

# 北京地区居住建筑夏季 自然通风实测研究

清华大学 李 严<sup>☆</sup> 李晓锋

**摘要** 采用 CO<sub>2</sub> 示踪气体浓度衰减法,以北京市区 8 户住宅为研究对象,对卧室夜间通风情况进行了测试,得到了在不同门窗开关情况下的房间通风量。结果表明,在门窗关闭情况下空气渗透换气量较小,不能满足室内新风量的需求。分析了单侧通风情况下通风量与室内外温差、室外风速和风向的关系,并用实测值与 Warren 提出的经验公式的计算值进行了对比,结果显示当开窗位于侧风面和背风面时,计算值普遍高于实测值,应对经验公式进行修正。

**关键词** 居住建筑 自然通风 单侧通风 通风量 风速 风向

## Field testing of natural ventilation of residential buildings in Beijing in summer

By Li Yan<sup>★</sup> and Li Xiaofeng

**Abstract** Using the CO<sub>2</sub> tracer gas concentration decay method, taking eight residences in Beijing region as research subjects, measures and obtains air changes through exterior windows in the bedroom at night under different open-closed conditions of door and windows. The results indicate that the air infiltration through the gaps of windows and doors can not satisfy the requirement of indoor air quality when the windows and doors closed. Analyses the relationship between the single-side ventilation rate and temperature difference of indoor and outdoor, outdoor wind speed and direction, and compares the measured ventilation rate with the results from the empirical formulas presented by Warren. The results show that when the windows opened are in the crosswind side or leeward side, the calculated values are basically larger than the measured values, and the empirical formulas should be modified.

**Keywords** residential building, natural ventilation, single-side ventilation, ventilation rate, wind speed, wind direction

<sup>★</sup> Tsinghua University, Beijing, China

①

### 0 引言

通风是影响住宅居住品质至关重要的一个因素,对居住环境的健康和建筑的能耗都有重要的影响。一般来讲,居室是一个相对封闭的空间,加之能够挥发大量有害物质的各种建筑材料、装饰材料、人造板材家具等民用化工产品进入室内,造成室内污染物浓度比室外高 2~5 倍,严重的高达数十倍以上,因此若不对其进行稀释将严重影响居住者的健康<sup>[1]</sup>。良好的通风是十分简便且行之有效的稀释室内污染物的措施,在提供新鲜空气保证供氧量的同时,排出室内污染物,大幅度降低室内微生物密度,维持健康的居住环境。

我国北方地区现有住宅通风方式主要为自然通风和空气渗透,依靠热压和风压作用形成的内外压力差驱动室内外空气交换。建筑物是否能够形成良好有效的自然通风,不仅取决于当地的气候特点和周边的环境,建筑的

外形及窗洞设计与施工同样是影响建筑通风效果的重要因素。

近年来随着建筑节能工作的开展,建筑的气密性越来越得到重视。同时随着建筑技术的发展和空调的日益普及,住宅的气密性能越来越好,依靠热压、风压实现室内通风换气较难保证,尤其是对空调季节门窗紧闭的住宅,门窗渗透的通风量能否满足人们对空气质量的要求,目前相关的实测数据及研究成果并不多见,因此有必要对其自然通风现状进行现场测试。笔者对北京市区 8 户住宅夏季室内

①<sup>☆</sup> 李严,女,1989年6月生,大学,助理工程师  
100083 北京市海淀区中关村东路8号东升大厦B座906室  
(010) 82526161-367  
E-mail: liyan@thubee.com  
收稿日期:2013-09-06  
一次修回:2013-10-24  
二次修回:2013-11-06

通风情况进行了测试分析。

## 1 实测方法

换气次数是评价室内空气质量的常用指标和估算房间通风量的重要依据,在国内外得到了广泛应用。各国对建筑的最小通风换气量都有明确的要求。GB 50096—2011《住宅设计规范》要求无集中新风供应系统的住宅新风换气次数宜为 $1\text{ h}^{-1}$ [2];DBJ 11—602—2006《居住建筑节能设计标准》要求北京地区住宅冬季通风换气次数不低于 $0.5\text{ h}^{-1}$ ,夏季利用空调机降温时换气次数不低于 $1\text{ h}^{-1}$ [3];GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》对设置新风系统的居住建筑所需最小新风换气量也有明确要求。

