

建筑开口对自然通风效果及建筑能耗影响模拟分析

周军莉^{1,2}, 童宝龙¹, 张泉¹, 胡艳¹

1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082
2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070

摘要 通过 Airpak 软件模拟建筑开口对自然通风效果的影响, 通过计算流体力学 (CFD) 方法和能耗模拟软件 DesignBuilder 模拟建筑开口对建筑能耗的影响情况。以长沙典型年气象数据为基础, 分析了不同朝向和开口位置对建筑自然通风效果和能耗的影响。最后, 综合自然通风效果与建筑能耗大小, 提出了新的建筑设计综合评价指标, 利用这个指标对不同方案下的建筑进行了计算, 得出建筑朝向与开口位置最优组合方式。

关键词 CFD; 建筑朝向; 建筑开口; 自然通风; 建筑能耗

中图分类号 TU83

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.001

Simulation of the Influence of Building Openings on Natural Ventilation Performance and Building Energy Consumption

ZHOU Junli^{1,2}, TONG Baolong¹, ZHANG Quan¹, HU Yan¹

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China
2. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract This paper analyzes the influence of building openings on the natural ventilation performance and the building energy consumption. The software Airpak and the building energy consumption simulation software DesignBuilder are used in the simulation. The influences of the building's orientation and the opening's position on the natural ventilation performance and the building's energy consumption are analyzed according to the Changsha typical meteorological data. A new evaluation index is proposed to compare the design schemes with consideration of the performance of the natural ventilation and the building's energy consumption. The optimal scheme combination of the building's orientation and the opening's position is obtained by the index.

Keywords CFD; building's orientation; openings; natural ventilation; building energy consumption

0 引言

在能源、环境两大问题的压力下, 建筑节能越来越受到社会的关注, 作为建筑节能重要措施之一的自然通风技术也越来越受到人们的重视。建筑空间实现通风的唯一途径是通过建筑开口。关于建筑开口特性 (面积、开口位置) 对自然通风效果的影响, 国内外学者作了很多研究。Hassan 等^[1]通过计算流体力学 (CFD) 方法以及风洞实验对单一房间分析不同开口位置对自然通风效果的影响, 自然通风效果与两开口距离

有关, 开口距离远的通风效果优于开口距离近的通风效果。Favarolo 等^[2]通过 CFD 方法及实验方法对单一房间分析不同建筑开口构造对自然通风效果的影响, 单侧开口通风效果取决于开口的垂直位置及开口宽度。Dascalaki 等^[3]通过示踪气体方法研究单侧开口风压作用下通过开口处的有效通风量, 发现通过开口处的有效通风量与开口处垂直方向风速及风向有关。殷维^[4]通过耦合风压与热压的单侧大开口通风经验公式提出“自然通风等价节约用电度数”, 利用中国 4 个典型

收稿日期: 2012-05-22; 修回日期: 2012-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108165); 中央高校基本科研项目; 国家高科技研究发展计划 (863 计划) (2012AA052503); 湖南省自然科学基金杰出青年基金项目 (S2011J5050)

作者简介: 周军莉, 副教授, 研究方向为自然通风与建筑节能, 电子信箱: zjlhunu@126.com

气候区,对单侧大开口自然通风利用率与节能效果进行了评估,发现在单侧通风条件下,中国南方城市节能效果比较大。张雯^[5]通过 DOE-2 对杭州地区居住建筑的外窗在不同建筑朝向,建筑全年能耗值进行模拟计算,发现南北朝向建筑比东西朝向建筑全年能耗小。

尽管关于建筑开口特性对建筑通风与能耗的影响的报道很多,但是研究都是基于一个简单的房间模型,或者从一个方面考虑,比如从建筑开口对自然通风效果或者建筑开口对建筑能耗的影响,没有综合考虑在多个房间情况下,不同建筑朝向、室外风速及风向条件下,不同建筑开口位置对自然通风效果及建筑能耗的综合影响。因此,本文通过 CFD 方法及建筑能耗模拟软件 DesignBuilder,综合考虑以上因素,分析建筑模型在不同开口位置下的自然通风效果和全年能耗情况。

