大，均达到 85%以上，其中 ESE 风向占比最大，达到 92.27%。其次是风速区间为 0-0.17m/s 的静风区范围所占的比例，平均达到 7%以上，静风区面积最大的是夏季即 S 风向，为炎热的气候增加了不舒适性。说明深圳前海中心区全年季风条件下的风况条件较好，90%以上可以达到风速的基本舒适值（图 11）。

各季节的研究结果表明尽管来流风速不同但是区域内风场的最高风速大致一致，尤其是正南正北风况输入下，春季和夏季的风速分布接近。不同主导风向，基于静风区面积的对比，偏南向的风更易于纵深进入城市建成区改善城市风环境，偏北的风性能相比较弱；偏向的风况一般情况要优于正向的风况。

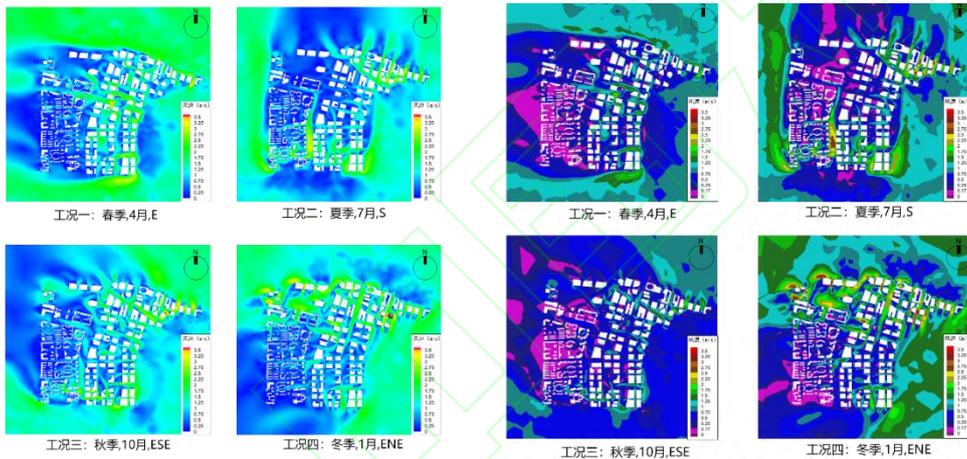


图 10 人行高度条件下风速云图

图 11 人行高度条件下静风区云图

表 3 人行高度平均风速值一览表

类别	0-0.17m/s	0.17-1.86 m/s	1.86-3.05 m/s	最大风速
ENE	7.55%	86.72%	5.73%	2.87m/s
E	9.52%	86.51%	3.97%	2.72m/s
S	9.28%	86.75%	3.97%	2.72m/s
ESE	7.13%	92.27%	0.6%	2.06m/s

对研究区域内行人高度的风速比进行统计，图 12 代表的是四个工况的风速比云图，按照《绿色建筑评价标准》GB/T 50378-2019 对室外风环境的要求，风速比小于 2 是有利于室外健康与舒适度提升的。四个工况中舒适度比值最高的是夏季 S 风向和秋季 10 月 ESE 风向，比例达到 100%，其次是冬季 ENE 风向，比例达到 99.27%，再次是春季 E 风向，比例为 98.80%。风速比值大于 2 的区域主要出现在街道高宽比较大的区域，形成了峡谷效应。

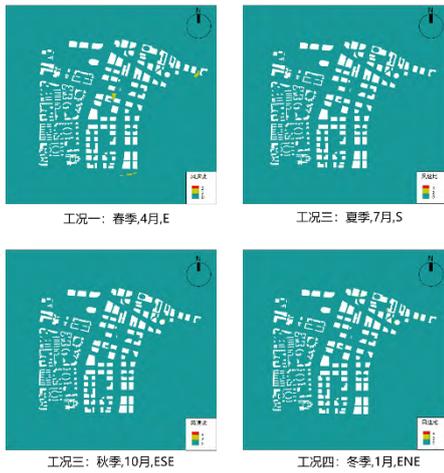


图 12 人行高度条件下风速比值图

### 4.3 用地属性对城市风场的影响

为评估不同规划方案对项目所在地风场的影响，下文将通过修改项目所在地土地利用情况，重新开展微尺度模拟，得到修改后局地风场的分布状况。

图 13 和图 14 为将项目用地全替换为建设用地的结果。可见当项目所在地完全规划为建设用地后，会使得当地风速主要呈衰减的趋势，尤其是项目范围内原本为水体的区域，局地风速下降超过了  $0.5\text{m/s}$ ，同时导致盛行风向下游的风速呈下降趋势。四个典型日的规划后日平均风速变化数值分别为： $-0.07\text{m/s}$ 、 $-0.11\text{m/s}$ 、 $-0.14\text{m/s}$  和  $-0.1\text{m/s}$ ，以夏季风速衰减最大。

