

绿化和建筑布局对住宅小区的风热环境影响的数值模拟分析

孙 勇, 潘毅群

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 良好的住宅小区风热环境可以加快室外热量的消散和污染物排放, 保证居民的健康和舒适。影响小区风热环境的因素主要有小区布局、建筑形态及下垫面形式等。以青岛市一个实际小区为案例采用数值模拟的方法分析小区冬夏季行人高度的风场及温度场分布, 评估设计的合理性, 找出小区内风热环境不满足要求的区域。通过调整小区内建筑的布局和改变下垫面形式等方法改进小区的设计, 并对改进后的方案进行模拟计算。通过模拟结果的对比发现: ①合理布局建筑位置, 在小区内形成风道可有效改善风环境; ②改变下垫面热物性, 提高地面材料的反射率, 能够降低地面附近的空气温度和体感温度, 改善小区热环境。

关键词: 住宅小区; CFD; 风热环境; 绿化

中图分类号: TU20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2016)06-0078-07

Simulation of Vegetation and Building Layout Optimization Effect on the Wind and Thermal Environment in Residential District

SUN Yong, PAN Yi-qun

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A good wind and thermal environment of residential districts can speed up the outdoor heat and pollutant dissipation, as well as ensure the comfort and health of residents. The thermal environment in residential districts is affected mainly by layout form, building shape, underlying surface characteristics, etc. A residential area located in Qingdao is studied. Numerical simulations of the wind and temperature distribution of the residential district in summer are adopted to evaluate the rationality of the original design. Then, an improved design is proposed to meet the relevant provisions of evaluation mark of the green building on residential wind and thermal environment through appropriate adjustments of the building layout and the underlying surface characteristics. From the comparison between the simulation results of original and improved designs, it can be concluded that: ① Setting ventilation aisles in the residential area by adjusting building layout can improve the comfort level of wind environment. ② Changing the thermal performance of underlying surface materials (such as tree, artificial lake, lawn, etc.) for increasing the reflectivity of the ground material could reduce the ground surface temperature and the sensible temperature in summer to improve thermal comfort of the residential district.

Key words: residential district; CFD; wind and thermal environment; vegetation

0 引言

合理的小区建筑和绿化布局可以提供良好的风热环境, 为居民提供舒适、愉悦的生活环境, 并可以加大小区土地的使用率, 减少能源消耗。近年来, 对住宅小区的风热环境模拟研究已备受规划设计师及研究

收稿日期 2015-12-02; 修回日期 2016-06-07

者的青睐。目前的主要研究方法有风洞试验、计算机数值模拟及二者综合模拟的方法, 各种方法的研究和应用已日臻成熟。Gandemer^[1]采用风洞试验的方法模拟研究了存在于建筑群之间的文丘里效应(Venturi Effect)和边角效应(Corner Effect), 指出在建筑之间狭窄的通道内会使急剧风速增大, 在建筑群的边角处会

产生正负压相互影响的紊流气流区,该气流区半径与建筑物的宽度基本相等。Aishe Zhang 等人^[2]采用 CFD 模拟及风洞试验的方法分别对 3 种不同形态的住宅小区的行人高度的风环境做了模拟研究,研究显示住宅小区的微环境依赖于小区内建筑布局和风向两个因素并且建筑的错列布局形式有利于加强小区内的自然通风效果。赵彬等人^[3]介绍了预测小区风环境的 2 种不同仿真方法,并提出了利用计算机数值模拟指导小区规划设计的方法和思路,并通过实例验证了数值模拟技术对小区风环境优化设计的有效性。建筑群的微环境模拟十分复杂,Kazuya Takahashi 等人^[4]使用 CFD 模拟将建筑表面和地面的非稳态导热、辐射换热以及对流换热结合起来进行数值模拟计算,为模拟建筑群内部的热环境提供了一种有效的方法。林波荣等人^[5]在研究中构建了用于小区热环境模拟的空气热模型、植被热模型及下垫面传热模型,并建立了有绿化情况下室外热环境的通用模拟体系,进行了现场测试验证,为建筑小区的微环境模拟提供了完整的数值模拟框架。L. Shashua-Bar 等人^[6]基于大量的实验数据搭建了城市小区内的植被模型并研究其对小区的冷却效果(cooling effect),研究结果表明在湿热气候条件下,植被的遮阴作用可对城市小区内的热环境起到 70% 的改善效果,在正午时刻温度可降低 3℃ 左右。FENG Ning 等人^[7]采用 CFD 数值模拟及现场实测的方法探讨了不同绿化形式对小区微环境的改善效果。

