

文章编号:1000-582X(2012)03-133-07

## 住宅建筑气候适应性通风调控方法

喻 伟,李百战,赵温江,陈金华,刘 猛

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室;b. 城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

**摘 要:**为得出住宅建筑室内可接受热环境的气候适应性通风调控方法,根据适应性模型理论,以 aPMV 模型为基础,结合重庆地区的调研结果分析得出住宅建筑室内可接受的温度范围;基于状态空间法对重庆地区住宅建筑常用的通风调控技术进行分析研究,包括不同换气次数和分时段设置通风对室内温度的作用分析,从房间温度整体分布角度提出了重庆地区通风技术的分月调控方法;结合室外温湿度等参数的温湿图,具体分析了通风调控对室外气候参数的调控有效区域,得到各月通风调控方法的气候适应性区域。提出的基于室内热舒适适应性模型的可接受热环境的通风调控策略有利于建筑的热工设计和寻求设备的经济运行方式。

**关键词:**气候适应性;通风调控;温湿图;住宅建筑

**中图分类号:**TU834.1

**文献标志码:**A

### Ventilation regulating methods adapting by climate for residential housing

YU Wei, LI Bai-zhan, ZHAO Wen-jiang, CHEN Jin-hua, LIU Meng

(a. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education;  
b. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** To study the climatic control strategies of the residential building indoor acceptable thermal environment, firstly, based on adaptive model, integrated indoor activities, clothes and spot investigation on air velocity of residential building, this paper calculates an acceptable temperature range. Secondly, through state-space techniques, common passive regulating technologies in residential building have been simulated, including different ventilation rates and divided-period setting ventilation effect on indoor temperature. Meanwhile, monthly regulating methods for ventilation have been proposed. Thirdly, through ventilation technology, effective regulating zone of outdoor climate parameters have been analyzed, which is combined with hythergraph of outdoor temperature, humidity, solar radiation and air velocity. Taking the characteristics of the human thermal comfort adaptability into consideration, the energy-saving potential of the study results is also analyzed.

**Key words:** climate adaptability; ventilation strategies; hythergraph chart; residential building

住宅作为人类长期生活的场所,其运行能源的大部分都用于建筑物的室内环境控制,即温度、湿度、室内外通风换气和室内照度的维持。不同的室

内环境水平在很大程度上决定建筑物的服务水平,室内环境的营造目标,都应在人体可接受的范围内,尽量与自然界环境所处状态相近。要降低建筑物能

收稿日期:2011-10-12

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838009);国家自然科学基金青年基金项目(51108473)

作者简介:喻伟(1984-),男,重庆大学讲师,主要从事建筑节能和绿色建筑方面的研究,(E-mail)yuweixscq@126.com。

源消耗,其最主要的途径就是降低室内环境、尤其是热湿环境调控所消耗的能源<sup>[1]</sup>。对于建筑的热湿调控策略,应尽可能优先利用各类自然资源,而不是直接考虑利用机械方式和人工制取的方法。尽可能的利用自然资源,也就是被动调控方式,一方面,可以很大程度节省对机械方式和人工制取方式的依赖,减少化石能源的消耗,缓解日益严峻的能源环境问题;另一方面,采用自然资源条件可以更好的与自然和谐,提高建筑物的服务水平,增加人体舒适水平<sup>[2]</sup>。其中,建筑气候分析是解决建筑热湿调控策略最基本的关键问题,只有正确分析室外气候条件和人体热舒适环境之间的关系,才能提出合理的节能设计策略和气候适应性调控措施,从而在设计阶段能够真正考虑当地的气候资源。

早在 20 世纪初就有一批建筑师在现代建筑科学的基础上,进行现代建筑设计结合气候问题的研究。从 1963 年美国普林斯顿大学出版社出版《设计结合气候》到 20 世纪 90 年代一系列生态建筑设计名著诞生,此间,西方建筑师对此问题进行了系统广泛的理论探讨,发展至今系统的气候分析方法已经较为成熟,然而具体分析模型的完善程度主要取决于室外气候条件的分析基准和各种气候调控手段的室外边界条件的正确确定<sup>[3]</sup>。目前国内外的研究对于室外气候条件的分析基准和各种调控手段边界条件的确定方法尚未成熟,因此如何在满足人体可接受的舒适前提下,合理采用各种气候适应性的调控技术,以达到充分利用自然资源为住宅建筑提供气候适应性调控策略的目的,这是建筑节能急待解决的难点之一<sup>[4]</sup>。