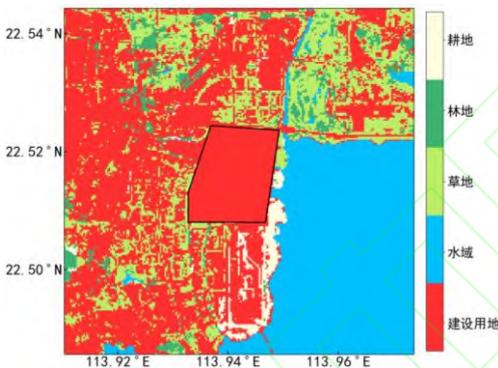


图 13 用地全替换为建设用地后的土地利用

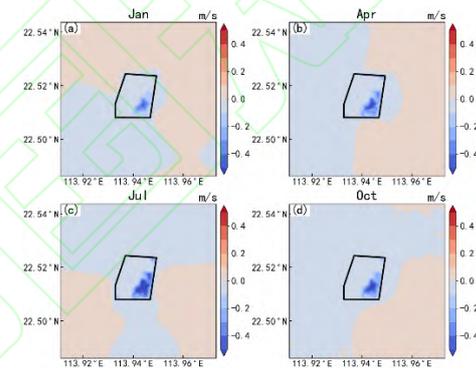


图 14 用地全替换为建设用地后与原始用地情况间的平均风速偏差

图 15 和图 16 为采用当前规划方案所得的用地和风速变化模拟结果。可见规划后，项目所在地平均风速的较规划前变化并不明显，但西部和南部的风速整体呈增大趋势，局地风速最大增加可达  $0.3\text{m/s}$  左右。

图 17 和图 18 给出了将当前规划方案中的绿地全部替换为水体后的土地利用分布及对应风速变化。能看出当把绿地全部替换为水体后，项目所在地西部可形成相对明显的局地风道；同时，东南部的风速较规划前明显增大，局部区域风速增大可达  $0.5\text{m/s}$  以上。另外，项目位置盛行风向下游区域的风速，相对规划前和原始规划方案，也有一定程度的增加。

图 19 和图 20 给出了将当前规划方案中的水体全部替换为绿地后的土地利用分布及对应风速变化。能看出若将水体全替换为绿地，由于粗糙度增大，造成项目区域东南位置的风速成下降趋势，局地风速下降可到  $0.3\text{m/s}$  左右。此时规划后对项目周边区域的风环境影响也相对较弱，替换为水体的方案表现更优。