建筑的无组织通风受到风压、热压等众多因素的影响,风速、流向随外界环境不断变化,要准确测量室内通风换气

$$C_{in}(k) = \left\{ FR - \frac{n}{3600} V [C_{in}(k-1) - C_{out}] \right\} \frac{\Delta\tau}{V} + C_{in}(k-1) \quad (2)$$

式中  $n$  为换气次数,  $\text{h}^{-1}$ ,  $n=Q/V$ ; 3600 为换算系数,  $\text{s}/\text{h}$ ;  $\Delta\tau$  为  $\tau_k$  时刻与  $\tau_{k-1}$  时刻的间隔时间,  $\text{s}$ 。

利用最小二乘法进行曲线拟合求解,计算出一段时间内最符合实际情况的换气次数  $n$ 。

为减小波动对计算结果的影响,选取  $\text{CO}_2$  浓度变化

$$C'_{in}(k) = \{ FR - nV [C'_{in}(k-1) - C_{out}] \} \frac{\Delta\tau}{V} + C'_{in}(k-1) \quad (3)$$

采用最小二乘法进行非线性规划,将一个时间段划分为若干个时间间隔,最小二乘法的目标函数为

$$\min \sum_{k=0}^m [C_{in}(k) - C'_{in}(k)] \quad (4)$$

联立式(2)~(4)可以求解出一段时间内房间的换气量。在计算过程中需要反复调整换气次数  $n$ ,直到求得最小二乘法的目标函数最小值,满足此条件的换气次数  $n$  即为该时间段房间的换气次数。

根据文献[6]给出的人体代谢率与氧气呼入量之间的经验公式计算人体  $\text{CO}_2$  释放量,即

$$M = \frac{21 \times (0.23RQ + 0.77)Q_{O_2}}{A_D} \quad (5)$$

式中  $M$  为人体单位表面积的新陈代谢率,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $RQ$  为呼吸商,是呼吸释放的  $\text{CO}_2$  和吸收的  $\text{O}_2$  的比值,与人的膳食结构、活动强度、健康状况等有关,一般轻体力劳动取 $0.83$ ;  $Q_{O_2}$  为人体耗氧率,  $\text{mL}/\text{s}$ ;  $A_D$  为人体表面积,  $\text{m}^2$ ,与人员身高和人员体重有关,根据 DuBois D 提出的人体表面积计算模型  $A_D = aH^b W^c$  (其中  $a, b, c$  为模型常数,  $a=0.202$ ,  $b=0.725$ ,  $c=0.425$ ,  $H$  为人员身高,  $\text{m}$ ,  $W$  为人员体重,  $\text{kg}$ ) 计算[6]。

但由于文献[6]给出的公式是基于国外人群实验所得的经验公式,而国内外人体表面积的计算模型、人群饮食习惯、活动强度等均有所差异。齐美薇等人对应用该经验公式计算中国人  $\text{CO}_2$  释放量的适用性和可靠性进行了实验

量,可以利用质量平衡与能量平衡的基本原理。本文采用示踪气体浓度衰减法定量测量房间的换气次数[4-5],测试选择的示踪气体为  $\text{CO}_2$ ,以睡眠状态下的人体为稳定的  $\text{CO}_2$  释放源。

示踪气体法测量房间通风量的原理是基于示踪气体满足质量守恒方程。当室内仅有人体作为  $\text{CO}_2$  释放源时,根据质量守恒方程,室内  $\text{CO}_2$  的变化量为

$$V \frac{dC_{in}}{d\tau} = Q(C_{out} - C_{in}) + FR \quad (1)$$

式中  $V$  为房间体积,  $\text{m}^3$ ;  $C_{in}$  为室内  $\text{CO}_2$  体积分数,  $10^{-6}$ ;  $\tau$  为时间,  $\text{s}$ ;  $Q$  为通风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{out}$  为室外  $\text{CO}_2$  体积分数,  $10^{-6}$ ;  $FR$  为人员  $\text{CO}_2$  释放量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