科学地寻找改善室内热环境的途径与方法,研究建筑气候适应性调控技术及策略,尽可能优先利用各类自然资源,从而改善人民居住质量,降低建筑能耗以及促进人居环境的可持续发展,具有十分重要而深远的意义<sup>[5]</sup>。因此,既满足本地人体舒适感,又节约能源消耗的室内热环境调控策略,是本研究的着手点。

## 1 研究方法

### 1.1 可接受热舒适区的确定

在热舒适领域近年来的研究表明,基于 Fanger 理论基础的使用稳态热平衡方程得出的热舒适性模型,当适用于自由运行建筑(Free Running Building)时,其热舒适评价与实际投票有出入<sup>[6-11]</sup>。在这些建筑中,用 PMV 得出的舒适温度与实际投票得出的舒适温度相差有时高达 3~4 °C。

为此,重庆大学项目组(1997,2009)针对这一问

题,通过应用自动控制理论,建立了自由运行建筑调节模型的热适应性模型<sup>[12-13]</sup>。模型得出在实际建筑中热舒适投票率 aPMV 与物理刺激量之间的关系可以认为自动控制“黑箱”中的环状负反馈,它包括了不同的适应性调节和感觉反馈等。这些负反馈影响着输出量 aPMV,因此建立了热舒适调节模型图如图 1 所示。

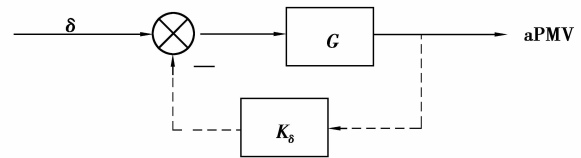


图 1 热舒适适应性模型图

也即

$$aPMV = G \times \sigma - aPMV \times K_{\delta} \times G, \quad (1)$$

式中: aPMV 为实际建筑现场研究热舒适投票率;  $K_{\delta}$  为大于 0 的系数,取决于气候、季节、建筑形式及功能,社会文化背景以及其他瞬时物理环境中的相关因素。

$$aPMV = \frac{PMV}{(1 - \frac{K_{\delta} \times PMV}{\sigma})}, \quad (2)$$

假定  $\lambda = K_{\delta}/(\sigma)$ ,也可称为适应性系数,则上式可转变为:

$$aPMV = \frac{PMV}{(1 + \lambda \times PMV)}. \quad (3)$$

$$\text{设物理刺激量 } \sigma = T_m - T_n, \quad (4)$$

式中:  $T_m$  为考虑了空气温度及辐射温度的室内空气结果温度;  $T_n$  为热中性温度(也即舒适温度)。

在夏季或在温暖的条件,即  $T_m > T_n$ ,  $\lambda = K_{\delta}/(T_m - T_n) > 0$ ,可得,自适应预测平均数票(aPMV)小于 PMV。换言之,即使在相同的散热条件下, aPMV 预计的冷感觉比 PMV 低。在冬季或凉爽的环境,即  $T_m < T_n$ ,  $\lambda = K_{\delta}/(T_m - T_n) < 0$ ,当住户被允许采取行动,如穿上/脱下服装,开放/关闭窗口,开/关风扇或暖气,并饮用热/冷饮料,住户会觉得更舒适。在此结果分析的基础上提出自适应模型的结果,与在这些领域进行研究的 Nicol, Sharma 和 Ali, Buschetal 的研究结果相吻合<sup>[13]</sup>。

aPMV 模型解释了 PMV 过高或过低估计了人们在温暖环境和凉爽环境中的热感觉,这是由于 PMV 模型没有考虑人体在真实生活中的心理和行为技术的适应性。

考虑到可接受的热舒适区与室外气象参数密切相关,而全国各地的气候条件各异,也就意味关全国各地的可接受舒适区也是不同的。因此文章中可接

受舒适区的确定以重庆市为例进行分析。利用前面的 aPMV 模型,结合重庆地区的调研数据,可计算室内可接受的温度范围,即使得  $|aPMV| = 0.5$ , 这样可以得出可接受温度范围的临界区域。由于不同的相对湿度下所对应的可接受温度范围不同,常规的方法可以选择几个不同的相对湿度值来同时进行分析。考虑到重庆地区室外的相对湿度大部分时间处于高湿度条件下,因此以 60% 相对湿度下的重庆地区可接受舒适温度范围为依据。由前面的分析可知当相对湿度为 60% 时,室内可接受的舒适温度范围为  $15.83 \sim 27.89 \text{ }^\circ\text{C}$  [14]。