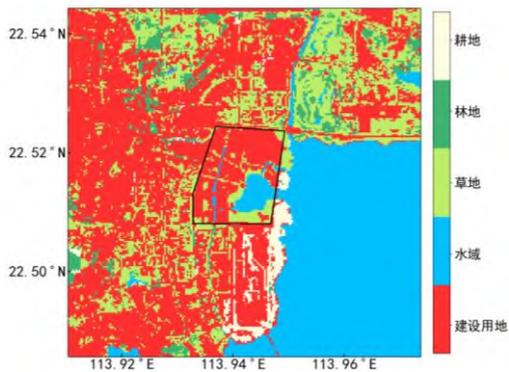


图 15 当前规划土地利用分布

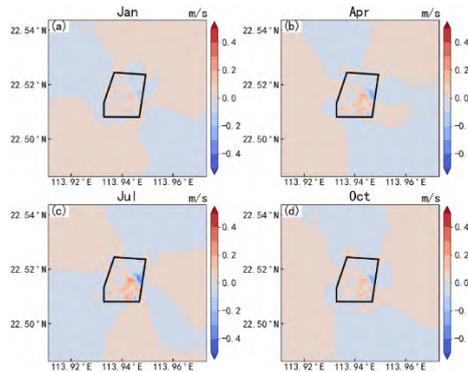


图 16 当前规划方案对风速的影响

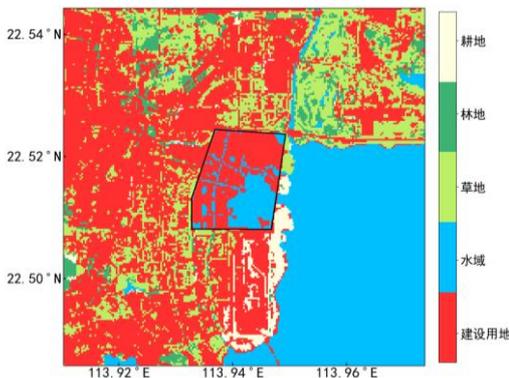


图 17 将当前规划中的绿地全替换为水体后的土地利用分布

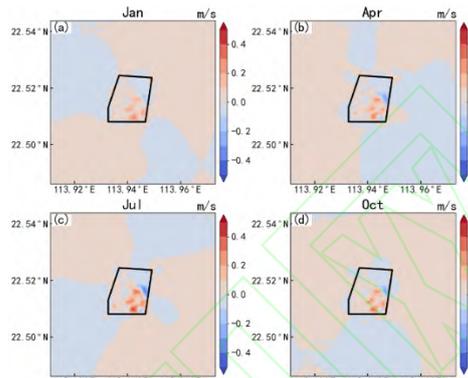


图 18 将当前规划中的水体全替换为绿地后对风速的影响



图 19 将当前规划中的水体全替换为绿地后的土地利用分布

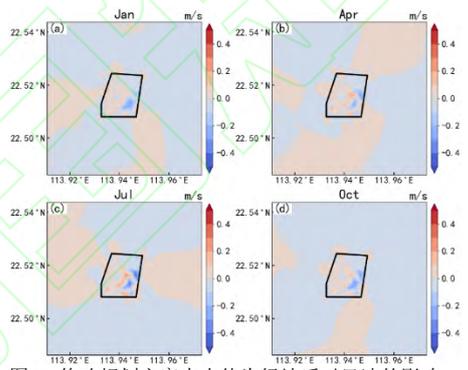


图 20 修改规划方案中水体为绿地后对风速的影响

表 4 列出了几种比较方案对研究范围内日平均风速产生的影响。根据前述分析，在项目所在地适当增加绿地和水体都可以较好地改善局地风环境，建议以增设水体为主；同时建筑物的规划则应当注意密度和层高，以免对项目及项目盛行风向下游的风环境产生不利影响。

表 4 不同规划方案对项目所在地日平均风速产生的影响，单位：m/s

方案名称	春季典型日	夏季典型日	秋季典型日	冬季典型日
全为建设用地	-0.11	-0.14	-0.1	-0.07
当前规划方案	0.001	0.006	0.003	0.004
规划方案绿地换为水体	0.005	0.02	0.02	0.024
规划方案水体换为绿地	-0.013	-0.02	-0.025	-0.025

#### 4.4 建筑形态对风环境的影响

迎风面指数（FAI）作为典型的建筑形态参数，表征的是垂直于某一风向的建筑迎风面面积与建筑所在地块面积之比。根据建筑的占地面积及计算过程中的精度要求，选取 50m\*50m 格网大小。建筑周边风环境受到自身及其他建筑朝向、长度等因素影响，迎风面指数与风向有直接的关系，风向不同则建筑的迎风面积不同，从而该风向下的城市空间形态对城市空气流通的影响也不同，该指数表示为：

$$\lambda_{f(z)} = \frac{A_F}{A_T}$$

$A_F$ 是面向某个风向 $\theta$ 的建筑物总投影面积， $A_T$ 是计算单元的面积。由于后海中心区没有山地地形，所以本次迎风面指数的计算不需要增加地形对来流风的衰减系数。

四个工况背景下研究区域迎风面指数表现出一定的共性：数值最高的地方集中在超高层建筑周边，例如华润大厦。不同工况下迎风面指数也表现出一定的差异性，主要表现在研究范围西南侧的居住单元，在 ESE 和 E 风况下，表现出明显的 FAI 值降低，即迎风阻力系数减小，这与风速云图所呈现的静风区比值，高度一致。

风速最大值所出现的地方也正是迎风面指数高的场所，代表高层建筑通过对来流风的阻挡，改变了其运动轨迹，由水平运动变为沿着建筑立面下沉，产生“downwash”效应，增加近地面风速。