本文基于 CFD 模拟软件,对某一具体的住宅小区进行初始方案建模并进行数值模拟,得到冬夏季节小区内部的风速和夏季的温度分布,根据相关标准和规范,具体分析原始方案设计下住宅小区的风热环境不合理区域。然后基于方案分析,采用调整建筑布局、绿化方案优化及改变小区下垫面形式等方式进行方案优化设计,通过 CFD 数值模拟,并采用可量化的评估参数分析研究因素的作用并分析优化后的小区风热换热环境。

1 基于 CFD 模拟的住宅小区优化方法

如图 1 所示,住宅小区的优化设计研究可遵循以下研究步骤:

(1) 确定设计方案,建立数值模拟模型,包括原始设计的几何尺寸、建筑布局等模型参数;

(2) 采用数值模拟软件进行模型的量化模拟,在这一步中,对数值模拟的模型进行简化设计是十分重要的一步,在确定主要研究因素的前提下,简化模型建立中的次要因素将对模拟结果的准确性及模型的计算时间大有裨益;

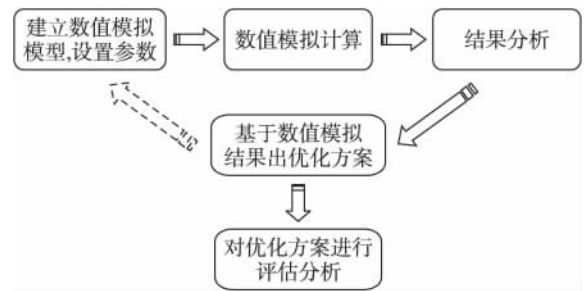


图 1 基于 CFD 模拟的住宅小区优化步骤

Fig.1 Schematic diagram of the optimal design with CFD simulation for the residential area

(3) 结合原始设计方案对数值模拟结果加以分析,得出原始设计方案下住宅小区的风热环境;

(4) 结合主要研究因素,针对原始方案的数值模拟结果提出优化措施。

其中,在对小区的风热环境和居民的热舒适分析时会结合现有的标准规范提出一些量化的评估参数,为设计者针对住宅小区的形态布局和绿化方案提出建议。

在研究步骤的数值模拟阶段,本文采用 CFD 商用软件 Fluent14.5,计算模型采用 RNG K- ϵ 模型。

为准确分析小区内部温度分布,在进行 CFD 数值模拟时,不仅考虑空气流动引起的对流换热,还要考虑太阳辐射、地面的长波辐射及建筑材料表面的辐射换热等。

2 住宅小区风热环境模拟分析实例

2.1 模型说明

研究对象小区所在城市青岛为我国北方的一个海滨城市,该小区位于城区中心地块。小区西侧紧邻高速公路和工业园区,小区北侧及东侧皆为同类型住宅小区,小区南侧为城市绿地公园。小区占地面积约为 178 750 m²,小区内以高层住宅建筑为主,共有 22 栋居民住宅建筑,建筑整体布局方式为错落式布局。住宅小区的位置布局图和平面图如图 2 所示。

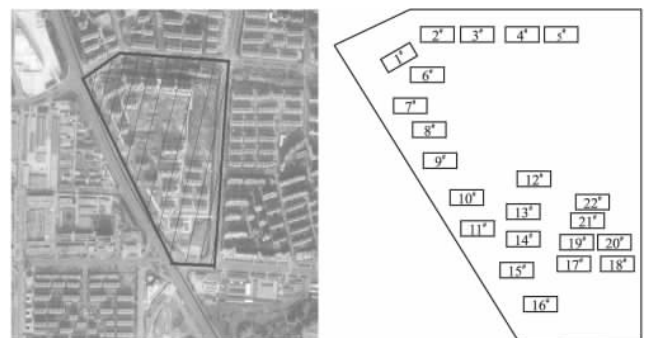


图 2 研究小区位置示意图

Fig.2 Location layout of the residential area

青岛市风玫瑰图如图3所示,青岛市冬季主导风向为西北风,平均风速为 5.3 m/s,夏季主导风向为南风,平均风速为 4.9 m/s。青岛市的主要气象资料如表1所示。

