

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.008

# 长江中下游地区梅雨季节的室内热湿环境

杨 骏, 秦孟昊

(南京大学 建筑与城市规划学院, 南京 210093)

**摘 要:** 经过调研得到长江中下游地区(以南京为例)梅雨季节住宅建筑室内热湿状况, 并分析 3 种不同建筑能耗计算模型(整体建筑热湿空气流动耦合模型 HAM, 传递函数模型 CTF, 有效湿渗透深度模型 EMPD)的准确性。数值模型基于 Matlab-Simulink 编写, 使用调研数据进行验证, 进而使用梅雨季节典型气象参数模拟分析。调研结果显示在 2013 年梅雨季节, 多数时间内建筑室内温度高于 28℃, 相对湿度高于 70%。数值模拟结果显示 3 种能耗模型对室内温度模拟的差异较小, 而对室内湿度的模拟存在较大差异, 特别是 CTF 模型误差最大。结果显示在长江中下游地区梅雨季节, 当房间换气次数小于 2 ACH 时, 围护结构对于室内环境湿缓冲的作用明显, 选择合适的吸放湿材料可有效降低建筑能耗 30% 以上。

**关键词:** 室内热湿环境; 住宅建筑; 梅雨季节; 能耗; 数值模拟

**中图分类号:** TU111.19    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)01-0040-07

## Indoor thermal conditions in residential buildings during the plum rain season in East China

Yang Jun, Qin Menghao

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

**Abstract:** The indoor thermal conditions of residential buildings during the plum rain season in East China (Nanjing for example) were obtained and the accuracy of three different building energy consumption models (whole building heat, air and moisture model HAM, conduction transfer function model CTF, effective moisture penetration depth model EMPD) were analyzed. The numerical model was implemented into Matlab-Simulink and was validated using measured data from a field survey. Then the validated model was used for simulation analysis using typical weather data of plum rain season. The results from the survey showing the indoor temperature was higher than 28℃ and the indoor relative humidity was higher than 70% in most time of the plum rain season of 2013. Simulation results showed that there was not much difference when using the three models for thermal simulations, however, using CTF model for moisture simulation would result in large inaccuracy. During the plum rain season in Southeast China, when the room ventilation rate is less than 2 ACH, the moisture buffering effect of building envelope is obvious and the choice of proper hygroscopic materials can save up to 30% of building energy consumption.

**Key words:** indoor hygrothermal conditions; residential building; plum rain season; energy consumption; numerical simulation

**收稿日期:** 2014-09-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51108229)

**作者简介:** 杨 骏(1990-), 男, 主要从事建筑材料湿缓冲研究, (E-mail)mg1236023@smail.nju.edu.cn。

秦孟昊(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)mqin@nju.edu.cn。

**Received:** 2014-09-02

**Foundation item:** National Natural Science Foundation(No. 51108229)

**Author brief:** Yang Jun (1990-), main research interest: moisture buffering capacity of building materials, (E-mail)mg1236023@smail.nju.edu.cn。