## 1.2 通风调控方法有效性的确定

在室内可接受的舒适温度范围确定的基础上,利用状态空间法对选择的典型住宅建筑进行全年的室内热环境动态分析,主要是针对室内全年逐时的温度进行,分析在采用了通风调控前后室内全年逐时温度分布处于可接受舒适温度范围的变化情况,从而得出通风调控方法的有效性。

笔者采用状态空间法,建立起在内外扰量及房间与外界通风换气的影响下,房间基础室温变化的数学模型,表示如下 [15]:

$$t_k(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} e^{\lambda_i(\tau-\eta)} q_j(\eta) d\eta. \quad (5)$$

式中:  $t_k(\tau)$  为房间  $k$  的基础室温;  $q_j$  为房间  $k$  所受到

的热扰量,包括外温太阳辐射、邻室室温、地温、天空背景辐射、房间与外界通风换气的热交换量以及内部发热量;  $\lambda_i$  为状态空间法中各个房间的空间特征值向量;  $\varphi_{ij}$  为采样后各种扰量对房间温度表的影响系数;  $n$  为空间特征值的维数;  $m$  为热扰数。

同时,利用 DeST 软件引入了 2 种通风的作息设定,一种是逐时通风定义,即设置全年每个时刻的逐时通风换气次数;另外一种为通风范围定义,即分别定义最大和最小的通风次数,也可以理解为(关窗风量(渗透风量)~开窗风量),当室外温度低于室内温度,适于开窗通风时,认为用户开窗,室内外通风换气量为开窗风量;当室外温度高于室内温度,不适合开窗时,认为用户关窗,风量为关窗风量;在用户肯定不开窗的其他时间段内,风量为关窗风量。这种根据室内外温度来确定通风量的方法,在一定程度上反映了用户通过开关门窗来调节室内热环境的行为 [16]。

所选择的典型建筑主要以重庆地区《居住建筑节能 65% 设计标准》(DBJ 50-071-2007) 为依据进行参数的设置,同时参考《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2001),建筑平面图如图 2 所示 [17-18]。