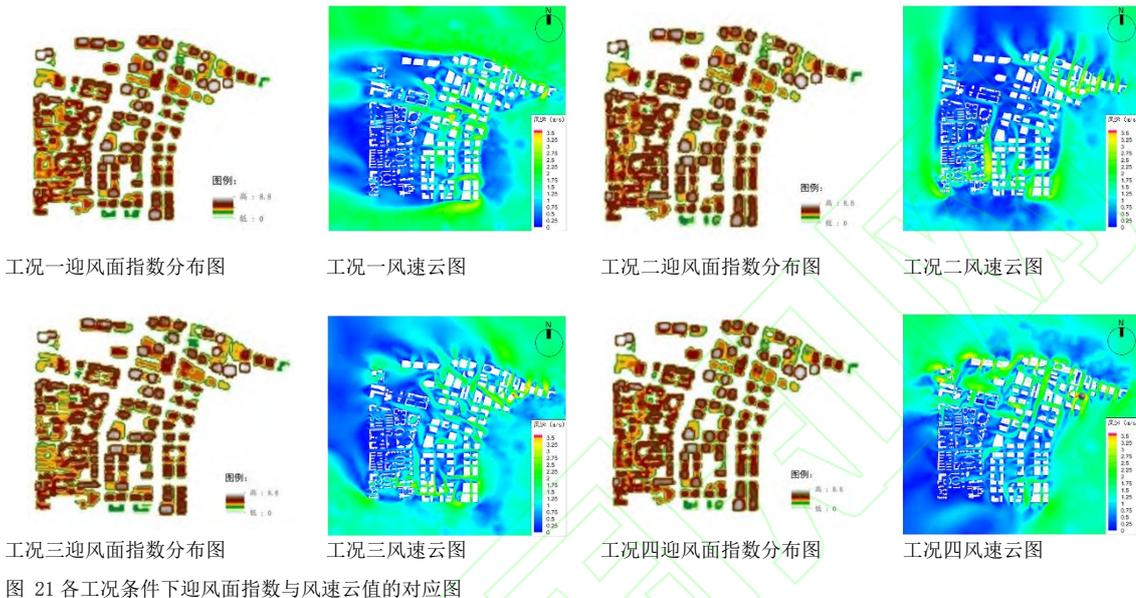


图 21 各工况条件下迎风面指数与风速云值的对应图

### 5 循环二：基于通风节能的风环境评价

超高层建筑的建设集约化充分利用了土地资源，使工作生活设施集中，效率显著提高。然而，超高层建筑的能源和资源消耗大，建筑的自然通风对保证室内热舒适性、提高空气品质都是非常有利的，从绿色建筑与节能的角度出发，采用被动式节能技术，利用自然通风不仅能够有效利用室外清洁凉爽的空气，及时更新室内封闭已久的浑浊空气及排除余热，还可以降低夏季空调的机械能耗，在夏热冬冷地区，尤其是季春至仲秋骄阳似火的漫长季节，发挥的节能效果非常显著，使用通风潜力分析可以激发出城市节能减排的潜力。高层高密度地区迫切需要引入节能的理念，相关研究表明，超高层建筑单位年耗电量在 200 kWh/m<sup>2</sup> 左右，是一般公共建筑的 3~10 倍。童哲铭指出，城市通风潜力节能减排的重要影响因子主要是两个：商业办公建筑面积和城市空气质量<sup>[19-20]</sup>。刘建对珠江三角洲区域空气污染的分析表明，通风量越大，空气质量越好<sup>[21]</sup>。

居住建筑相对于商业办公建筑，具有更大的个体使用偏好和泛规律特征，因此难以短时间内搜集住户的个例使用偏好进而达成一致的能耗表现规律。而商业建筑的使用者有近乎统一的工作规律和使用习惯，更有益于城市通风节能的研究。后海中心区商业商务的功能定位更有利于研究建筑节能的减排潜力。

人体舒适度指数（CIHB）表征不同状况下室外人体的舒适程度，利用指数大小划分等级并确定不同的舒适程度。深圳全年日间舒适指数等级均大于 0，没有寒冷的月份，其中 12、1、2 三个月等级为 0，即最可接受的舒适月份；3、4、10、11 月为温暖月份，较为舒适；5、6、7、8、9 月份为 3 级，舒适度为不舒适，因此选取了 12、1、2、3、4、10、11 等 6 个月份作为城市节能减排的关键月份（表 5）。1、2、3、12 月的风向为 N 风，风速 3.1m/s；4 月的风向为 S 风，风速 3.1m/s；10 月的风向为 E 风，风速 3.1m/s；11 月的风向为 NNE 风，风速 3.1m/s（表 6）。

表 5 深圳全年工作时段舒适度分类一览表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
舒适度	63.5	64.6	71.6	71.4	83.4	84.9	84.3	85.9	85.7	74.5	71.9	59.4
	0 级	0 级	1 级	1 级	3 级	3 级	3 级	3 级	3 级	1 级	1 级	0 级
	最为舒适		偏暖, 较为舒适		很不舒适, 感觉炎热				偏暖, 较为舒适		最为舒适	

表 6 基于城市形态的工况明细一览表

类别	工况五: 1、2、3、12月	工况六: 4月	工况七: 10月	工况八: 11月
风向	N	S	E	NNE
风速	3.1	3.1	3.1	3.1

### 5.1 基于性能的风场分析的结果

四个工况条件下 (图 22、图 23、图 24), E 风向条件下, 研究范围内的静风区面积占比最大, 达到了 8.68%; S 风向条件下的静风区面积占比最小 6.41%。基于静风区面积的对比, 偏南向的风更易于纵深进入城市建成区改善城市风环境, 偏北的风性能相比较弱; 偏向的风况一般情况要优于正向的风场, 除了 ENE 风向。

四个工况条件中, 软轻风的风速比例分别是 85.44%、87.49%、85.44%、85.16%, 10 月 E 风向的风况的软轻风比率最高。由此可见研究范围内的软轻风频率高于静风区, 风况良好, 有利于城市通风。并且 N、E、NNE、S 风况中, 大于 1.86m/s (10m 高空 3.3.m/s) 的比例达到 7.15%、3.83%、7.15%、8.18%。在微风标准中, 4 月 E 的风速为 0。其余的都是 0.25 (表 7)。这也说明, 当来流风与城市形态存在一定角度差异时, 容易引起文丘里效应, 即局部风速增大。

表 7 人行高度平均风速值一览表

类别	0-0.17	0.17-1.86	1.86-3.05	3.05-4.47
N	7.15	85.44	7.15	0.25
E	8.68	87.49	3.83	0
NNE	7.15	85.44	7.15	0.25
S	6.41	85.16	8.18	0.25