1 模拟分析

1.1 建筑模型

本文所取的建筑模型如图 1 所示,包括两个区域(Zone-1、Zone-2),其中 Zone-1 的面积为 17m^2 ,Zone-2 面积为 25m^2 。建筑开窗面积以设计规范中窗地比为依据,一般为 $1/6\sim 1/4$ ^[6]。因此,建筑窗户面积为 3m^2 (宽为 2m ,高为 1.5m),窗户为铝合金窗,开启时最大面积只有窗户总面积的一半,因此窗户有效面积为 1.5m^2 (宽 1m ,高 1.5m)。外墙为 240mm 加气混凝土墙,传热系数为 $0.37\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,铝合金窗玻璃厚 $3\sim 5\text{mm}$,传热系数为 $2.665\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

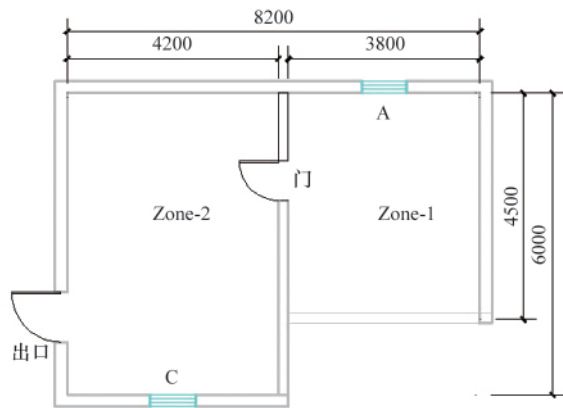


图 1 建筑模型尺寸 (AC 开窗组合,单位:mm)

Fig. 1 Building model (AC opening combination, unit: mm)

1.2 模拟方案

对于居住建筑,全年保持室内热舒适性方法一般有两种:一是当室外温度超过一定值或低于一定值时开启空调设备;二是当室外温度在人体可以容忍的热舒适范围之内时,通过自然通风的方式来改善室内热舒适性。由于人体心理和生理上的适应性,自然通风的房间,相对于采用空调设备的房间(舒适性温度一般为 26°C),可以使人容忍的舒适温度更

高。居住建筑的室内发热量相对于公共建筑和工业建筑来说很小,几乎可以忽略不计,室内负荷为经过围护结构传给室内的负荷。当室内发热量很小,室外温度超过 28°C 或低于 16°C 时,自然通风已经不能满足室内人体热舒适要求^[7],只有通过机械手段(开启空调)来满足室内热舒适性要求。

建筑朝向影响自然通风效果的同时也影响建筑能耗。基于本文建筑模型,考虑不同建筑朝向(即东、南、西、北)下 Zone-1 开窗与 Zone-2 开窗不同组合,见图 1—图 4。综合考虑自然通风效果与建筑能耗值,窗户组合方式为 AC,AD,BC,BD,模拟过程的建筑朝向以窗 AD 所在面朝向为基准。模拟工况为 32 种(通风工况 16 种,能耗模拟 16 种)。为了描述方便,以 XY-Z 表示各种组合方式,XY 为不同开口组合,Z 为建筑朝向(E,W,S,N)。如朝南向 AD 组合表示为 AD-N。

以长沙市典型气象年数据为依据,通过 Airpak 软件对建筑模型进行不同工况下室内通风效果模拟。为了保证 Zone-1 与 Zone-2 区域连通,在室内通风模拟过程中假设内门 Door 为开启状态。利用 DesignBuilder 对建筑模型在不同工况下的能耗进行模拟。

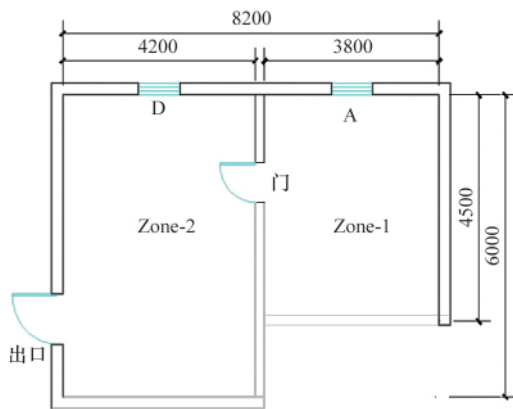


图 2 AD 开窗组合(单位:mm)

Fig. 2 AD opening combination (unit: mm)