Qin Menghao (corresponding author), professor, (E-mail)mqin@nju.edu.cn。

建筑物内的热、湿及空气耦合传递对于建筑室内环境和整体建筑能耗有很大的影响,在高温高湿的梅雨季节这一影响更为严重。梅雨是指中国长江中下游地区和台湾地区、日本中南部、韩国南部等地每年六月中下旬至七月中旬之间持续阴雨的气候现象<sup>[1]</sup>。在梅雨季节,受副热带高压控制,空气从暖湿海面吸收大量水汽,给长江中下游地区带来长时间的阴雨天气,导致空气潮湿闷热。据统计,中国长江中下游地区各年份的梅雨差异很大,近年来以 1998 年引发了长江全流域性洪水的“二度梅”最为典型,该年梅雨期总计 33 d,最高气温超过 35 °C<sup>[2]</sup>。同时有研究<sup>[3]</sup>表明,适于人类居住的温度范围同样适于霉菌的生长,且在相对湿度为 70%~93%时,霉菌会快速蔓延。因此,高温高湿气候不仅影响室内物品保存,还影响室内空气品质<sup>[4]</sup>,进而直接影响人体健康。另外,建筑中的湿气会影响室内的潜热负荷<sup>[5]</sup>。对于热负荷(包括显热负荷和潜热负荷)的精确计算需要考虑建筑围护结构热湿传递及湿缓冲作用<sup>[6-7]</sup>,然而,在使用率较高的建筑能耗软件(包括 EnergyPlus、TRNSYS、PKPM、DeST)中<sup>[8-9]</sup>,仅 EnergyPlus 提供了考虑建筑围护结构热湿传递及湿缓冲作用的计算模块 HAMT。使用 HAMT 模块进行模拟的时间是使用软件默认的 CTF 模块的 100~10 000 倍<sup>[10]</sup>,加之常用的 EnergyPlus 界面软件 DesignBuilder 等并不能调用 EnergyPlus 中的 HAMT 模块,这使得利用 EnergyPlus 中的 HAMT 模块进行能耗模拟具有很大困难。鉴于以上原因,很多建筑能耗的模拟都没有考虑建筑围护结构的热湿传递及围护结构和建筑室内环境的热湿交换,这会造成能耗模拟结果的误差。一般认为,当室内相对湿度较高时,潜热负荷部分将增加,即有更多的能源被用于对室内空气进行除湿,若选用适当的湿缓冲材料即可降低室内空气相对湿度,进而降低潜热负荷。总的来说,长江中下游地区梅雨季节的高温高湿天气会显著地影响住宅建筑的室内热湿环境,而在能耗模拟时若不考虑围护结构的热湿传递及湿缓冲因素则会给建筑能耗模拟结果带来误差,而选择适当的湿缓冲材料则可以改善室内湿环境并改善能耗状况。

针对室内热湿环境及能耗状况,已有学者进行了研究。万旭东等<sup>[11]</sup>对中国 7 个城市住宅建筑的能耗进行了调研,得到了这些建筑的热环境状况及能耗情况。张华玲等<sup>[12]</sup>对重庆地区村镇住宅进行了实地调研及监测,结果显示夏季室内温度最高达到 34.4 °C,相对湿度最高达到 99%。此外,一些学

者也在重庆<sup>[13]</sup>、成都<sup>[14]</sup>、杭州<sup>[15]</sup>等地展开调研,获得大量原始数据。长江中下游地区是中国城市化水平最高,经济最为发达的地区之一,且该地区全年多雨潮湿,其中南京市全年平均相对湿度高达 75%<sup>[16]</sup>。随着人们生活水平的不断提高,人们开始追求健康舒适的建筑室内环境,其中就包括舒适的室内热湿环境。目前室内热湿环境的控制主要通过制冷除湿设备实现,这种方式需要消耗大量能源,而当今能源短缺形势严峻,这要求必须在可持续发展的理念下提高室内环境的舒适性。因此,对于该地区建筑室内热湿环境的研究具有重要意义。

笔者旨在调研长江中下游地区(以南京为例)梅雨季节住宅建筑的热湿状况,并分析目前能耗计算软件使用的 3 种不同能耗模型(整体建筑热湿空气流动耦合模型 HAM<sup>[7]</sup>、传递函数模型 CTF、有效湿渗透深度模型 EMPD<sup>[10]</sup>) 在梅雨季节时对于住宅建筑能耗模拟的准确性。数值模型基于 Matlab-Simulink 平台编写,使用 2013 年梅雨季节南京地区调研所得住宅建筑的实测数据进行验证。由于梅雨在某些年份非常显著,而在另一些年份不显著,所以根据单独一年的分析,不容易得出全面的结论,因而选择典型气象年参数<sup>[16]</sup>对调研案例进行数值模拟。将模型运用于分析住宅建筑围护结构对于室内热湿状况和能耗情况的影响,讨论了 3 种与湿传递相关的建筑围护结构模型对于室内热湿状况的影响,及 3 种模型用于能耗模拟时所得结果的准确性,还讨论了房间通风量大小对于围护结构湿缓冲作用的影响程度。

## 1 数学模型

### 1.1 围护结构内的热湿耦合传递

将水蒸气含量及温度作为热湿耦合传递的主要驱动势,解决了多孔介质中含湿量不连续的问题。模型考虑了多层墙体的一维热湿耦合传递,同时将多孔介质的吸附或解附作用热、水的相变潜热(蒸发或凝结)作为热源或热汇写入热湿耦合控制方程。温度梯度系数<sup>[17]</sup>则由温度和湿度决定。围护结构内热湿平衡方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho \frac{C_m}{C_p} (\sigma h_{iv} + \gamma) \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sigma}{\rho C_m} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sigma \delta}{\rho C_m} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