根据风速比数值分析可知, 工作时间段范围, 四个工况中风速比小于 2 的比值都在 95%以上, 其中 N 风条件下即 1、2、3、12 月占比最高, 达到 99.98%, 其次是 11 月的 NNE 风向, 数值达到 99.87%, 再次是 4 月 S 风向, 为 99.56%, 最差的是 10 月的 E 风向, 为 96.88%。其中风速比最大值为 2.74 出现在海信南方大厦、中海油田大厦与创业路交汇处, 局地环流经过开阔场所的动力补充, 受到中海油田大厦与海信南方大厦显著棱角的遮挡, 产生了角隅效应, 加速了空气的流动速度。同时出现一个显著特征, 风速比的高值区域普遍出现在迎风面。

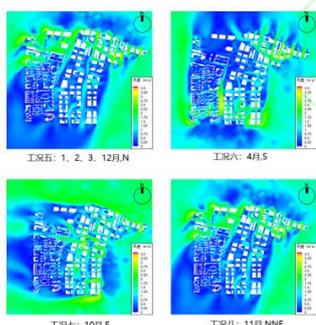


图 22 人行高度条件下风速云图

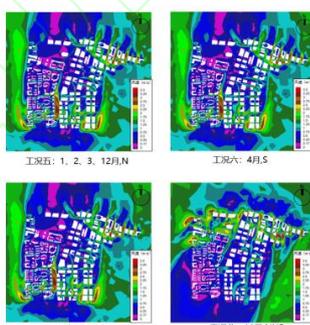


图 23 人行高度条件下静风区云图

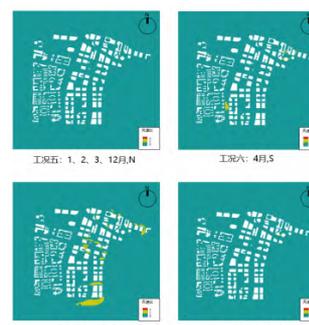


图 24 人行高度条件下风速比值图

### 5.2 能耗分析

#### (1) 通风量的分析

以往研究表明, 通风量对空气质量有一定的影响。通风量也被称为通风系数或通风指数, 是单位时间单位面积空气的流量, 是描述边界层内大气对污染物稀释扩散能力的参数, 反映大气在动力与热力的综合作用下对大气污染物的清除及扩散能力, 能够显示某一地区的空气质量和污染趋势。一般来说, 某一地区通风量越大, 大气对污染物的扩散能力越强, 该地区的空气质量越好; 通风量越小, 大气对污染物的扩散能力越弱, 该地区的空气质量越差, 即通风量越大更有利于污染物的扩散, 更有利于城市节能。

自然通风的通风量  $G$  (kg/h) 的表达式为:

$$G = 3600 \frac{Q}{c(t_p - t_{wf})} = \rho \cdot v$$

其中  $Q$  代表扩散至室内的全部显热量,  $Kw$ ;  $c$  代表空气比热,  $c=1.0kJ/(kg\cdot^{\circ}C)$ ;  $t_p$  代表排风温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_{wf}$  代表夏季通风室外计算温度,  $^{\circ}C$ 。  $\rho$  代表空气密度,  $v$  代表截面通风量,  $m^3/s$ 。

考虑模拟的空气密度均是相同的, 本次研究主要研究的是截面通风量  $v$ 。经过计算后海中心区四个工况下的通风量如下表 8 所示, 在同样的风速条件下, 不同来流风向给后海中心区带来了不同的通风量。S 向的通风量最大, 达到  $1775722m^3/s$ 。最低的是 N, 风量是  $1340851 m^3/s$ 。通风量大小表征空气质量的优劣, 在四个工况的分析中, 空气质量最好的是 4 月 S 风向, 空气质量最差的是 12 月至次年的 3 月, N 风向。

表 8 后海中心区通风量分析

月份	12	1	2	3	4	10	11
风速	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
风向	N	N	N	N	S	E	NNE
通风量 ( $m^3/s$ )	1340851	1340851	1340851	1340851	1775722	1485808	1525721

## (2) 建筑能耗分析

自然通风可以提供大量的室外新鲜空气, 提高室内舒适程度, 减少建筑冷负荷。利用 EnergyPlus 分析后海中心区的商业办公建筑能耗, 建立  $20*50*3.5m$  的 30F 的简化模型, 按照夏热冬暖气候分区赋予边界条件 (窗户传热系数  $2.4W/m^2 \cdot K$ 、屋顶传热系数  $0.44W/m^2 \cdot K$ 、墙体传热系数  $0.72W/m^2 \cdot K$ 、地面传热系数  $1.32W/m^2 \cdot K$ 、窗户太阳辐射得热值 0.2), 得出建筑逐月能耗, 其中 4 月的建筑能耗最低, 每平方的建筑逐月能耗是  $2.68kwh/m^2$  (图 25b)。