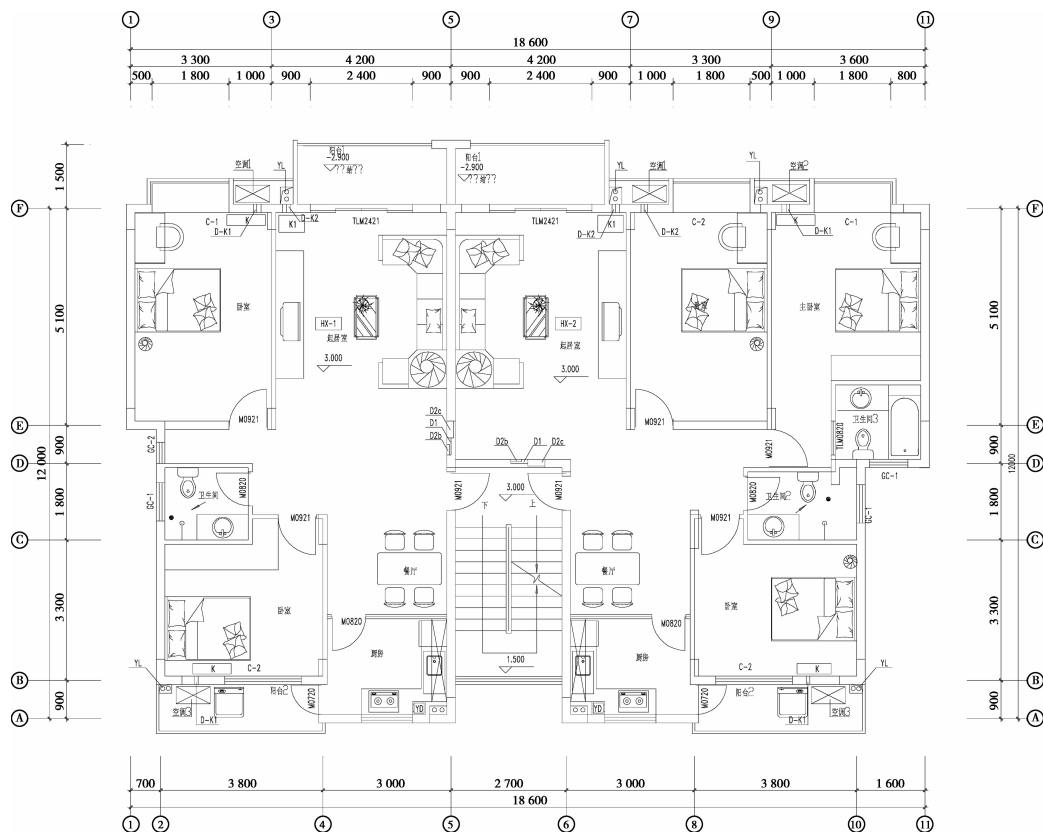


图 2 标准层建筑平面图

## 2 通风调控策略分析

### 2.1 换气次数的作用分析

为了具体了解各月时段内通风对室内的热环境的作用效果,首先计算了建筑在全年关窗工况下的室内温度,其次考虑了建筑在全年保持不同换气次数下的通风工况下的室内温度。文献[19-20]中通过使用示踪气体浓度衰减法在民用建筑进行自然通风换气次数的测试,以及通过对大量住宅建筑的实地调研分析得出,住宅的关窗风量可按换气次数 0.5 次/h 取。因此选择 0.5 次/h 的换气次数为住宅的关窗风量,分析通风设计对住宅热环境改善的有效程度。

各月在各种工况下室内的温度分布主要以各月室内的温度分布频数进行统计,温度分布频数主要统计室内温度小于 15.83 °C 的小时数和大于 27.89 °C 的小时数,小于 15.83 °C 的小时数用负值表示(即过冷小时数),大于 27.89 °C 的小时数用正值表示(即过热小时数)。以下分别以 4 个季节的典型月为例计算在不同换气次数下典型建筑室内各月温度的分布频数,如图 3 所示。

由图 3 可知,2 月在不同通风换气次数工况下室内温度的分布频数随着通风换气次数的增大,室内温度过冷的小时数逐渐增加;当通风换气次数达到 5 次/h 以上时,室内温度始终低于 15.83 °C,因此加大换气次数只能使得室内的过冷小时数增大。

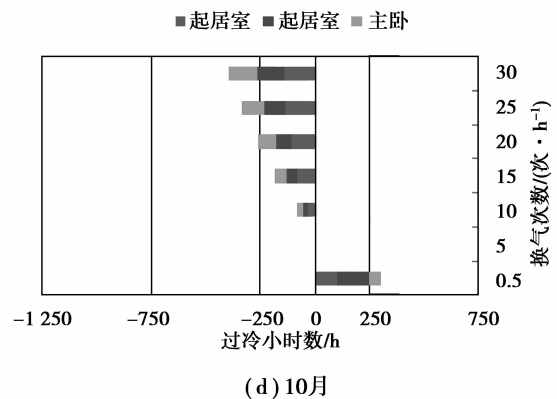
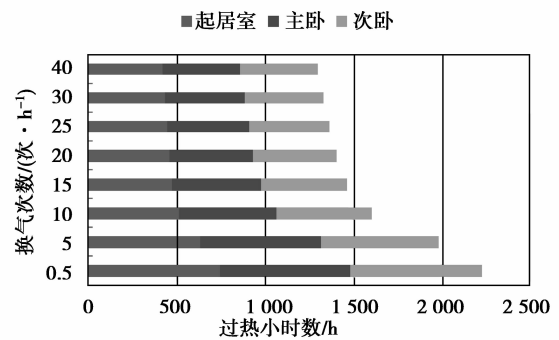
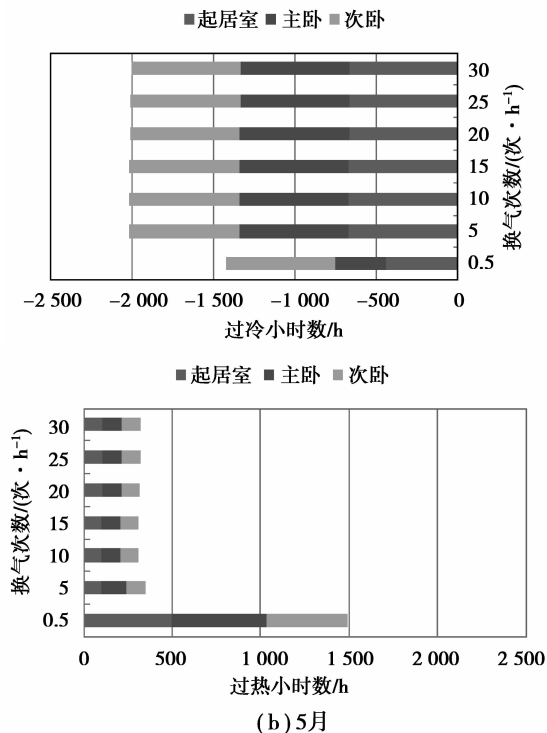