对式(1)积分,可以得到房间内  $\tau_k$  时刻的  $\text{CO}_2$  浓度  $C_{in}(k)$  与  $\tau_{k-1}$  时刻  $\text{CO}_2$  浓度  $C_{in}(k-1)$  的关系如下:

较为稳定的时间段进行求解(本实验中,选取人们夜间睡眠时段,为 $24:00-06:00$ )。每隔  $\Delta\tau$ ,  $\text{CO}_2$  浓度传感器会记录一次  $\text{CO}_2$  浓度。设  $\tau_k$  时刻房间内预测的  $\text{CO}_2$  浓度为  $C'_{in}(k)$ ,  $\tau_{k-1}$  时刻房间内预测的  $\text{CO}_2$  浓度为  $C'_{in}(k-1)$ , 则

研究,实验得出使用该式计算  $\text{CO}_2$  释放量时对于中国女性建议乘以 $0.75$ 的修正因子[7]。本文采用同样的实验方法测试得出适用于中国男性的修正因子为 $0.9$ 。

在测试之前对房间内  $\text{CO}_2$  浓度的均匀性进行了验证,采用多点测试的方法,在房间的不同位置分别布置5台  $\text{CO}_2$  浓度记录仪,连续记录并比较一段时间内房间各处的  $\text{CO}_2$  浓度,比较同一时间段内的  $\text{CO}_2$  浓度。将房间按平面均匀分成4个区域,测点1,2,3,4分别布置于这4个区域的中心,测点5布置于房间的中心,测点布置高度约为房间层高的一半( $1.5\text{ m}$ 高),记录并对比各测点的  $\text{CO}_2$  浓度,判断房间内的  $\text{CO}_2$  浓度分布是否均匀。分别用一段时间内各测点的  $\text{CO}_2$  浓度和房间的平均浓度根据式(2)~(4)求解房间的换气次数,比较各计算结果,判断由单个测点测得的换气次数是否能代表房间整体的换气次数。测试结果表明,房间不同位置的  $\text{CO}_2$  浓度并无明显差别,不同测点处求解出的换气次数相近,与采用房间平均  $\text{CO}_2$  浓度求解出的房间换气次数相比,相对误差均小于 $10\%$ 。因此,在之后的连续测试中在每个测试房间布置1台  $\text{CO}_2$  浓度记录仪,采用房间中1个测点的  $\text{CO}_2$  浓度来代表整个房间的平均  $\text{CO}_2$  浓度,从而计算整个房间的换气次数。

## 2 实测对象

实测对象为位于北京市区的8户板式居民住宅,建筑基本信息如表1所示,建筑周边环境如图1所示,图中框线内标记位置即为被测住宅所在位置。

表1 实测建筑的基本信息

住户	小区位置	建筑年代	层数	被测住户楼层	卧室朝向	卧室体积/m <sup>3</sup>	窗户材质
A	海淀区	建于1992年,2012年门窗改造	6层	3层	南	54	塑钢窗
B	昌平区	2010年	22层	8层	南	45	塑钢窗
C	昌平区	2005年	6层	5层	南	39	塑钢窗
D	海淀区	2005年	6层	6层	南	68	塑钢窗
E	海淀区	20世纪70年代	5层	5层	北	30	木窗
F	海淀区	20世纪90年代末,2009年窗户改造	5层	5层	南	46.8	塑钢窗
G	海淀区	建于1992年,2012年门窗改造	6层	3层	南	54	塑钢窗
H	海淀区	1996年	6层	5层	南	30	塑钢窗