自然通风作为减少建筑能耗、提高舒适度和保持室内外健康环境的重要措施, 在后海中心区范围内, 表现出一定的规律, 4 月作为城市通风量最大和建筑能耗最低的月份, 空调开启时, 建筑逐月能耗为  $5.67 kwh/m^2$ , 可以降低  $2.99 kwh/m^2$ , 节能潜力 52.73%; 其次是 10 月节能潜力达到 50.48%, 另外 1 月的节能潜力为 19.15%, 2 月的节能潜力为 15.22%, 3 月的节能潜力为 19.56%, 11 月的节能潜力为 19.11%, 12 月的节能潜力为 19.78%。

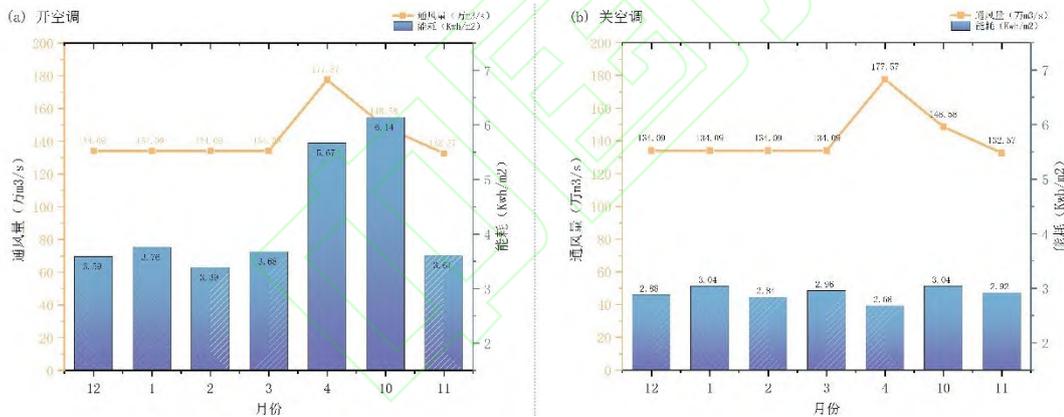


图 25 后海中心区建筑能耗与通风量一览表

综合双循环模式下的风环境分析可知, 深圳后海中心区受局地环流影响, 海陆风作用形成日间和夜间不同的来风条件导致不同的通风效果, 通过  $1.5m$  人行高度的风速分布图对比可知, 常年风况与日间风况的通风性能存在显著差异, 例如四月, “城市形态下” 城市风况 E 风向, 风速为  $2.2m/s$ ; “通风节能下” 的工作时段的城市风况为 S 风向。得益于低纬度的近海地势, 因此东向的来风条件对整个片区的风环境改善效果最好, 其中具体为工作时间的 10 月 E 风向, 全年夏季的 ESE, 冬季的 ENE。除此之外, 城市形态对风速的衰减也起到了加速作用, 研究区东侧为后海和中心湖, 建筑覆盖率低, 对东向的海陆局地风几乎没有遮挡, 南侧、北侧、西侧都为密集的城市建设区, 对风产生了明显的阻碍作用, 在地块内部表现最为明显。

整体风环境来看, 东侧的风环境全年优于西侧, 场地北侧的风环境相较于南侧, 表现出明显的优势。八个工况的综合图示结果, 研究范围内西侧的居住区全年高频低速, 整体通风质量不佳。多种风况下, 城市道路承担了将新鲜空气引入城市的作用, 作为研究区范围内的通风廊道, 中心路和创业大道性能最佳。同一个来流条件下,

风速的提高有利于缓解城市静风区，以“工况一（E, 2.2m/s）与工况七（E, 3.1m/s）”为例，在相同的风向下，工况一的静风区面积由 9.52%降低到工况七的 8.68%，软风区面积由 86.51%升到 87.49%（表 9）。

表 9 同一风向不同风速的风况对比一览表

类别	风向	风速(m/s)	温度(K)	0-0.17m/s	0.17-1.86m/s	1.86-3.05m/s	3.05-4.47m/s
工况一	E	2.2	297.65	9.52%	86.51%	3.97%	0
工况七	E	3.1	298.05	8.68%	87.49%	3.83%	0
工况二	S	2.6	302.95	9.28%	86.75%	3.97%	0
工况六	S	3.1	294.65	6.41%	85.16%	8.18%	0.25%

从用地属性对气候的影响性分析，深圳前海中心区下一步的园区品质营造和高质量设计的过程中，可以多引入绿色基础设施，尤其是水域，通过增加流动的水域改善街道微气候，在增加风速的同时，形成新的冷源，为城市降温增加动力。从迎风面指数分析，迎风建筑的设计需增大空间间隙率，减少对风的阻碍，减少迎风面指数。西南侧居住区内部常年风况较小，建议通过建筑微改造，例如底层架空，增加来风，减少内部静风区。