图 3 各月不同换气次数下室内温度的分布频数

5 月在不同通风换气次数工况下,室内温度的分布频数随着通风换气次数的增大,室内温度过热小时数先急剧减小,然后趋于平稳。当通风换气次数从 0.5 次/h 增加到 5 次/h 时,室内温度的过热小时数急剧减小;当通风换气次数大于 5 次/h 后,室内温度的过热小时数变化很小;同时当通风换气次数大于 20 次/h 后,还会出现过热小时数增加的情况。因此从房间室内温度整体的过热小时数角度,5 月较适宜的通风换气次数为 5 次/h 左右。

7 月在不同通风换气次数工况下,随着通风换气次数的增大,室内温度的过热小时数逐渐减小;当通风换气次数保持在 0.5 次/h 时,室内温度始终高于 27.89 °C,即处于过热的状态;出当通风换气次数从 0.5 次/h 增加到 5 次/h 时,室内温度的过热小时数急剧减小;从 5 次/h 时逐渐增加到 20 次/h,室内温度的过热小时数逐渐减小;当从 25 次/h 时逐渐增加到 40 次/h,室内温度的过热小时数变化已经不明显了。因此从房间温度整体的过热小时数角度分析,7 月适宜的通风换气次数为 25~30 次/h 之间。

当 10 月的通风换气次数保持在 0.5 次/h 时,室内温度部分处于过热的状态;当换气次数增大为 5 次/h 时,室内温度小部分处于过冷的状态;当换气次数大于 5 次/h 时,室内温度的过冷度小时数和小

时数逐渐增大。因此从室内温度分布的角度,10月在室外温度适宜的情况下,可以考虑一定的通风换气来改善室内热环境,10月较适宜的通风换气次数为0~5次/h之间;在室外温度较低的情况下,应关闭窗户。

通过相同的方法分析,可总结得出重庆地区住宅建筑各月适宜的换气次数,如表1所示。

表1 重庆地区住宅建筑各月的通风调控方法

月份	是否需 要开窗 通风	是否分 段设置 通风	适宜的换气次数
1—4月	否	—	0.5次/h(关窗)
5月	是	否	5次/h
6—8月	是	是	19:00—次日09:59室外温度条件适宜时按25~30次/h换气; 10:00—18:59按0.5~5次/h 换气或关窗
9月	是	否	室外温度条件适宜时,10次/h
10月	是	否	0.5~5次/h或关窗
11、12月	否	—	0.5次/h(关窗)

## 2.2 分时段设置通风的作用分析

通过不同换气次数对室内温度分布频数的作用分析可知,6、7、8月份由于白天和夜晚的温差较大,在白天室外温度较高时随着换气次数的改变室内温度过热频数有所增加,在夜晚室外温度降低时随着换气次数的改变室内温度过热频数会相应的减少,因此在6—8月份应考虑分段设置通风。

分段通风的结束时间即夜间以高换气次数通风转换为白天以低换气次数通风的时间,主要为早上时段。假设分段通风开始时间为前日晚上19:00时,以7月为例分别统计分析了分段通风结束时间为7:59、8:59、9:59、10:59、11:59、12:59下室内的温度小时数,如图4所示。

图4显示了7月在相同的分段通风开始时间19:00时,不同的分段通风结束时间下室内温度的过热度小时数,同时显示了全天通风保持20次/h的工况下室内温度的过热度小时数。从图中可以看到,除了7月的主卧和次卧外,分段设置通风的过热度小时数小于全天通风;在分段设置通风各通风结束时间工况中,9:59工况的过热度小时数总体较小,并且小于相应全天通风的工况。因此,在分段设置通风中,适宜的设置通风结束时间为9:59。