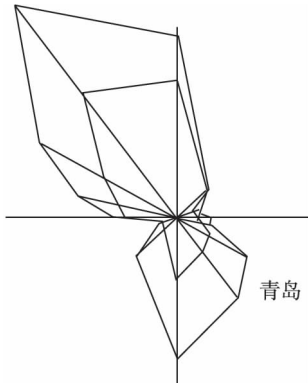


图3 青岛市风玫瑰图

Fig.3 Wind rose diagram of Qingdao

表1 青岛市主要气象资料

Table 1 Detailed meteorological data of Qingdao

主导风向	平均风速 / (m/s)	平均气温 / °C	太阳辐射强度 / (W/m ²)
冬季 西北风	5.3	-	-
夏季 东南风	4.9	25	950

2.2 计算域确定及网格划分

在小区风热环境的模拟研究中,计算区域的选取对模拟结果的准确度产生较大影响。通常小区外部流场的高度取小区内最大建筑物高度的2~3倍,计算域入口距小区最近边界为小区内最大建筑物高度的5~6倍,计算域入口距小区最近边界为小区内最大建筑物高度的15倍,计算域侧边边界应距最近侧的小区边界至少为小区内最大建筑物高度的5倍。由此确定该模型的计算区域为 1 650 m×1 250 m×250 m 的长方体计算域。小区的计算模型及计算域如图4所示。

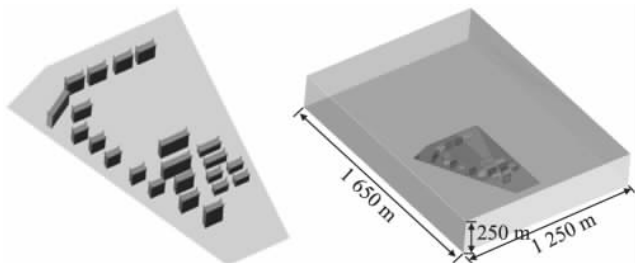


图4 住宅小区计算域与几何模型

Fig.4 Geometric model and computational domain of the residential area

根据日本建筑模拟研究会(AIJ)研究建议,为保证建筑小区 CFD 数值模拟的精度,计算模型的网格分

辨率至少为建筑尺寸的 1/10^[8]。本文中所建立的小区模型采用结构化和非结构化混合的网格形式,模型网格总数约为 300 万。

CFD 数值计算基于网格之间的数据传递,通过代数方程迭代求解,得到整个流场的信息,因此,网格数量和质量都会影响到计算的精度。确定一个既能保证精度又能保证计算速度的网格数量较为关键。通过对比不同网格数量的计算结果之间的差距来确立最后的网格数量就是所谓的网格独立性检验。为了进行网格独立性检验,对建筑小区模型进行不同密度的网格划分,然后对不同网格数量的模型进行 CFD 数值计算,数值计算的边界条件和小区模型设置完全相同,并且均达到计算收敛条件,得出计算结果。在研究中选取 1.5 倍级的网格差异性来进行网格独立性检验,即建立 3 个计算模型,网格总数量分别为 300 万、450 万和 670 万。为更好地比较 3 种网格数量下计算结果的差异,在小区模型内取两条互相垂直的测试线,观察测试线上不同测试点的温度和风速的差异,测试点位置及温度、风速分布如图 5 所示。

从整体上看,在不同的网格数量的情况下,数值计算的结果随着网格数量变化未产生明显的波动,测试线上同一测试点在不同网格数量的模型温度和风速的分布趋势都较一致。而且 3 个模型的测试线的不同测试点温度和风速变化也基本一致。综合考虑计算速度和计算精度的前提下,确定 300 万的网格数量作为建筑小区流场计算的网格数量。

2.3 模型参数设置及边界条件

来流风为大气边界层内的自然风,平均风速随高度发生变化,其变化规律称为风切线或风速轮廓线,风速轮廓线可采用指数律分布表示^[9]。风速轮廓线指数律分布为:

$$v_z = v_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中 v_{10} 为 10 m 高度的基本风速,根据青岛市气象资料,夏季时 $v_{10}=4.9$ m/s,冬季时 $v_{10}=5.3$ m/s;

Z 为所处高度;

v_z 为风速轮廓线指数,与地表粗糙度有关,根据我国建筑风荷载规范及本小区的地理位置分析,选取风廓线指数 $\alpha=0.16$ 。

在小区的热环境数值模拟中,小区建筑物表面及下垫面的材料热物性及相互辐射作用对小区的温度分布有很大的影响,综合考虑小区建筑特性,模型中建筑表面及下垫面的材料热物性参数设置如表 2 所示。