式中: $T$ 为温度,K; $t$ 为时间,s; $\lambda$ 为材料的导热系数,W/(m·K); $\rho$ 为材料的干密度,kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$ 为材料的比热容,J/(kg·K);  $C_m$ 为材料的比湿,m<sup>3</sup>/kg;  $\sigma$ 为相

变准数;  $h_{iv}$  为相变热, J/kg;  $\gamma$  为吸放湿热, J/kg;  $v$  为水蒸气含量, kg/m<sup>3</sup>;  $\epsilon$  为温度梯度系数, m/s;  $\delta$  为湿扩散系数, m<sup>2</sup>/s。

方程(1)描述了多孔墙体内部的热平衡, 其中最后一项是热源或热汇, 由水的相变、材料的吸放湿作用热组成。方程(2)描述了多孔墙体内部的湿平衡, 其中最后一项是湿源或湿汇, 是在温度梯度作用下产生的湿分迁移。

### 1.2 空调空间的热湿平衡

运用的空调空间热湿平衡方程为整体建筑热湿空气流动耦合模型(HAM)。模型中空调空间的温度和相对湿度的影响因素为通过建筑围护结构的得失热及得失湿、房间内部热湿源、通风、空调系统等。模型假设: 1) 空调空间的室内空气温度和相对湿度均一分布; 2) 忽略所有辐射; 3) 所有表面的对流传热传湿系数均相同。

空调空间的热平衡方程如下:

$$\rho C_p V \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_j A_j \alpha_j (T_j - T_i) + nV\rho C_p (T_o - T_i) + Q_m + Q_{HVAC} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$  为空气的比热容, J/(kg · K);  $V$  为房间体积, m<sup>3</sup>;  $t$  为时间, s;  $A_j$  为围护结构表面面积, m<sup>2</sup>;  $\alpha_j$  为传热系数, W/(m<sup>2</sup> · K);  $T_j$  为围护结构表面温度, K;  $T_i$  为室内空气温度, K;  $T_o$  为室外空气温度, K;  $n$  为换气次数, h<sup>-1</sup>;  $Q_m$  为包括

人体、灯光、设备等产生的室内热源, W;  $Q_{HVAC}$  为空调通风系统引起的热源或热汇, W。

空调空间的湿平衡方程如下:

$$V \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum_j A_j g_{in,j} + nV(v_o - v_i) + M_{in} + M_{HVAC} \quad (4)$$

式中:  $v_i$  为室内空气的水蒸气含量, kg/m<sup>3</sup>;  $v_o$  为室外空气的水蒸气含量, kg/m<sup>3</sup>;  $g_{in,j}$  为进入室内的湿流密度, kg/(s · m<sup>2</sup>);  $M_{in}$  为室内得湿量, kg/h;  $M_{HVAC}$  为空调通风系统带来的湿源或湿汇, kg/h。

根据调研结果, 选择 2 个建造年代不同的房间作为案例进行分析, 2 个案例房间平面图如图 1 所示, 详细信息见表 1。在 Matlab-Simulink 平台中, 使用案例参数及上述数学方程建立模型, 并利用调研实测数据进行模型验证。