对于分段通风的开始时间,主要是下午时段,考虑了在次日分段通风结束时间为早上9:59时,不同

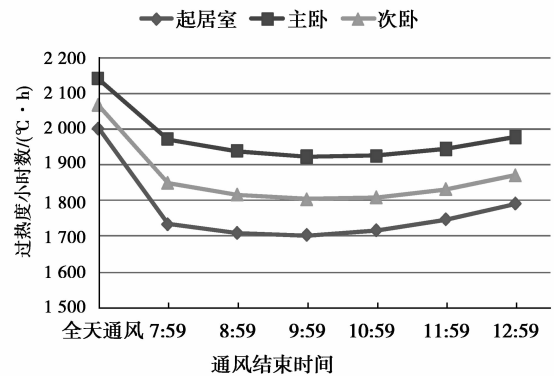


图4 7月在不同通风结束时间下室内温度的过热度小时数

的开始时间下的室内温度小时数,其中以7月例分别计算了分段通风开始时间为17:00、18:00、19:00、20:00、21:00的下室内的温度,如图5所示。

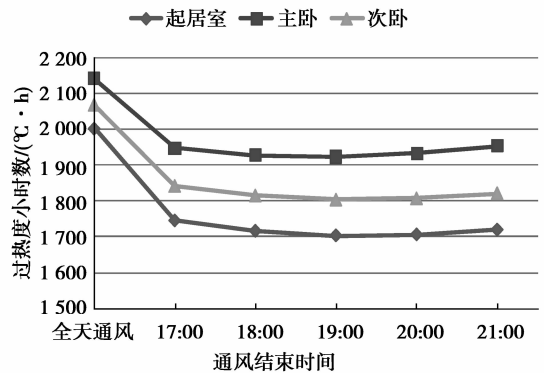


图5 7月在不同通风开始时间下室内温度的过热度小时数

图5显示了7月在相同的分段通风结束时间9:59时,不同的分段通风开始时间下室内温度的过热度小时数,同时显示了全天通风保持20次/h的工况下室内温度的过热度小时数。从图中可以看到,除了7月的主卧和次卧外,分段设置通风的过热度小时数都小于全天通风;在分段设置通风各通风开始时间工况中,19:00工况的过热度小时数最小,并且小于相应全天通风的工况。因此,在分段设置通风中,适宜的分段通风开始时间为19:00。

## 2.3 通风调控策略

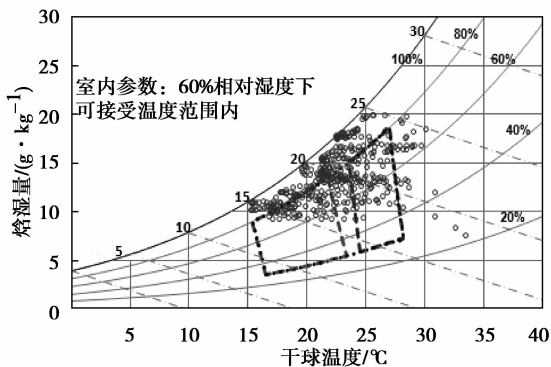
通过前面的不同换气次数下和分时段设置通风的室内温度的逐月分析,从房间温度整体分布角度,可以归纳重庆地区住宅建筑各月的通风调控方法如表1所示。

## 3 通风调控的适应性分析

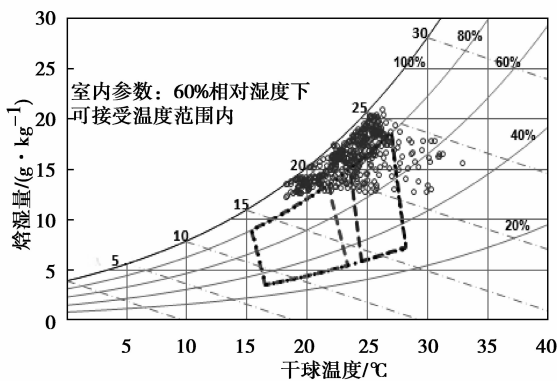
为了将前面分析和所得出通风调控方法形象化,并结合室外的温湿度、太阳辐射和风速等数据,

将各种调控方法的有效区域在温湿度图上具体表现出来,从而便于住宅建筑的气候设计分析。文中将室内温度进行分区统计,将室内温度处于可接受温度范围内的时刻所对应室外参数提取出来,再将提取出来的室外温度和湿度组合显示在温湿度图上,这样就可以间接地显示出各种调控方法对于室内热环境的改善作用<sup>[14,21]</sup>。这种改善作用可以通过室外参数反应出来,同时可以通过通风调控方法的对比来显示出该种调控方法对室外参数的作用范围。