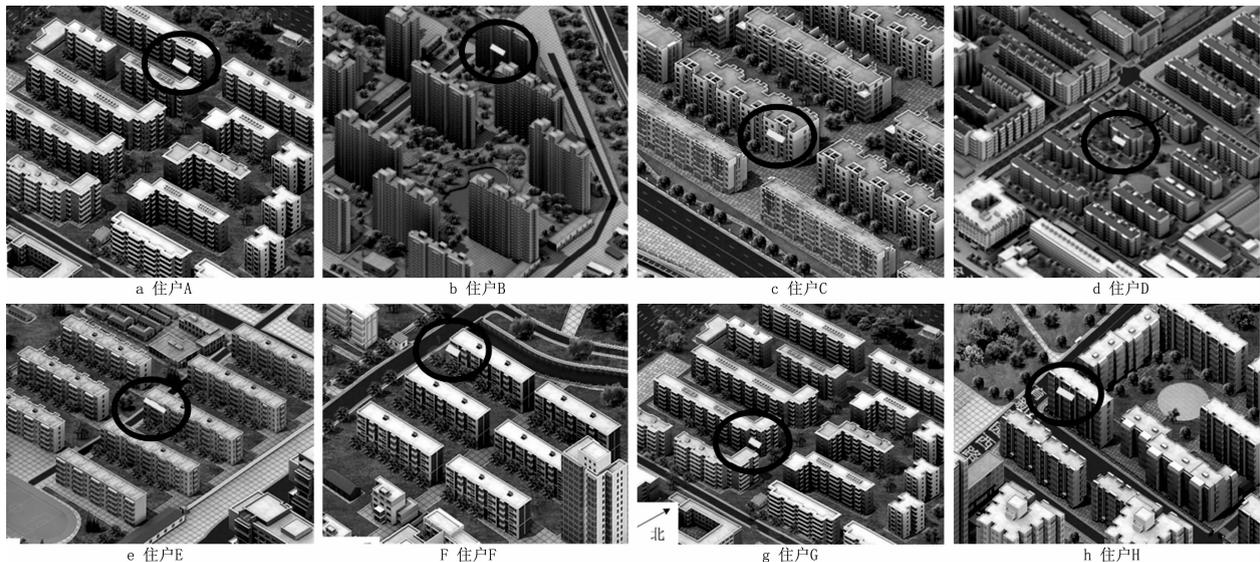


图1 实测住宅周边环境

在住宅的卧室中摆放 CO<sub>2</sub> 浓度记录仪和温度自记仪,连续记录人们在夜间睡眠状态下(24:00—06:00)卧室的 CO<sub>2</sub> 浓度值和温度值,从而计算出换气次数。本测试采用 Telaire7001 型 CO<sub>2</sub> 检测仪(连接 HOBO 记录仪)和天建华仪的温度自记仪,仪器布置在同一位置,摆放位置不靠近窗户且不靠近人体(如图2所示),一个房间摆放1台,摆放高度为房间高度的一半。测试前对将要用到的若干个 CO<sub>2</sub> 检测仪和温度自记仪进行校准。

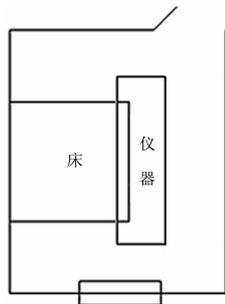


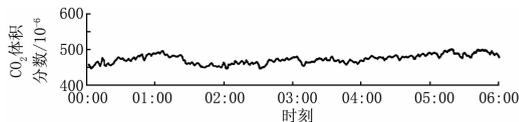
图2 房间内测点布置示意图

测试期间由住户记录下每晚室内的人数及卧室门窗的开关情况。

### 3 实测分析

#### 3.1 室外 CO<sub>2</sub> 浓度

计算房间通风换气量时,根据式(1),需要用到室外 CO<sub>2</sub> 浓度数据,所以测试期间对室外 CO<sub>2</sub> 浓度进行了连续监测,测试结果发现夜间 CO<sub>2</sub> 浓度随时间无明显变化,且每晚的 CO<sub>2</sub> 浓度亦没有差别。图3显示了某天夜间室外 CO<sub>2</sub> 浓度的变化。