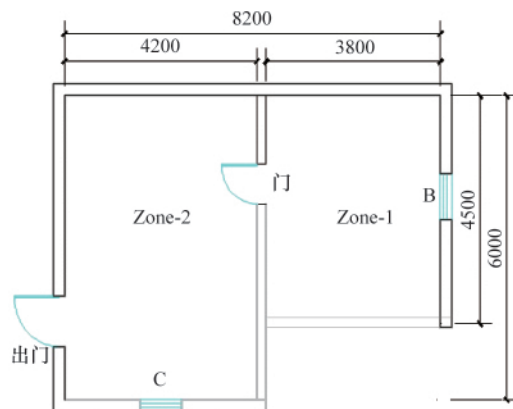


图 3 BC 开窗组合方式(单位:mm)

Fig. 3 BC opening combination (unit: mm)

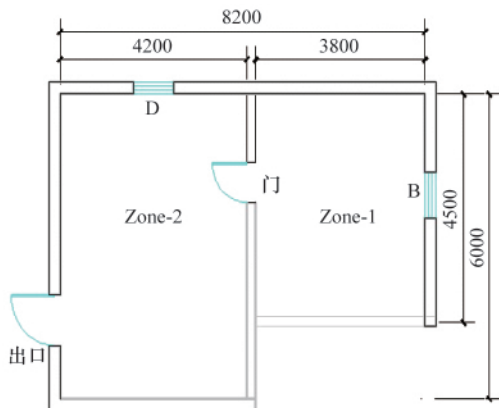


图4 BD 开窗组合方式 (单位:mm)
Fig. 4 BD opening combination (unit: mm)

以能耗模拟软件 DesignBuilder 中包含的长沙地区的典型年气象参数(逐时风速、风向及室外温度)为依据,首先通过 Excel 软件中的 VB 程序对逐时风速和风向进行统计分析,得出不同风向占全年风向百分率及不同风向下的平均风速(表 1),作为 Airpak 软件模拟室内通风效果的输入边界条件。其次对室外温度进行统计分析。当室外温度处于 16—28℃ 范围时,可以利用自然通风满足居住建筑室内热舒适性要求,占全年的 42.45%;而当室外温度处于 16—28℃ 以外范围时,由于不能通过自然通风来满足室内热舒适性要求,必须通过机械手段满足室内热舒适性要求,以此作为 Design-Builder 软件全年建筑能耗模拟初始条件。

表 1 长沙地区全年风速分布情况

Table 1 Distribution of annual wind speed in Changsha region

风向/(°)	平均角度/(°)	风向百分率/%	平均风速/(m·s ⁻¹)
45—135	90	12.36	2.17
135—225	180	44.82	2.52
225—315	270	6.94	2.30
315—45	0	20	2.23
无风	—	15.5	0

注:90°为北向,180°为西向,270°为南向,0°为东向。

Notes: 90° indicates the north direction; 180° the west direction; 270° the south direction and 0° the east direction.

1.3 通风效果模拟

Airpak 可以准确模拟通风系统的空气流动、空气品质、传热、污染和舒适度等,得到室内模拟的温度场、湿度场、速度场、空气龄场、污染物浓度场、PMV 场、PPD 场等,以对房间气流组织、热舒适性和室内空气品质(IAQ)进行综合评价^[8]。

进行数值模拟的最重要的步骤就是在控制计算花费时间与精度的条件下,对模型进行合理的网格划分。Airpak 软件支持四面体与六面体网格划分,本文模型规则简单,因此采用结构化六面体网格,并且对开口位置进行适当的网格加

密。划分后网格数为 35065,采用 RNG $k-\xi$ 湍流模型,用 SIMPLE 算法对控制方程进行求解。

由于地表摩擦作用,室外风速随高度递增^[9]。风速沿高度方向变化规律可以由指数方程表示,即

$$V(z) = V(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中, $V(z)$ 为距地面 z 高度处的风速, m/s; $V(z_0)$ 为参考 z_0 处风速(取表 1 统计的不同朝向平均风速), m/s; z_0 为参考高度,取气象台风速测量高度 10m; α 为粗糙度系数,假定城市中心 α 取 0.4。

当室外温度处于 16—28℃ 时,自然通风可以满足室内热舒适性要求,而且居住建筑的自然通风驱动力主要是风压作用,因此在通风模拟过程中不考虑热压作用,只考虑风压作用下的室内自然通风效果。