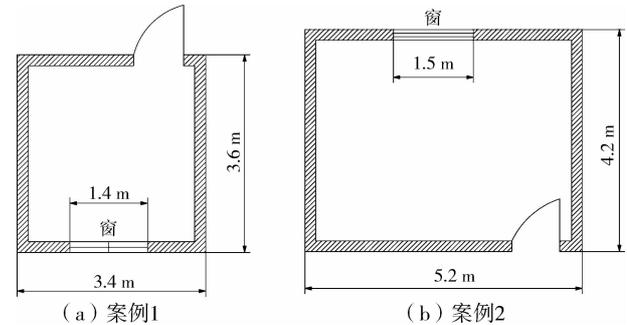


图 1 案例 1 及案例 2 房间平面图  
Fig. 1 Ground plans of case 1 and case 2

表 1 案例 1 及案例 2 详细信息  
Table 1 Details of case 1 and case 2

建筑信息	案例 1	案例 2
建造年代	2000—2009	1980—1989
房间面积/m <sup>2</sup>	12	20
围护结构材料(由内到外)/m	木板: 0.012 混凝土: 0.024 泡沫保温: 0.009	混凝土: 0.012 砖块: 0.037 混凝土: 0.009
外墙面积/m <sup>2</sup>	南立面: 10.2 西立面: 10.8	北立面: 10
内墙面积/m <sup>2</sup>	21	30
地面材料(由内到外)/m	木地板: 0.025 混凝土楼板: 1.003 木制天花板: 0.019	
屋顶材料(由内到外)/m	纤维板: 0.111 8 屋顶板: 0.019	
室内热源产热量(房间使用时)/W	135	135
室内湿源产湿量(房间使用时)/(g · h <sup>-1</sup> )	75	75

将模型用于研究在南京市典型梅雨季节气象参数下建筑围护结构对于住宅建筑的热湿状况及能耗情况影响,模拟讨论 3 种与湿传递相关的建筑能耗模拟模型(HAM、CTF、EMPD)对于室内热湿状况的影响,并根据 3 种能耗模拟模型对 2 个案例分别设立 6 种模拟情形,用以分析 3 种能耗模拟模型的准确性,案例模拟参数设置详见表 2。其中 HAM 模型为整体建筑热湿空气流动耦合模型,模型考虑了通过围护结构的热湿传递及围护结构与室内环境

之间的热湿交换,是 3 种能耗模型中最接近实际情况的模型,但最为复杂,计算时间较长;CTF 模型是传递函数模型,是目前最为常用的能耗计算模型,该模型仅考虑通过围护结构的传热及围护结构与室内环境的换热,不考虑湿的影响,计算时间较短;EMPD 模型为有效湿渗透深度模型,模型仅针对围护结构内表面有效渗透深度内的浅层材料进行吸放湿计算,为 HAM 模型的简化集总模型,复杂程度介于 HAM 模型与 CTF 模型之间,计算相对较快。

表 2 模拟案例参数设置  
Table 2 Description of simulation cases

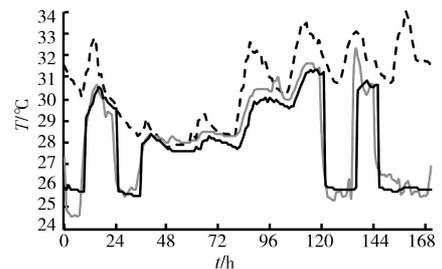
案例设置	代表模型	制冷除湿	外墙考虑吸放湿	内墙考虑吸放湿
案例 1.1	案例 2.1	×	√	√
案例 1.2	案例 2.2	√	√	√
案例 1.3	案例 2.3	×	×	×
案例 1.4	案例 2.4	√	×	×
案例 1.5	案例 2.5	×	×	√
案例 1.6	案例 2.6	√	×	√

## 2 结果与讨论

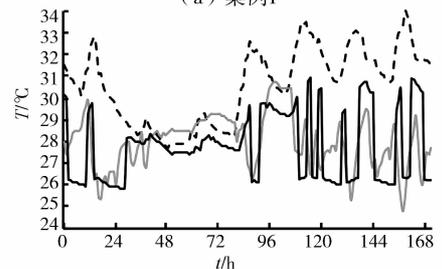
### 2.1 模型验证

模拟验证的参数根据调研结果进行设置,在使用 HAM 模型模拟时设置房间内有 2 名成年人,并处于睡眠状态,忽略灯光、设备等产热因素,忽略除人体以外的产湿因素,房间通风量恒定。由于实测中房间换气次数,房间使用时间及空调制冷温度设置无明显规律,因此模拟时根据实测结果进行设置,在此不详细列出。