## 6 结论

### 6.1 结论

本文基于城市形态和通风节能两个研究视角，突破单一尺度的分析局限，形成多尺度融合的城市风环境评估技术方法（图 26）。在城市规划与设计的中期设计环节，利用建筑形态数据、气象数据，进行多尺度的嵌套研究，可以构建基于“城市形态与通风节能”的双循环评估体系，以深圳前海中心区为实证对象，利用“WRF+CFD”开展典型季节的城市风环境多尺度耦合评估，强化典型时段“通风节能”的局地气候边界条件。分别从风速、风速比、涡流静风区以数值化、可视化的特征直观地展示出前海中心区城市形态中存在的风环境问题，研究结果表明：

1、用地属性是影响城市风环境的重要要素。水域用地是最有利于改善城市风环境，适当增加蓝绿基础设施尤其是水域面积可以积极改善城市的风环境，这一点在后海中心区中表现得尤为明显。

2、在深圳前海片区，日间工况与全天盛行风况差异较大。除全天盛行风向的气象工况以外，城市风环境评估应根据分析地段的功能定位与用地性质，从性能角度探讨日间（8：00—20：00）的城市风环境状况，反映风环境的实际使用效能。

3、在深圳，通风节能潜力主要集中于 1、2、3、4、10、11、12 月份。在 4 月，城市通风量最大、通风节能潜力最大，达到 52.73%。

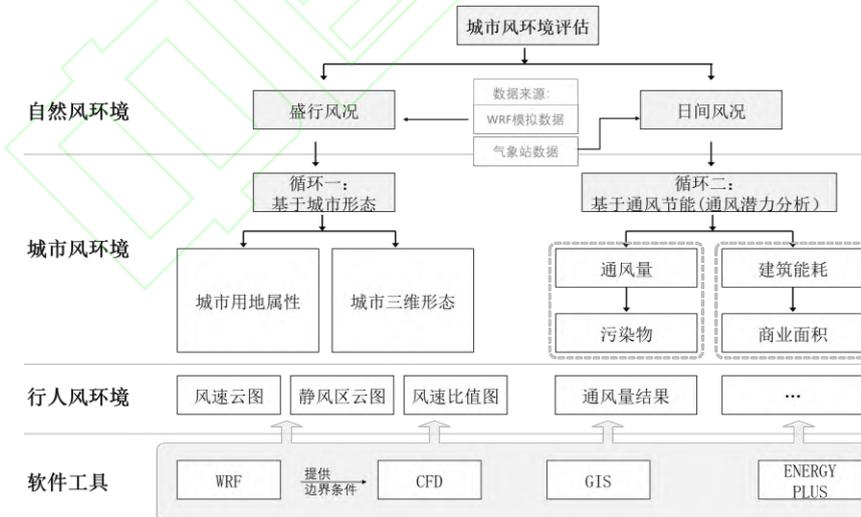


图 26 “基于双循环”的城市风环境评估体系

### 6.2 讨论

城市风环境是城市气候与城市形态共同作用的结果。特别在南方地区，温度和湿度的共同作用会影响对舒适度的评价，这需要在风环境的分析中综合考虑。

国家气象站点建站时间长但数量少，地方区域站建站多但运营晚，致使国家气象站点距离实证场地较远，必然会影响真实场景风环境评估结果的准确性与真实性。

## 图、表来源:

图 1-图 2: 根据“深圳南山后海中心区运营策略报告”中的区位图纸改绘

图 3-图 26: 作者自绘

表 1-表 9: 作者自绘

## 参考文献

- [1]张云伟,顾兆林,周典,等. 城市局部气候分区及其参数化条件下风环境模拟[J]. 地球环境学报, 2016, 7(5): 480-486, 493.  
ZHANG Yun-wei, GU Zhao-lin, ZHOU Dian, et al. Simulation on Urban Wind Environment Based on Local Climate Zones and Its Parameterization[J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(5): 480-486, 493.
- [2]王瑾,段德罡,姚博,等. 适应风环境特征的小城镇空间布局优化研究[J]. 城市规划, 2017, 41(9): 92-99.  
WANG Jin, DUAN De-gang, YAO Bo, et al. Research on Optimal Spatial Planning Based on Wind Environment in Small Towns[J]. City Planning Review, 2017, 41(9): 92-99.
- [3]E. Ng. Policies and technical guidelines for Urban Planning of High-Density Cities - Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong[J]. Building & Environment, 2009, 44(7): 1478-1488.
- [4]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.  
ZHENG Ying-sheng, SHI Yuan, REN Chao, et al. Urban Ventilation Strategies for Micro Climate Improvement in Subtropical High-density Cities: A Case Study of Tai Po Market in Hong Kong [J]. Urban Planning International, 2016, 31(5): 68-75.
- [5]石邢,李艳霞. 面向城市设计的行人高度城市风环境评价准则与方法[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(5): 22-27.  
SHI Xing, LI Yan-xia. Evaluation Criteria and Methodology for Pedestrian-Level Wind Environment in Urban Design [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2015, 30(5): 22-27.
- [6]中华人民共和国住房和城乡建设部. 《绿色建筑评价标准》: GB/T50378-2019 [S]. 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Assessment Standard for Green Building, GB/T50378-2019 [S]. 2019.
- [7]姚佳伟,黄辰宇,庄智,等. 面向城市风环境精细化模拟的地面粗糙度参数研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 99-106.  
YAO Jia-wei, HUANG Chen-yu, ZHUANG Zhi, et al. Study on Precise Calculation Method of Urban Surface Roughness Parameters in Numerical Simulation of Urban Ventilation [J]. Building Science, 2020, 36(8): 99-106.
- [8]P. Xie, J. Yang, H. Y. Wang, et al. A New method of Simulating Urban Ventilation Corridors Using Circuit Theory[J]. Sust. Cities Soc., 2020, 59: 10.
- [9]B. J. He, L. Ding, D. Prasad. Urban Ventilation and Its Potential for Local Warming Mitigation: A Field Experiment in an Open Low-rise Gridiron Precinct[J]. Sust. Cities Soc., 2020, 55: 17.