平均空气龄 (Mean Age of Air, MAA) 可以衡量室内通风换气效果, MAA 也被广泛用于自然通风效果的衡量^[10]。本文以平均空气龄衡量室内自然通风效果。通过 Airpak 软件模拟 4 种不同开窗组合、4 个不同建筑朝向、4 个不同风向工况下的室内平均空气龄。由于考虑不同工况下的全年室内通风效果,提出全年空气龄 \overline{MAA} , 其公式为

$$\overline{MAA}_{xy-z} = \frac{\sum MAA_{xy-z} \cdot n}{\sum n} \quad (2)$$

其中, \overline{MAA}_{xy-z} 为不同组合下的全年空气龄值, s; MAA_{xy-z} 为模拟的不同组合下空气龄值, s; n 为不同风向所占全年风向百分率, 见表 1。

图 5 为不同建筑朝向、不同建筑开口下全年室内通风效果情况。由图 5 可以看出, 无论建筑朝什么方向都是 AC 组合通风效果最好, 其次为 BC、BD, 效果最差的是 AD。这说明为了使建筑室内得到良好的通风效果, 两开口应该开在不同朝向的墙上, 形成“穿堂风”效果。而当两开口位置在同一朝向时, 无论建筑朝什么方向, 室内自然通风效果都是最差的。室内通风效果最好的组合形式为 AC-W, 最差的组合形式为 AD-E。

为了进一步了解建筑开口对室内通风效果的影响, 给出

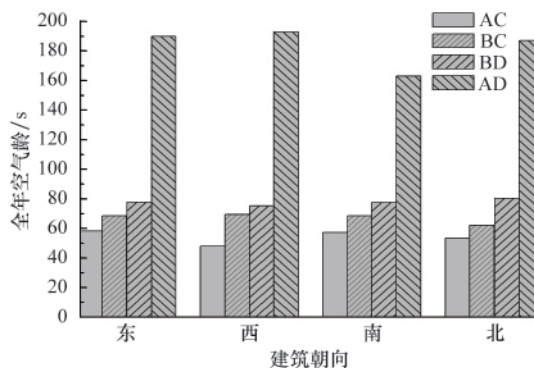


图 5 不同工况组合下的 \overline{MAA}

Fig. 5 \overline{MAA} under various conditions

了最好组合形式 AC-W 的室内 MAA 分布云图(图 6)以及最差组合形式 AD-W 的室内 MAA 分布云图(图 7)。可以看出,图 7 云图上暖红色区域明显大于图 6 云图上暖红色区域,两种工况下 MAA 明显不同,差值很大。