2 个案例 7 月的部分实测和模拟所得热湿曲线见图 2、图 3。图 2 中,0~48 h 及 120~168 h 之间,由于用户开启空调,使得室内温度下降至约 26 °C,与室外温差较大,其余时间用户未开启空调制冷,因而室内外温差较小。实测及模拟结果显示该月 2 个案例的室内温度均在 26~32 °C 之间,其中案例 1 有 49.3% 的时间室内温度高于 28 °C,案例 2 中则有 56.3% 的时间室内温度高于 28 °C。该月 2 个案例的室内相对湿度均在 40%~85% 之间,其中案例 1 有 60.3% 的时间室内相对湿度高于 70%,案例 2 中有 28.1% 的时间室内相对湿度高于 70%。以上结果显示,梅雨季节时 2 个案例的热湿状况均不理想,需要制冷和除湿措施。同时实测结果与模拟结果的符合程度较为理想,均在合理误差范围内,因此该数值模型可以用于模拟住宅建筑在梅雨季节的热湿状况。



(a) 案例1



(b) 案例2

注: ---室外干球温度 ———室内实测干球温度  
·····室内模拟干球温度

图 2 室内温度实测及 HAM 模型模拟结果  
(2013 年 7 月 20 日—26 日)

Fig. 2 Measured indoor temperature and simulated results of HAM model(July 20th-26th,2013)

### 2.2 数值模拟

数值模拟中建筑围护结构组成及其余模拟参数均参考调研数据,为减小模拟影响因素,将案例 2 的房间面积及内外墙面积调整至与案例 1 相同,墙体材料及组成不变。假设每日 22 时至 7 时有 2 名成

年人在房间内,且处于睡眠状态。模拟时设置案例 1 的房间通风量为住宅建筑卧室的最小通风量,即换气次数为 0.5,设置案例 2 的房间通风量为最小通风量的 2 倍,即换气次数为 1。房间在使用阶段,当室内空气温度高于 26 °C 时开启制冷,当室内相对湿度高于 65% 时开启除湿。模拟的详细参数设置见表 3。

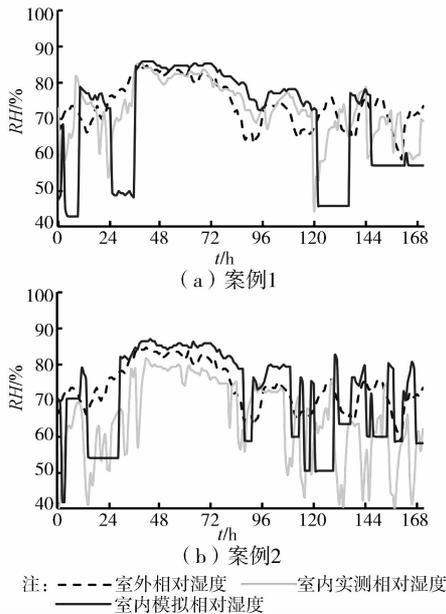


图 3 室内相对湿度实测及 HAM 模型模拟结果  
(2013 年 7 月 20 日—26 日)

Fig. 3 Measured indoor relative humidity and simulated results of HAM model(July 20th-26th,2013)

表 3 数值模拟参数设置  
Table 3 Setup data of simulation cases

案例设置	案例 1	案例 2
室内热源产热量(房间使用时)/W	135	135
室内湿源产湿量(房间使用时)/(g·h <sup>-1</sup> )	75	75
换气次数/ACH	0.5	1
房间使用时间	22 时—7 时(次日)	22 时—7 时(次日)
制冷温度设置/°C	26	26
湿度控制设置/%	65	65

室内温度模拟结果见图 4。结果显示室内温度在 26~30 °C 之间,且比 2013 年的实测数据低约 2 °C。案例 1 的室内温度比案例 2 的室内温度低 0.5 °C,这表明建造年代较晚的建筑在梅雨季节的热舒适性优于建造年代较早的建筑。而不同的模拟情形所得的室内温度曲线并不一致,主要因为部分模拟情形中使用了制冷。对于没有设置制冷的模拟