- [10]王梓茜,程宸,杨袁慧,等. 基于多元数据分析的城市通风廊道规划策略研究——以北京副中心为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25(1): 87-96.  
WANG Zi-xi, CHEN Cheng, YANG Yuan-hui, et al. Research on Urban Ventilation Channel Planning Strategy Which Based on Multivariate Date Analysis: Take Beijing Sub Center as An Example [J]. Urban Development Studies, 2018, 25(1): 87-96.
- [11]高海宁,李元征,韩风森,等. 城市街道峡谷通风与空气污染研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(4): 363-371.  
GAO Hai-ning, LI Yuan-zheng, HAN Feng-sen, et al. Studies on Ventilation and Air Pollution in Urban Street Canyons: A Review [J]. World Sci-Tech R&D, 2017, 39(4): 363-371.
- [12]徐晓达. 超高层建筑周边行人高度处平均风速分布特性及风环境评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
XU Xiao-da. Characteristics of Mean Wind Speed Distributions and Wind Environment Assessment at Pedestrian-level Height around Super-tall buildings [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [13]杨易,张之远,余先锋. 基于一种标准城市建筑模型的行人高度风环境比较研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2022, 50(6):

784-792.

YANG Yi,ZHANG Zhi-yuan,YU Xian-feng.A Comparative Study of Pedestrian-Level Wind Environment Based on a Standard Urban Building Model [J].Journal of Tongji University:Natural Science,2022,50(6):784-792.

[14]杨易,金新阳,杨立国,等.高层建筑群行人风环境模拟与优化设计研究[J].建筑科学,2011,27(1):4-8.

YANG Yi,JIN Xin-yang,YANG Li-guo, et al.Numerical Simulation Research on Pedestrian Wind Environment and Optimization Design of High-Rise Buildings [J].Building Science,2011,27(1):4-8.

[15]杜吴鹏,房小怡,刘勇洪,等.面向特大城市的风环境容量指标和区划初探——以北京为例[J].气候变化研究进展,2017,13(6):526-533.

DU Wu-peng; FANG Xiao-yi; LIU Yong-hong, et al.Indexes and Zoning Research of Wind Environmental Capacity for Metropolis——A Case of Beijing [J].Climate Change Research,2017,13(6):526-533.

[16]WANG Wei-wu, WANG Di, CHEN Huan, et al. Identifying Urban Ventilation Corridors through Quantitative Analysis of Ventilation Potential and Wind Characteristics[J]. Building and Environment, 2022, 214.

[17]Y. Toparlar,B. Blocken,B. Maiheu, et al. A Review on the CFD Analysis of Urban Microclimate[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1613-1640.

[18]汪小琦,高菲,谭钦文,等.高静风频率城市通风廊道规划探索——成都市通风廊道的规划实践[J].城市规划,2020,44(8):129-136.

WANG Xiao-qi,GAO Fei,TAN Qin-wen, et al. Planning for Ventilation Corridor in City with High-Frequency Static Wind: A Case Study of Chengdu City[J].City Planning Review,2020,44(8):129-136.

[19]TONG Zhe-ming, CHEN Yu-jiao, MALKAWI A., et al. Energy Saving Potential of Natural Ventilation in China: The Impact of Ambient Air Pollution[J]. Applied Energy, 2016,179:660-668.

[20]Z. Tong,Y. Chen,A. Malkawi. Estimating Natural Ventilation Potential for High-Rise Buildings Considering Boundary Layer Meteorology[J]. Applied Energy, 2017, 193: 276 - 286.

[21]刘建,范绍佳,吴兑,等.珠江三角洲典型灰霾过程的边界层特征[J].中国环境科学,2015,35(6):1664-1674.

LIU Jian; FAN Shao-jia; WU Dui,etal.BoundaryLayer Characteristics of Typical Haze Process in The Pearl River Delta Region [J].China Environmental Science,2015,35(6):1664-1674.