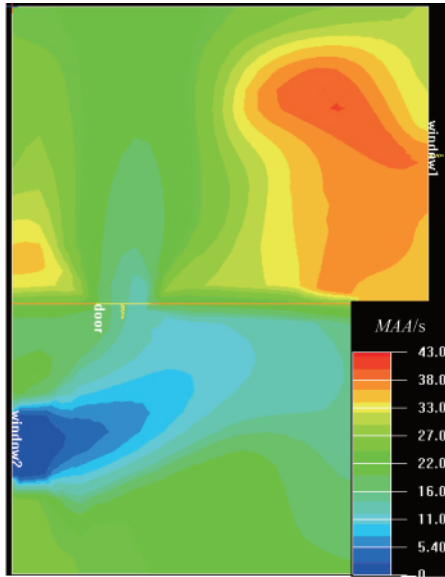


图 6 AC-W 室内 MAA 分布云图

Fig. 6 MAA distribution of AC-W combination

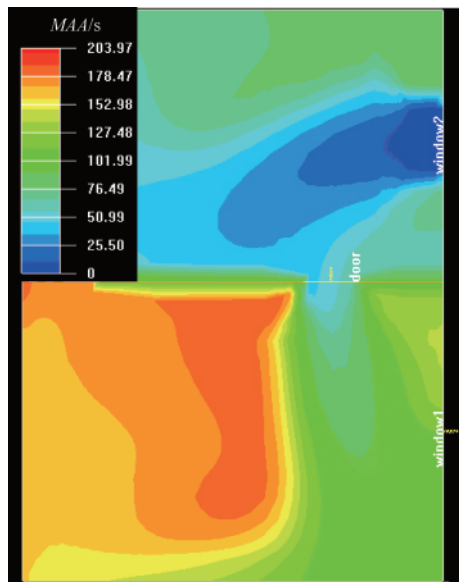


图 7 AD-E 室内 MAA 分布云图

Fig. 7 MAA distribution of AD-E combination

1.4 能耗模拟分析

DesignBuilder 软件^[1]针对建筑能耗动态模拟程序(Energy plus)综合用户图形界面模拟软件,建模环境友好,可以模拟全年建筑能耗值。

由于本文研究不同朝向建筑开口位置不同时的建筑能耗值,所以对模拟过程中的室内人员密度和照明功率,都

以 DesignBuilder 自带的居住建筑运行时间进行设置,也不考虑建筑窗户内外遮阳情况。

以不同建筑朝向未开窗下能耗为基准,通过 DesignBuilder 软件模拟不同建筑朝向和开窗组合形式下,开窗位置所增加的全年能耗值。

从图 8 可以看出,在不同建筑朝向下,建筑开窗位置不同,所增加的全年能耗值也不一样。从总体上看,无论什么开口组合形式,建筑朝南时,开窗所增加的全年能耗相对于其他朝向来说最小。AD-S 组合形式下的建筑能耗最小,AD-E 组合形式下的建筑能耗值最大。

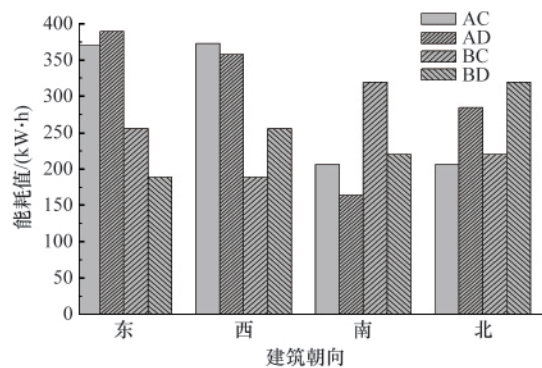


图 8 不同工况组合下的能耗值

Fig. 8 Energy consumption distribution under various conditions

2 综合评价分析

文献[4]通过提出“自然通风等价节电度数”指标来考虑自然通风条件下的节能效果。文献[12]以室内通风量来衡量自然通风效果。文献[13]和文献[6]分析了不同开口情况对建筑能耗的影响。综上可以看出,对于自然通风的研究都是基于单一的角度进行分析,没有综合考虑建筑全年通风及能耗的影响。

本文分析了不同建筑开口对自然通风效果和全年能耗值的影响,可以看出,AD-E 无论是对于自然通风效果还是全年建筑能耗值,都是最坏的组合方式。因此,为了综合评价不同建筑开口对居住建筑自然通风效果与建筑能耗影响,以 AD-E 组合为基准条件,提出综合评价指标 S_z ,其定义为

$$S_z = \frac{|S_{XY-Z} - S_{AD-E}|}{S_{AD-E}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, S_{XY-Z} 为

$$S_{XY-Z} = \frac{\overline{MAA}_{XY-Z}}{\overline{MAA}_{AD-E}} \cdot f + \frac{EC_{XY-Z}}{EC_{AD-E}} \cdot (1-f) \quad (4)$$

其中, \overline{MAA}_{XY-Z} 为不同组合的全年平均空气龄, $s; f$ 为自然通风占全年百分数,%; EC_{XY-Z} 为不同组合下的全年能耗值, $kW \cdot h$; S_{XY-Z} 为考虑全年通风效果与能耗值的综合指标。

图 9 为不同建筑朝向下的 S_z 值。从图 9 可以看出,当建筑朝南时,综合评价指标 S_z 最大,其次是北向、西向、东向。

图 10 为在建筑朝向最好(朝南)的情况下,不同开窗组合时的 S_z 值。从图 10 可以看出,AC 组合下,综合指标值 $S_z=56.26%$;BD 组合下, $S_z=49.8%$;AD 组合下, $S_z=39.06%$;BC 组合下, $S_z=36.87%$ 。这说明在建筑朝南向时,开口的位置以形成穿堂风效果的情况下全年通风效果及能耗最优。

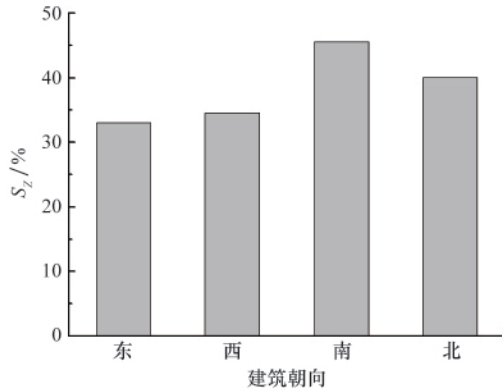


图 9 不同建筑朝向时的 S_z 值

Fig. 9 S_z distribution for various orientations

由图 10 还可以看出,AD 组合和 BC 组合综合指标值很接近 (AD 组合下 $S_z=39.06%$, 略大于 BC 组合下的 $S_z=36.87%$)。因此,为了进一步说明 AD 与 BC 组合的优劣,绘制