计算模型中考虑太阳辐射、小区建筑表面及下垫面相互辐射作用对热环境的影响。模型中采用 DO 辐射

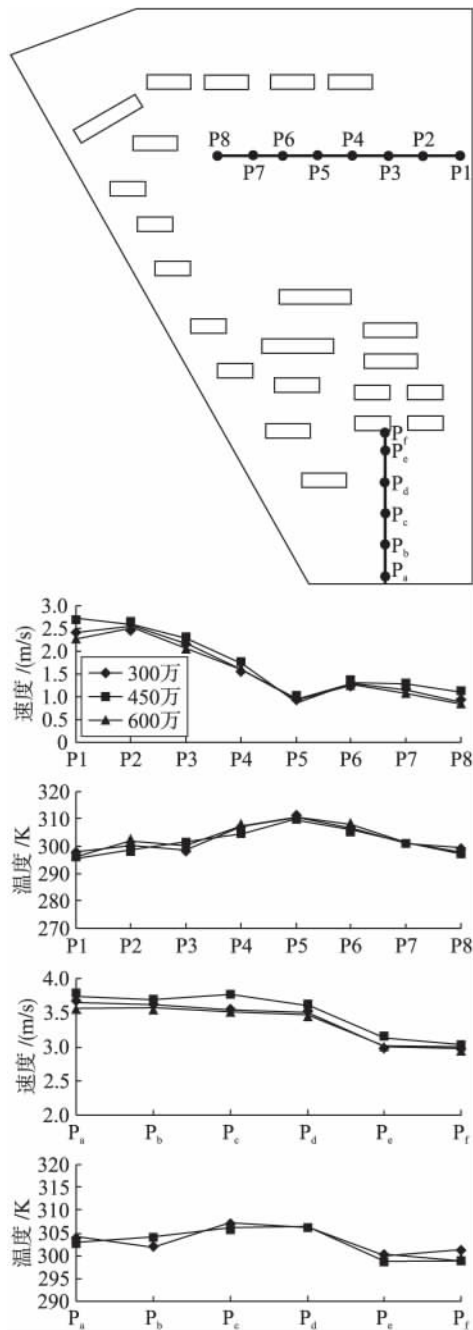


图5 网格独立性检验中测试点及其温度、速度的分布
Fig.5 Monitoring points arrangement and the velocity and temperature distribution of monitoring points

表2 计算模型中建筑表面及路面热物性参数
Table 2 Thermo-physical parameters of building wall surface and ground surface

	短波 反射率	长波 发射率	导热系数 / [W/(m·K)]	密度 / (kg/m ³)	比热 / [kJ/(m ³ ·K)]
外墙	0.25	0.95	1.2	2 100	1 600
路面	0.22	0.95	1.2	2 000	1 600

模型,将各表面间的辐射传热简化为稳态计算过程^[10]。为计算的可行性,在模型中将计算域的顶面简化为太阳辐射发射源,太阳辐射强度取青岛市夏季正午 12:00

时刻的太阳辐射强度 950 W/m²。计算模型边界条件的设置如表 3 所示。

表3 计算模型边界条件设置
Table 3 Boundary conditions of the numerical model

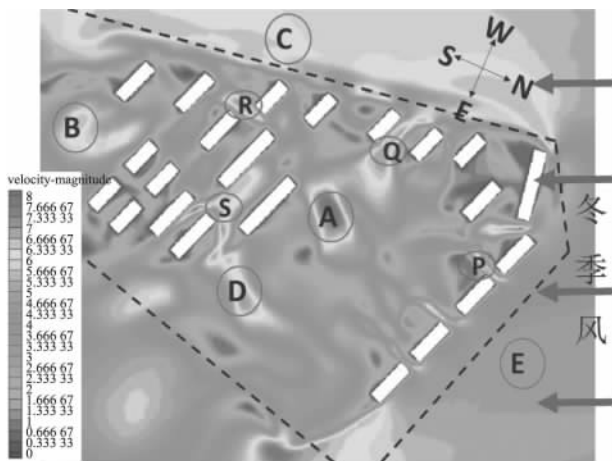
边界	边界条件类型	边界条件参数设置
入口	velocity-inlet	速度入口按 UDF 输入 $k=0.25 \quad \epsilon=0.0067$
出口	outflow	-
计算域上边界	wall	太阳辐射量 950 W/m ²
地表下垫面	wall	地表下垫面热物性参数参见表 2
建筑物外表面	wall	建筑物外表面热物性参数参见表 2
计算域侧边界	symmetry	-