情形,其室内温度曲线基本一致,这意味着不同的模型在建筑热模拟中的准确度相近。

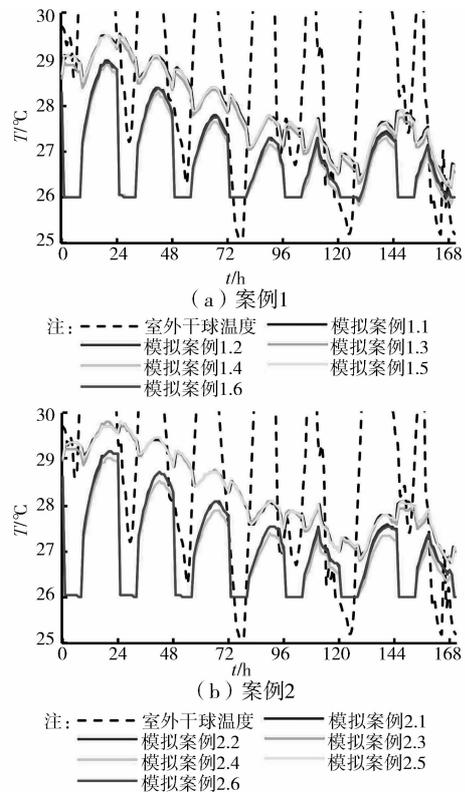


图 4 经典梅雨季节气象参数下的模拟室内温度结果  
(7 月 20 日—26 日)

Fig. 4 Simulated indoor temperature with typical plum rain season weather data(July 20th-26th)

室内相对湿度模拟结果见图 5。结果显示,在 2 个案例中的室内相对湿度均在 65%~90% 之间,且比 2013 年的实测数据高。案例 1 的相对湿度值比案例 2 的相对湿度低。HAM 模型与 EMPD 模型的相对湿度模拟结果波动较小,且二者的结果相近,模拟结果差异较小。而 CTF 模型模拟的相对湿度曲线波动较大,且与另 2 个模型的模拟结果差异较大。

模拟案例中的能耗情况如表 4 所示。可以看出,案例 1 的能耗低于案例 2,表明建造年代较晚的建筑的能耗状况要优于建造年代较早的建筑。有研究<sup>[18]</sup>表明多孔材料的吸放湿特性可以降低室内湿度并进而降低室内空气焓值,HAM 模型和 EMPD 模型中包括建筑围护结构的吸放湿作用,相当于使用了吸放湿材料,而 CTF 模型并没有考虑围护结构的吸放湿作用,也就意味着并未使用吸放湿材料。因此在 CTF 模型的模拟情形中室内空气的湿度仅能通过通风和除湿机排出室外,当运用 CTF 模型进行能耗模拟时,除湿过程会消耗更多的能耗。当换气次数为 0.5 时,空气中的水蒸气主要留在室内,此

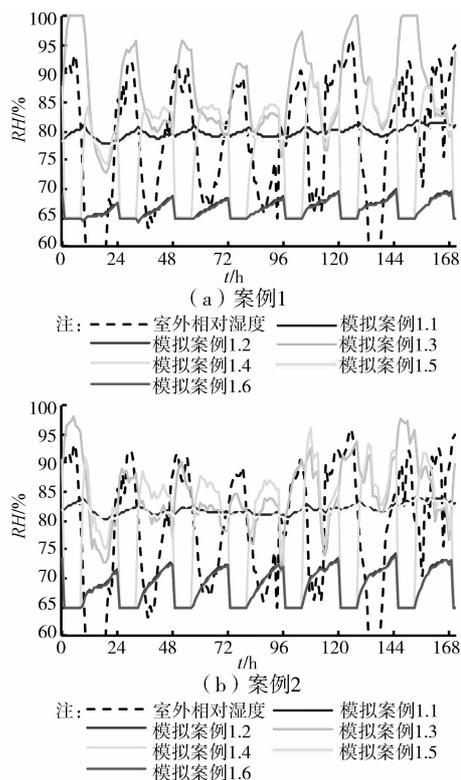


图 5 经典梅雨季节气象参数下的模拟室内相对湿度结果  
(7月20日-26日)

Fig. 5 Simulated indoor relative humidity with typical plum rain season weather data (July 20th-26th)

表 4 典型梅雨季节气象参数下的能耗情况及  
不同能耗模拟模型的准确性对比

Table 4 Energy consumption under typical plum rain season weather data and simulation inaccuracy of different models

案例	能耗模型	能耗/kW·h	误差/%
案例 1 (换气次数=0.5 ACH)	HAM	211.2	
	CTF	327.3	55.1
	EMPD	207.6	1.7
案例 2 (换气次数=1 ACH)	HAM	285.1	
	CTF	392.4	37.7
	EMPD	207.6	0.6