图3 夜间室外 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化

根据测试结果,取本次测试夜间室外 CO<sub>2</sub> 体积分数平均值  $470 \times 10^{-6}$  作为室外 CO<sub>2</sub> 浓度计算值。

#### 3.2 门窗关闭条件下的空气渗透

图4显示了某个夜晚住户 A 和 B 室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化。由图4可以看出,在睡眠状态下门窗关闭,CO<sub>2</sub> 浓度曲线平缓上升,接近线性,可见换气次数较小且没有明显变化,受室外气象因素的影响较小;早晨起床开门后门窗开启,室内 CO<sub>2</sub> 浓度迅速降低至初始状态。采用式(2)~(5)计算得到住户 A 该晚的换气次数为  $0.17 \sim 0.22 \text{ h}^{-1}$ ,住户 B 为  $0 \sim 0.03 \text{ h}^{-1}$ 。

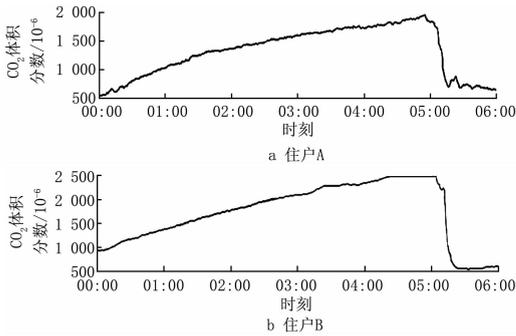


图4 门窗关闭条件下室内 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化

采集并分析在测试期间全部门窗关闭条件下的室内 CO<sub>2</sub> 浓度测试数据,计算房间的换气次数,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,住户 E 的换气次数明显高于其他住

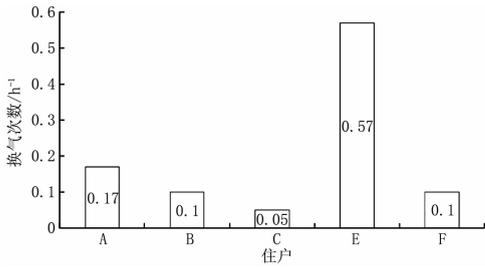


图5 门窗关闭条件下房间换气次数测试结果

宅,这是因为住户 E 建于 20 世纪 70 年代,采用的是木窗,而其余 4 户的窗户均是塑钢窗,且均安装于 2005 年之后。而对于这 4 户装有塑钢窗的住宅,换气次数和年代没有表现出明显的相关性,在门窗关闭条件下空气渗透换气量都较小,平均换气量均低于 10 m<sup>3</sup>/h,最大换气量亦不高于 15 m<sup>3</sup>/h。

由上述测试结果可见,在门窗关闭条件下,房间的换气量明显不满足国家标准<sup>[2]</sup>中对新风量的要求,尤其是对空调季节门窗紧闭的住宅,有必要采用有组织的通风换气来满足室内通风需求。

### 3.3 关门开窗条件下的通风情况

图 6 显示了在关门开窗条件下某个夜晚住户 B 和 C 室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化。由图 6 可以看出,室内人员入睡后,室内 CO<sub>2</sub> 浓度无大幅度上升,但由于开窗时换气次数受室外气象条件的影响较大,因此曲线的波动大于关窗情

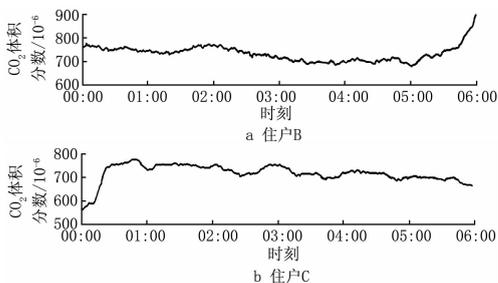


图6 关门开窗条件下室内 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化

况。

分析测试期间全部关门开窗条件下室内 CO<sub>2</sub> 浓度的测试数据,将每晚测得的 CO<sub>2</sub> 浓度曲线进行分段拟合,分别计算出各时间段内房间的换气次数,再进行平均得到整晚房间的换气次数,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,关门开窗条件下,房间的平均通风换气次数约为 2 h<sup>-1</sup>,较门窗关闭情况有明显提高,基本能满足室内新风量的需求。