2.4 结果与讨论

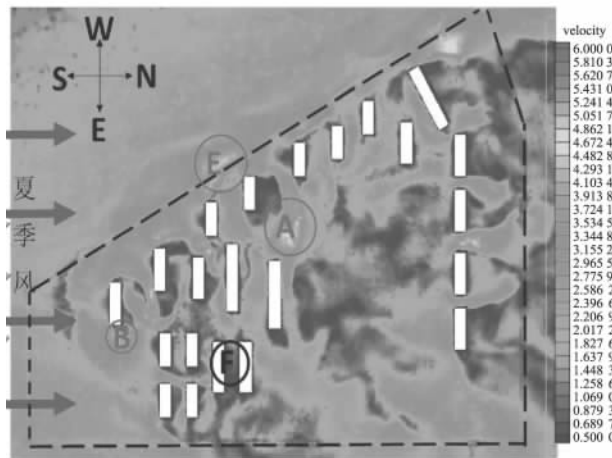
为准确分析小区内风热环境对小区内居住热群的热舒适影响,在计算模型中选取小区距地面 1.5 m 高度的行人高度剖面为研究面,分析该平面上的温度场及风速场。

由图 6(a)、(b)可以看出,在初始规划设计的小区布局下,冬季时小区内部行人高度平面内的平均风速约为 5.1 m/s,冬季小区的平均风速稍大,对小区内居民产生较明显的冷风吹风感^[11]。其原因为 ①在小区的 C 侧的建筑布局易形成冬季主导风的风道,造成冬季冷风灌入小区内部;②小区冬季主导风向的外围区域(C 侧、E 侧)未有挡风设置(如树木)。在小区内部的空旷区域(A 区域、B 区域和 D 区域)风速很大,最大风速达到 7 m/s。综合分析小区的风场分布图可知,出现大风速区域是因为在这些空旷区域多个方向的气流绕过建筑而汇集成较大的气流漩涡形成较大负压区。此外,小区内风速在某些建筑的通道间突变增大,如 P、Q、R、S 区域,这些区域的形成主要与建筑布局形式及建筑物间距有关,狭小的建筑通道易形成风速过大区。

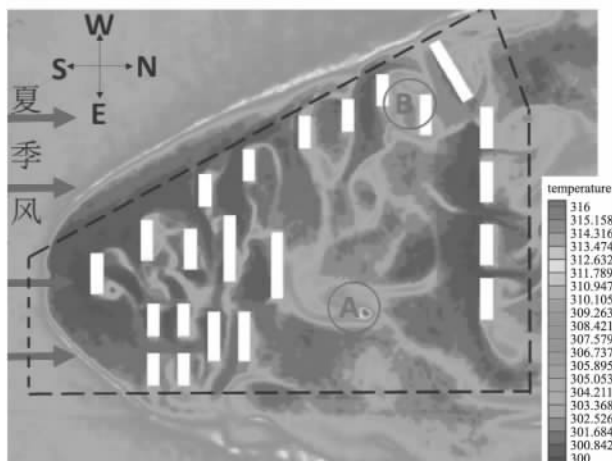
在夏季主导风(南风)影响下,小区内平均风速为 4.3 m/s,满足居民的舒适要求且在该通风条件下,可减小夏季住宅的空调负荷。在夏季风条件下,小区 A、B、E 区域为风流动的主要通道,这些区域风速稍大,但气流分布比较均匀,通风效果良好。同时,由于 A 区域为小区主入口,受周边建筑物的影响,该区域最大风速约为 6 m/s,风速较大。由于建筑物的阻挡作用,风速沿风向逐渐降低,某些区域在建筑物布局等因素的影响下,气流经过此处时形成较大风影区,该区域风速急剧下降为静风状态,如 F 区域。F 区域的 21# 和 22# 楼的布局方式切断了来流的风道,且两建筑的平行布局使得建筑之间形成背风区,空气无法流通。该区域的存在造成建筑物周围气流不畅,通风效果差,进而使得污染物无法及时扩散,导致该区域的空气质量变差。



(a)冬季住宅小区风速分布



(b)夏季住宅小区风速分布



(c)夏季住宅小区温度分布

图6 住宅小区风热环境模拟分布

Fig.6 Thermal and wind distribution of the residential district

从图 6(c)可知,小区内温度分布比较均匀,小区夏季温度在 28~32℃ 之间。通过对比夏季风环境分布,小区内温度场分布受风场影响很大,在小区主入口区域是气流进入小区的主要通道,这些区域夏季风速较大,因此在这些区域温度较低,比较接近入口风的温度。在图中的 A 区域,由于建筑物对夏季风的阻挡作