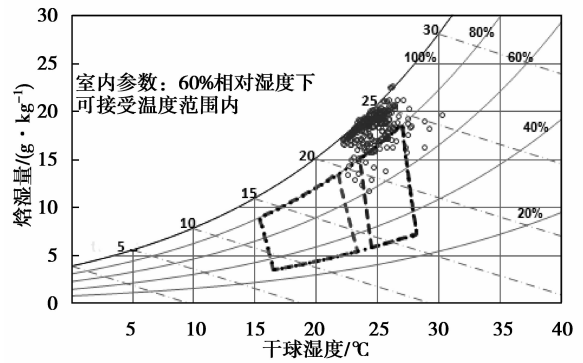
由于不同的相对湿度对应了不同的可接受温度范围,为了考虑到相对湿度的影响,需要对不同的相对湿度对应的可接受温度范围分别进行分析,笔者选取 60%相对湿度下对应的可接受温度,以主卧为例分析 5—10 月份通风调控方法对于室内热环境的改善作用。图 6 为主卧 5—10 月各月份采用通风调控对室外参数的作用范围(采用通风调控方法后处于可接受温度范围的室内温度所对应的各室外气象参数扣除关窗工况下处于可接受温度范围的室内温度所对应的各室外气象参数状态点)。



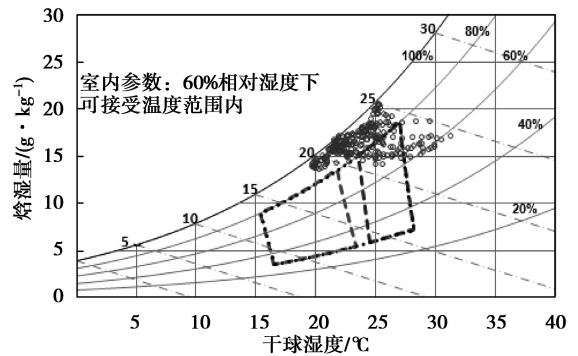
(a) 5月



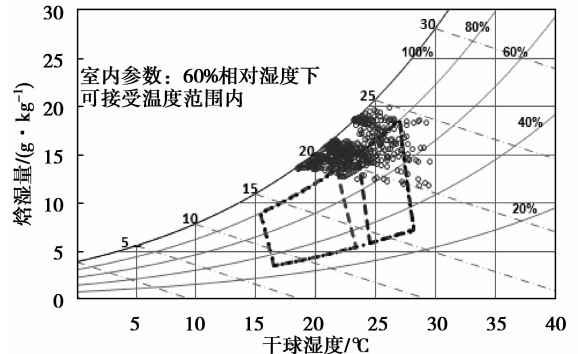
(b) 6月



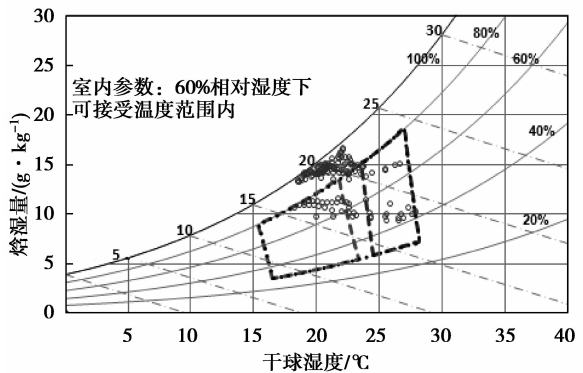
(c) 7月



(d) 8月



(e) 9月



(f) 10月

图 6 主卧通风调控扣除关窗工况后主卧各月相应室外参数的分布

如图6可得出通风调控对5、6、9月的室内热环境改善作用最大,即室内温度处于可接受温度范围内时室外参数占当月总小数比例分别为53.2%、69.7%和78.8%;通风调控对7、8、10月的室内热环境改善作用次之,比例分别为36.0%、36.2%和19.8%;考虑到10月的室外环境比较适宜,关窗工况下大部分时段室内温度就已经处于室内可接受温度范围内,而增加通风调控后,其全部时段室内热温度都进入了可接受温度范围,因此通风调控对十月也是非常有效的。可见通风调控最有效的月份是5、6、9、10月。

#### 4 结论与建议

以aPMV模型为基础,对重庆地区住宅建筑的自然通风调控方法进行了气候适应性研究,可以得到以下几点结论:

1)基于人体的热舒适调节模型,当相对湿度为60%时,重庆地区室内可接受的舒适温度范围为15.83~27.89℃;

2)得出了重庆地区住宅建筑通风的调控方法:11—4月期间,在保证一定的通风换气条件下,尽量关闭窗户;6—8月期间需要考虑一定的分段设置通风,当室外温度条件适宜时,适宜的通风换气次数为25~30次/h之间;5月和9月需要考虑全天的通风换气来改善室内热环境;10月在室外温度较低的情况下,应关闭窗户;

3)通过通风调控方法的适应性分析,得出了对于重庆地区的住宅建筑通风调控最有效的月份是5、6、9、10月。

文中利用aPMV模型分析了可接受的温度范围,但aPMV模型中住宅适应性系数的计算需要大量的调研和测试数据并通过详细分析获得,同时还需要不断验证,由于时间关系,很多成果还处于研究阶段,还需要通过后续的大量研究来确定准确的住宅建筑适应性系数。另外,文中只对通风调控技术进行了一些较简单的理论计算研究,然而气候适应性设计方法是一套系统的、复杂的、多学科融合的科学方法,因此后期有必要对其他调控方法以及各调控方法的综合效用进行定量分析。

#### 参考文献:

[1] NICOL J F, HUMPHREYS M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 563-572.