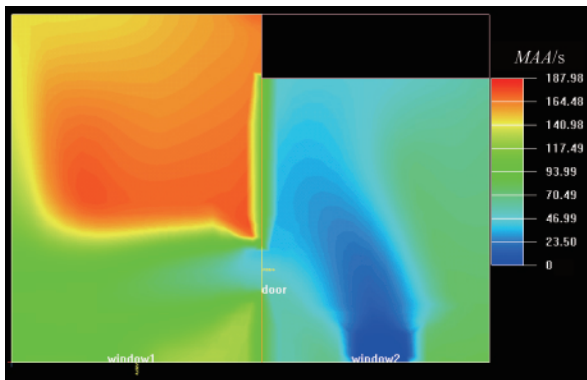


图 11 AD-S 室内 MAA 分布云图

Fig. 11 MAA distribution in AD-S combination

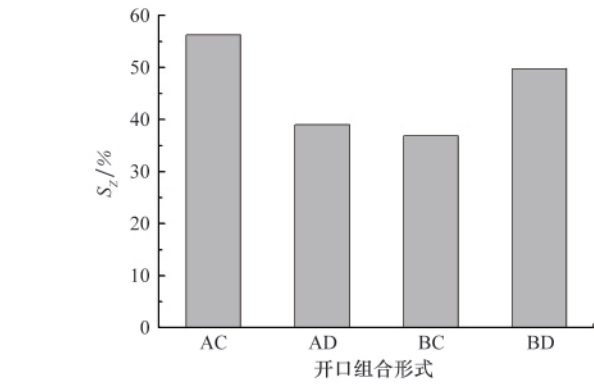


图 10 XY-S 组合下的 S_z 值

Fig. 10 S_z distribution for XY-S combinations

AD-S 和 BC-S 组合下的室内空气龄分布云图 (图 11 和图 12)。可以看出,BC 组合下的室内空气龄(49 s)小于 AD 组合下的室内空气龄(187 s),说明 BC 组合更有利于室内通风效果。但从图 8 可以看出,BC 组合下的建筑能耗大于 AD 组合下的建筑能耗。因此综合起来优先考虑建筑朝南,两开口布置在南北朝向墙侧,形成“穿堂风”;其次是两开口布置在向东和南向墙侧,形成“穿堂风”;而不考虑将两开口布置在同一侧以及东向和北向朝向。

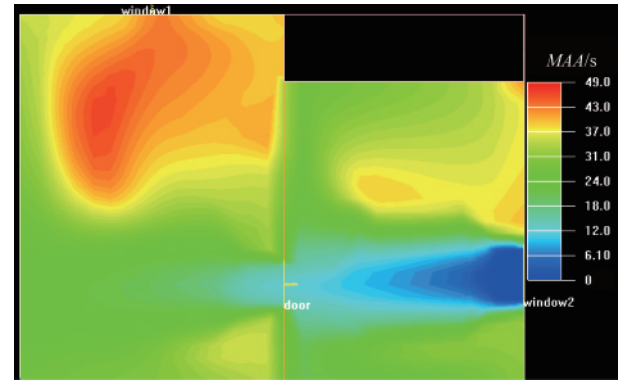


图 12 BC-S 室内 MAA 分布云图

Fig. 12 MAA distribution in BC-S combination

3 结论

本文以长沙市典型年气象数据为依据,以 Airpak 软件与 DesignBuilder 软件为工具,分析多个空间耦合下全年自然通风效果及全年建筑能耗情况。

通过对典型年气象数据进行统计分析,得出自然通风占全年百分数、全年不同朝向风速平均值以及风向百分率。通过 Airpak 软件模拟不同风向、风速、朝向以及开口组合下室内全年自然通风效果,以平均空气龄为指标,考虑全年室内通风效果情况。不同建筑朝向下,开口位置应优先使建筑产生“穿堂风”效果。