用形成静风区,在此区域空气流通性差,空气所能带走的太阳辐射少且加之地面长波辐射对空气的加热作用,相应地温度也较高。A 区域在小区内处于较空旷区域,对居民热舒适及夏季住宅空调负荷影响较小。在 B 区域,由于处于夏季风的末端处,受前排建筑的阻挡和建筑间距过小等因素的影响,该处温度稍高于平均风速。

3 住宅小区优化设计分析

通过对小区数值建模及模拟分析,得出小区冬、夏季的风热环境分布,在综合考虑现有设计规划方案下的热风环境对居民热舒适性及小区内空气品质的影响,在建筑布局、小区绿化、周边综合环境等方面提出调整和优化方案。并以优化后的方案进行数值建模和模拟,对比分析优化后的方案对小区风热环境的改善效果。

3.1 优化设计方案

3.1.1 小区内建筑布局调整

为优化小区冬夏季风场和夏季温度场的分布,调整 21# 和 22# 建筑的布置位置,使 2 栋建筑呈错落式布局,增加两建筑之间的间距,且与前排建筑通道连接形成夏季主导风的来风通道。调整 6# 建筑的位置,增大该建筑与 1# 和 7# 建筑的建筑间距。调整后的小区建筑呈错落式布局形式,且未改变建筑的朝阳布置格局。

3.1.2 小区绿化及地表环境改善

小区绿化布置依据主要考虑树木对冬季主导风的阻挡作用和对建筑通道的风速的减弱作用,在兼顾美观的同时,在小区下垫面以草坪为主,减弱下垫面的辐射对空气的增热作用。在小区西侧、北侧错排种植高大的乔木和较低矮的灌木,既可以隔离临近高速公路的噪声还可抵御冬季寒风。在小区南侧种植低矮灌木或落叶乔木,在小区主入口及风速较大的建筑通道口栽种乔木。

为减少小区下垫面的热辐射作用,在小区的空旷地带设置人工湖,依靠水面的特性降低该区域的温度,同时增加小区的美观性。调整后的小区布局如图 7 所示。

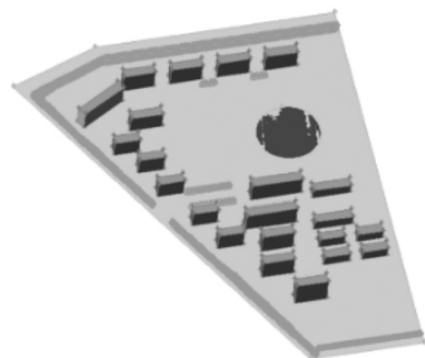


图7 调整后小区布局

Fig.7 Layout of optimum design

3.2 优化方案模型建立与参数设置

对调整布局后的小区的风热环境进行数值模拟,主要是考虑植被绿化对其温度场和风速场的影响。植被对小区的热环境的改善作用主要体现在植物本身的蒸腾作用及树木的遮阴作用。树木对风环境的影响体现在树冠层对风的阻挡,降低风的渗透。树木的形状各异,在计算模型的简化过程中计算各异,通过对树木的简化模拟计算,结果表明,可将树冠层简化处理为长方体模型,该模型无论建模还是收敛性都有较大优势,因此,在模拟计算中对树冠层采用如图8所示的长方形剖面进行简化处理。植被冠层的太阳辐射得热量包括太阳直射辐射和散射辐射得热,以及建筑外表面及地表反射的太阳辐射。植被冠层对短波辐射和长波辐射的吸收可以采用式(2)计算^[12]。

$$\Phi = e^{-kl\alpha} \quad (2)$$

式中 k 为植被冠层对长波辐射和短波辐射的吸收系数;
 l 为吸收辐射热量的植被冠层总长度;
 α 为冠层密度(叶片密度)。

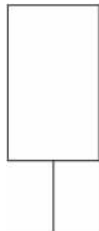


图8 树木简化模型^[11]
 Fig.8 Simplified model of tree

植被的蒸腾作用是利用植物的根系吸收土壤中的水分然后传送至叶片,散发至空气中形成潜热,其对小区的热环境分布有很大的影响。根据林波荣的研究^[12],列举了一些植物的蒸腾作用和叶面指数关系的论证,得出植物蒸腾作用散热量计算式如式(3)所示:

$$\varphi_{trans p-a} = 2LAI \frac{0.625\lambda\rho}{c_p p (r_a + r_i)} \Delta p_{p-a} = 2LAI \alpha_w (d_a p - d_a) \quad (3)$$