- [2] LI B Z. Sustainable response to the urbanisation in China [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(suppl3): 1-7.
- [3] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [4] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2008) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 李百战, 彭绪亚, 姚润明. 改善重庆住宅热环境质量的研究[J]. *建筑热能通风空调*, 1999, 18(3): 6-8.
- LI BAI-ZHAN, PENG XU-YA, YAO RUN-MING. Study on improvement of indoor thermal quality of residential buildings in Chongqing area [J]. *Building Energy & Environment*, 1999, 18(3): 6-8.
- [6] DE DEAR R J, LEOW K G, FOO S C. Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1991, 34(4): 259-265.
- [7] DE DEAR R J, LEOW K G, AMEEN A. Thermal comfort in the humid tropics-part 1: Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore [J]. *ASHRAE Transactions*, 1991, 97(1): 874-879.
- [8] DE DEAR R J, LEOW K G, AMEEN A. Thermal comfort in the humid tropics-part 2: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore [J]. *ASHRAE Transactions*, 1991, 97(1): 880-886.
- [9] HUMPHREYS M A. Field studies of thermal comfort compared and applied [J]. *Building Services Engineer*, 1976, 44: 5-27.
- [10] HUMPHREYS M A. Thermal comfort requirements, climate and energy [M]. Oxford: Pergamon Press, 1992: 1725-1734.
- [11] HUMPHREYS M A, NICOL J F. Conflicting criteria for thermal sensation within the Fanger predicted mean vote equation [C]// *Proceedings of the CIBSE/ASHRAE Joint National Conference*, September 29-October 1, 1996, Harrogate, UK. [S. l.]: CIBSE, 1996: 153-158.
- [12] 姚润明. 室内气候模拟及热舒适研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1997.
- [13] YAO R M, LI B Z, LIU J. A theoretical adaptive model of thermal comfort-adaptive predicted mean vote (aPMV) [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2089-2096.
- [14] 赵温江. 重庆地区住宅建筑气候适应性的调控方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

2008, 18(10):1996-1997.

LIU ZHI-HONG, LI BIN, WU JING-WU, et al. Rapid determination of harmful 1, 4 - butanediol in toy beads by gas chromatography and mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2008, 18(10): 1996-1997.

[17] 李光耀. 硝酸钾结晶器的主要类型及选择[J]. 化肥设

计, 2005, 43(4):22-25.

LI GUANG-YAO. Main types & selection for crystallizer of potassium nitrate[J]. Chemical Fertilizer Design, 2005, 43(4):22-25.

(编辑 张 莘)

(上接第 139 页)

[15] 简毅文, 江亿. 住宅室温模拟和实测数据的一致性分析[J]. 住宅科技, 2002, 23(7):3-5,27.

JIAN YI-WEN, JIANG YI. Comparison of indoor temperatures between simulation results and field measurements[J]. Housing Science, 2002, 23(7): 3-5, 27.

[16] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第一讲建筑模拟技术与 DeST 发展简介[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 30-46.

YAN DA, XIE XIAO-NA, SONG FANG-TING, et al. Building environment design simulation software DeST (1): an overview of developments and information of building simulation and DeST[J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2004, 34(7): 30-46.

[17] 重庆市建设技术发展中心. DBJ 50-071—2007 居住建筑节能 65%设计标准[S]. 重庆: 重庆市城乡建设委员会, 2007.

[18] 中国建筑科学研究院, 重庆大学. JGJ 134—2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2001.

[19] 简毅文. 住宅热性能评价方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[20] 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.

LI XIAO-FENG, ZHU YING-XIN. Natural ventilation study of a meeting room with the tracer gas technique[J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 1997, 27(4): 7-10.

[21] VISITSACK S. An evaluation of the bioclimatic chart for choosing design strategies for a thermostatically-controlled residence in selected climates[D]. Texas: Texas A&M University, 2007.

(编辑 郑 洁)