通过建筑能耗模拟软件 DesignBuilder 模拟不同朝向和不同开口组合形式的建筑能耗,考虑全年建筑开口所增加的

额外能耗。为了使建筑能耗最小,应优先考虑建筑朝南向,开口位于同侧南向墙上。

最后,综合考虑全年室内通风效果与建筑能耗,提出以综合评价指标 S_z 分析不同朝向和不同开口组合形式下的建筑全年自然通风效果与能耗。建筑朝南向时,综合评价指标 S_z 最大,其次是朝北向、东向、西向。当建筑朝南向时,开口 AC 组合综合评价指标 S_z 最大,约为 56.26%;其次是 BD 组合, S_z 约为 49.8%;AD 组合的 S_z 约为 39.06%;BD 组合的 S_z 约为 36.87%。

参考文献 (References)

[1] Hassan M A, Guirguis N M, Shaalan M R, et al. Investigation of effects

- of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings[J]. *Desalination*, 2007, 209(1/2/3): 251-260.
- [2] Favaro P A, Manz H. Temperature-driven single-sided ventilation through a large rectangular opening[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(5): 689-699.
- [3] Dascalaki E, Santamouris M, Argiriou A, *et al.* On the combination of air velocity and flow measurements in single sided natural ventilation configurations[J]. *Energy and Buildings*, 1996(24): 155-165.
- [4] 殷维. 建筑自然通风利用率预测与节能评估模型研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
Yin Wei. Potential estimation and energy efficient evaluation of natural ventilation in buildings[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [5] 张雯. 居住建筑外窗的节能设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Zhang Wen. Energy efficiency design of residential building windows[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB50096-1999 (2003年版): 住宅设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50096-1999 (2003): Design code for residential buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [7] Yin Wei, Zhang Guoqiang, Yang Wei, *et al.* Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(3): 338-344.
- [8] Wong N H, Chin H K. An evaluation exercise of a wind pressure distribution model[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(3): 291-309.
- [9] Liu X P, Niu J L, Kwok K C S, *et al.* Investigation of indoor air pollutant dispersion and cross-contamination around a typical high-rise residential building: Wind tunnel tests [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1769-1778.
- [10] Gan G. Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation[J]. *Energy and Buildings*, 2000, 31(31): 65-73.
- [11] 刘鑫, 张鸿雁. EnergyPlus 用户图形界面软件 DesignBuilder 及其应用 [J]. 西安航空技术高等专科学校校报, 2007, 25(5): 34-37.
Liu Xin, Zhang Hongyan. *Journal of Xi'an Aeronautical College*, 2007, 25(5): 34-37.
- [12] Niachou K. Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(8): 1373-1382.
- [13] 秦兴红. 山东地区办公建筑自然通风的节能分析及舒适性探讨[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
Qin Xinhong. Research of energy saving and comfort of natural ventilation in office building of Shandong region [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010.
- [14] 石卉. 门窗不同开度下自然通风对室内空气品质及能耗的影响[C]// 全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集. 重庆: 重庆大学学报编辑部, 2008: 45-52.
Shi Hui. Natural ventilation on indoor air quality and energy consumption under the doors and windows of different opening [C]// National HVAC & R 2008 Annual Conference Proceedings. Chongqing: Editorial Department of Journal of Chongqing University, 2008: 45-52.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)

·学术动态·

“2012 年中国沼气学会学术年会”征稿

“2012 年中国沼气学会学术年会”由中国沼气学会、同济大学和上海市农村能源行业协会主办,大会定于 2012 年 10 月 17-20 日在上海市召开。

征稿范围:(1) 沼气建设与节能减排(政策措施、资源评价、国际经验);(2) 沼气工程原料拓展、收集、储存和预处理;(3) 厌氧发酵微生物学及过程代谢机理;(4) 规模化沼气工程新装备、新工艺、关键技术和过程控制;(5) 规模化沼气工程发酵残渣(即沼渣沼液)资源化和深化处理;(6) 沼气工业化利用如热电联产、发电并网、提纯净化和工业化转化等;(7) 农村户用沼气新技术(新型池、新工艺等)、产业化(新材料、新装备)及可持续管理(例如地方管理案例)。

全文截稿日期:2012 年 7 月 31 日

联系电话:010-59199381、59199382

电子信箱:cbs_1980@sina.com

大会网站:http://www.biogas.com.cn/Z_Show.asp?ArticleID=2102