式中 LAI 为叶片密度;
 λ 为水的蒸发潜热;
 ρ 为辐射吸收率;
 p 为大气透过率;
 $(r_a + r_i)$ 为水分传输总阻力;
 α_w 为对流换热系数;
 d_a 为空气含湿量。

在计算模型的参数设置中,植被的蒸腾作用及湖面的蒸发散热作用都作为一个冷源处理。具体的参数设置如表4所示。模型的其他边界条件参数与原始方案计算模型的边界条件一致。

表4 模型中绿化植被和人工湖的参数
 Table 4 Green vegetation parameters in model

	长波 消散系数	短波 消散系数	长波 反射率	短波 反射率	蒸腾散热量 / [kJ/(m ² ·d)]
草坪	0.9	0.65	0.95	0.15	3 000
数木	0.8	0.6	0.95	0.20	6 300
人工湖	0.8	0.6	0.9	0.15	5 200

3.3 结果对比

选取 $R = (V_{optimum} - V_{original}) / V_{optimum}$ (V 为小区 15 m 行人高度的平均风速)作为小区优化设计前后风环境的评估参数。优化设计前后冬夏两季小区模型所得的平均风速对比结果如表5所示。可以看出,在相同的模型边界条件下,冬夏两季小区的平均风速都有所减小。小区的冬夏两季最大风速分别减小 36.8%和 34.7%。由于植被的阻挡作用,小区的平均风速明显减小,达到居民可接受的范围。

表5 优化设计前后冬夏两季小区模型所得的平均风速对比
 Table 5 Comparison between simulation data with or without vegetation

	冬季		夏季	
	最大风速 / (m/s)	平均风速 / (m/s)	最大风速 / (m/s)	平均风速 / (m/s)
原始模型	6.92	5.1	6.31	4.50
优化后模型	4.37	3.15	4.12	3.01
R 值	36.8%	38.3%	34.7%	33.1%

经过调整布局后的小区冬夏季节风环境模拟结果如图9所示。通过对调整优化布局后的小区冬、夏季风环境分析可得出,冬季小区内的整体风速减弱明显,最大风速小于 4 m/s,居民的冷风吹风感会得到有效缓解,由此说明在主导风向的来流侧栽种树木可有效改善小区风环境。此外,在小区的空旷区域,通过种植植被,同样减弱了气流的汇集,弱化了气流漩涡的产生。在建筑布局上通过调整 21# 和 22# 建筑的布置位置及增大建筑间距,形成夏季通风风道,使得该 2 栋建筑周边的夏季空气流通性增大,可利于热量的流散和污染物的扩散。基于以上分析,通过小区的调整布局 and 增加绿化植树等措施,有效改善了小区的风环境,增大了小区居民的舒适性。

在调整布局以及增加绿化改变下垫面形式后的小区夏季热环境可看出,小区整体的温度在 26~30 °C 之间,相比较原有设计方案下的温度分布,温度下降 1~2 °C。在小区的空旷区域,由于增加绿化植被以及增设人工湖,热环境得到明显改善。在建筑 1#、6# 和 7# 之间,由于调整了 6# 建筑的布局位置和增大了建筑间距,该区域的温度明显下降。由此说明,通过增加住宅