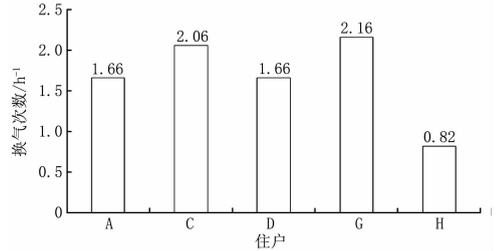


图7 关门开窗条件下房间换气次数测试结果

### 3.4 单侧通风换气量的定量分析

关门开窗条件下,房间的通风模式属于单侧通风,开启的外窗同时作为空气的进口和出口,使得开口处的空气流动变得较复杂,因此单侧通风换气次数的预测比较困难。另外,风速的波动也是一个不可忽略的因素,在温差和风压两者作用下的单侧通风的流场一直没有很好地解决。

关于单侧通风的模型不好建立,相关的公式只有很少的几个,Marcello 等人进行了大规模实验,证明了 Warren 提出的公式是其中最好的<sup>[8]</sup>。

Warren 提出了两个表达式,一个是温差导致的,另一个是风压导致的<sup>[8]</sup>:

$$Q_w = 0.025A_{\text{eff}}v_w \quad (6)$$

$$Q_r = \frac{1}{3}A_{\text{eff}}C_d \sqrt{\frac{\Delta THg}{T_{\text{av}}}} \quad (7)$$

式(6),(7)中  $Q_w$  和  $Q_r$  分别为由风压和温差引起的通风量, m<sup>3</sup>/s;  $A_{\text{eff}}$  为实际开口面积, m<sup>2</sup>;  $v_w$  为室外风速, m/s;  $C_d$  为系数,通常取 0.6;  $\Delta T$  为室内外温差, K;  $H$  为开口的高度, m;  $g$  为自由落体加速度, m/s<sup>2</sup>;  $T_{\text{av}}$  为室外平均气温, K。

在结合了温差和风压两种影响的情况下,Warren 建议分别计算两者并取较大的那个值。本文采用现场实测同期的气象条件,用 Warren 给出的公式进行计算,用计算值与实测值进行对比验证。

根据式(6)和(7),由风压与热压引起的通风量分别与室外风速  $v_w$  和室内外温差的平方根  $\sqrt{\Delta T}$  成正比。因此,为便于基于实测气象条件对各住宅的计算与实测数据进行对比,将式(6)和(7)变换形式如下:

$$\frac{Q_w}{0.025A_{\text{eff}}} = v_w \quad (8)$$

$$\frac{3Q_r}{A_{\text{eff}}C_d} \sqrt{\frac{T_{\text{av}}}{Hg}} = \sqrt{\Delta T} \quad (9)$$

采用实测的室外温度、开口面积、通风量等数据,分别用 Warren 公式对热压和风压作用下  $\sqrt{\Delta T}$  与  $v_w$  的值进行计算,并与实测值进行对比,结果如图 8~11 所示。