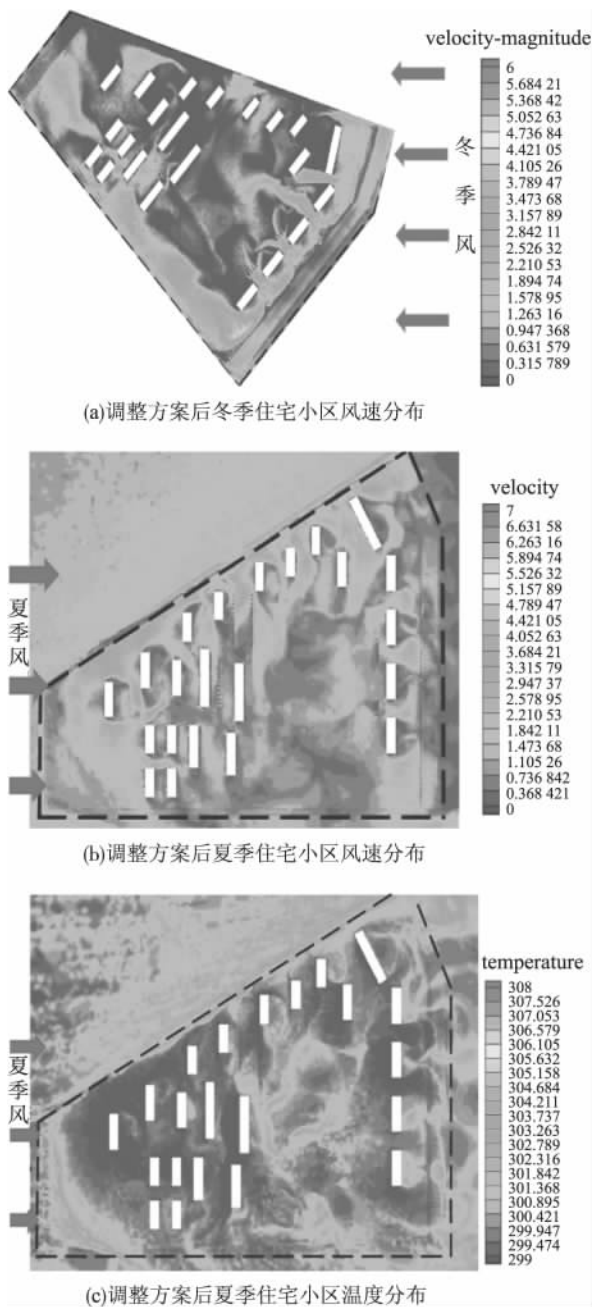


图9 调整规划方案后住宅小区风热环境模拟分布

Fig.9 Thermal and wind distribution of the optimum design

建筑周围绿色植被 增加人工水系等方法可有效改善住宅小区的微气候环境,不仅增强居民的舒适感而且可一定程度上降低居民住宅的空调负荷。

4 结论

CFD 数值模拟技术可对建筑小区的温度分布和风速分布进行直观、可视化的模拟和处理,通过选取量化的参数可有效评估主要研究因素在小区优化设计中的有效作用,在方案设计阶段为建筑小区营造居民舒适的微气候环境提供很好的建议,有利于打造绿色低碳小区。

通过模拟对比分析可发现,对小区绿化方案设计可显著提升居民的风热环境。改变建筑小区下垫面性质,提高地面材料的反射率(如增加树木、草地、增设人工湖等),能够降低地面附近的空气温度,改善小区热环境。此外,建筑布局对改善小区内气流组织,在小区内形成有效通风起着重要作用。本文的研究小区中,调整楼宇之间布局角度和距离,形成主导风向的通风廊道,利于增强夏季小区内部气流流动,增强小区散热和污染物扩散,同时使得冬季小区内风速达到人体舒适范围内。

参考文献:

- [1] J.Gandemer. Wind environment around buildings[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Cambridge University Press, 1975.
- [2] A.Zhang, G.Cuilan, L.Zhang. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics(S0167-6105), 2005, 93: 891-904.
- [3] 赵彬, 林波荣, 李先庭, 等. 建筑群风环境的数值模拟仿真优化设计[J]. 城市规划设计, 2002, (2): 57-61.
- [4] Kazuya, Takahashi. Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation[J]. Energy and Buildings(S0378-7788), 2004, 36: 771-779.
- [5] 林波荣, 李晓锋, 朱颖心, 等. 绿化对室外热环境影响的模拟研究[C] //2005 年全国暖通空调专业委员会空调模拟分析学术交流会论文集, 2005: 340-348.
- [6] Shashua-Bar L, Hoffman M. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees[J]. Energy and Buildings(S0378-7788), 2000, 31: 221-33.
- [7] Feng N, Ma J, Lin B R, et al. Impact of landscape on wind environment in residential area[J]. J.Cent. South Univ. Technol(S11771-009-0186-0), 2009, 16(S1): 80-83.
- [8] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical application of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics(S0167-6105), 2008, 96: 1749-1761.
- [9] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- [10] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915-922.
- [11] GB/T 50378—2014, 绿色建筑评价标准[S].
- [12] 林波荣. 绿化对室外热环境影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

作者简介: 孙勇(1991)男, 山东人, 暖通空调专业, 硕士研究生, 主要从事建筑节能、建筑模拟方向的研究(sunyongy@126.com)。

指导教师: 潘毅群, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑模拟与仿真、绿色建筑技术方向的研究(yiqunpan@tongji.edu.cn)。