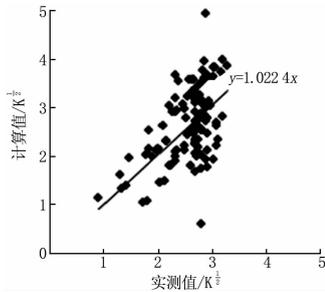


图 8 实测温差的平方根与计算值的对比

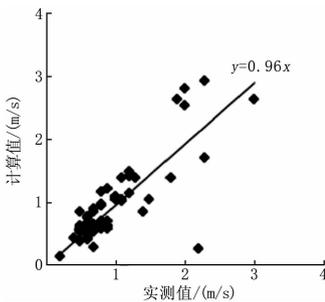


图 9 开窗位于迎风面时实测风速与计算值的对比

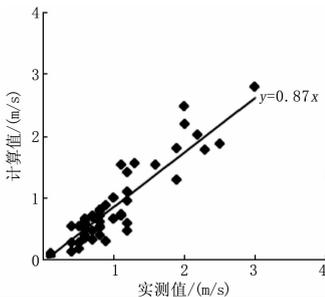


图 10 开窗位于侧面时实测风速与计算值的对比

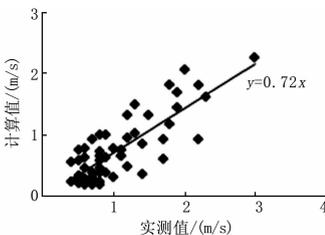


图 11 开窗位于背风面时实测风速与计算值的对比

对实测值和计算值进行多元线性回归分析,结果表明,用 Warren 温差公式计算得到的预测值及当开窗位于迎风面时利用其与风速有关的公式计算得到的预测值与实测值的偏差均小于 5%,在可接受范围之内。

由于室外风向是影响室内外压力差的重要因素,对通风量有重要影响,因此本文同时对风向与通风量的关系进

行了分析。利用 Warren 公式分别计算开口位于侧面和迎风面时的单侧通风量预测值并与实测值进行对比,结果表明当开窗位于侧面和背风面时,单侧通风量的计算值普遍高于实测值,计算值与实测值的偏差分别为 15% 和 39%。

#### 4 结论

采用  $\text{CO}_2$  示踪气体浓度衰减法,以睡眠状态下的人体为稳定的  $\text{CO}_2$  释放源,以北京市区 8 户住宅的卧室为研究对象,测试了在不同门窗开关情况下的房间通风量,并分析了通风量与室内外温差、室外风速和风向的关系。

测试结果表明,在门窗关闭情况下空气渗透换气量较小,房间的换气量明显不满足室内新风量的需求,尤其是对空调季节门窗紧闭的住宅,有必要采用有组织的通风换气来满足室内通风需求并维持良好的室内空气质量。

对于关门开窗的单侧通风,验证了 Warren 提出的公式的适用性,并结合测试数据,在原公式的基础上考虑了风向对单侧通风换气量的影响。

应用经验公式计算换气次数与现场测试结果有所差别,经验公式计算的结果只能反映其模型所代表的普遍规律,但实际使用情况比较复杂,如外界风速、风向的随机变化都会对测试结果及经验公式的适用性产生一定的影响。因此,在计算风压作用下的通风量时,应在考虑风速变化对通风量影响的基础上同时考虑风向对通风量的影响,当建筑通风开口位于侧面和背风面时,应分别在原公式的基础上进行适当的修正。

#### 参考文献:

- [1] 卢求. 住宅通风技术[J]. 中国建筑装饰装修, 2010(7):167
- [2] 中国建筑设计研究院. GB 50096—2011 住宅设计规范[S]. 北京:中国工业出版社, 2011
- [3] 北京市建筑设计研究院. DBJ 11 - 602—2006 居住建筑节能设计标准[S]. 北京:北京市建筑设计标准化办公室, 2006
- [4] 李晓锋,朱颖心. 示踪气体浓度衰减法在民用建筑自然通风研究中的应用[J]. 暖通空调, 1997, 27(4):7-10
- [5] 李晓锋,朱颖心. 示踪气体测量技术基本问题分析(一)——原理、方法与测量设备[C]//全国暖通空调制冷 1998 年学术年会文集, 1998
- [6] ASHRAE. ASHRAE handbook—fundamentals [M]. ASHRAE, 2009
- [7] 齐美薇,李晓锋,黄河. 示踪气体法利用人体作为  $\text{CO}_2$  释放源测量宿舍换气次数的方法研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(6):52-57
- [8] Marcello C, Pacal S. Full scale experimental study of single-sided ventilation: analysis of stack and wind effects [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(7):1765-1773