时使用 CTF 模型进行能耗模拟时的误差较大,在案例 1 中达到 55.1%;而当换气次数为 1 时,通风使得室内外空气中的水蒸气混合程度加深,使用 CTF 模型进行能耗模拟时的误差被削弱,在案例 2 中为 37.7%。对两个案例逐渐增大房间换气次数进行模拟计算发现,在案例 1 中当换气次数大于 7 时,CTF 模型的能耗误差减小至 10% 以下,在案例 2 中当换气次数大于 6 时,CTF 模型的能耗误差减小至 10% 以下。由以上分析可得出,当通风量大于 7 时,室内空气的相对湿度基本由室外空气状况及制冷除湿设

备决定,围护结构的吸放湿作用相比之下无法起到有效的湿缓冲作用。当建筑的通风量小于 2 时,围护结构的吸放湿作用对于室内环境的湿缓冲作用明显,可有效降低建筑能耗 30% 以上。此时选择适当的多孔吸放湿材料可降低建筑能耗。

### 3 结论

在长江中下游地区,梅雨季节时持续高温高湿的气候会影响建筑室内空气品质,恶化室内空气热湿环境,增加建筑能耗。笔者运用整体建筑热湿空气流动模型对于梅雨季节时住宅建筑的热湿状况展开模拟,模型基于 Matlab-Simulink 平台建立,并且通过 2013 年的实测调研数据进行了验证。实测及模拟结果均显示在 2013 年梅雨季节,调研建筑在多数时间内室内温度均高于 28℃,相对湿度均高于 70%。在梅雨季节,这些住宅建筑的热湿情况较差,很多情况下需要制冷和除湿措施。

模型随后被用于分析住宅建筑在不同建筑围护结构下的室内热湿状况和能耗情况,模拟在南京地区典型梅雨季节气象参数下进行。结果显示,针对室内温度模拟,HAM 模型、CTF 模型和 EMPD 模型三者之间的差异较小;而对室内湿度的模拟存在较大差异,由于 CTF 模型并没有考虑建筑围护结构的吸放湿作用,因而该模型模拟结果误差最大。在模拟高温高湿气候条件时,当换气次数为 0.5 时会带来高达 55.1% 的能耗模拟误差,而当换气次数为 1 时误差为 37.7%。当通风量大于 7 时,室内热湿参数基本由室外气象参数及制冷除湿设备决定,围护结构的湿缓冲作用相对较小,3 种不同模型的能耗模拟误差较小。当通风量小于 2 时,围护结构的吸放湿作用对于室内环境的湿缓冲作用明显,所以在长江中下游地区,选择合适的吸放湿材料可以对室内环境起到湿缓冲作用,还可有效降低建筑能耗 30% 以上。

### 参考文献:

- [1]《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社,1994.
- [2]赵思雄,陶祖钰,孙建华,等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [3]Lotz W A. Moisture problems in buildings in hot humid climates [J]. ASHRAE Journal,1989,31(4):26-27.
- [4]Fang L,Clausen G,Fanger P O. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality [J]. Indoor Air,1998,8(2):80-90.
- [5]Mendes N, Winkelmann F C, Lamberts R, et al.

- Moisture effects on conduction loads [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35: 631-644.
- [6] Qin M, Belarbi R, Ait-Mokhtar A, et al. Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18: 624-631.
- [7] Qin M, Walton G, Belarbi R, et al. Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52: 1470-1478.
- [8] Nguyen A T, Reiter S, Rigo P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1048-1058.
- [9] Woods J, Winkler J, Christensen D. Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings [M]. Denver: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [10] 王梦林. 新国标下绿色建筑设计软件工具的设计与研发思路[C]//第十届国际绿色建筑与建筑节能大会暨新技术与产品博览会论文集——S02 绿色建筑智能化与数字技术, 2014.
- [11] 万旭东, 谢静超, 赵耀华, 等. 不同城市住宅热湿环境及能耗的调查实测结果分析[J]. *节能技术*, 2008, 26(1): 68-74.  
Wan X D, Xie J C, Zhao Y H, et al. Survey and measurement result analysis on the thermal environment and energy consumption of urban residential buildings [J]. *Energy Conservation Technology*, 2008, 26(1): 68-74. (in Chinese)
- [12] 张华玲, 张瑞雪, 任鑫佳. 重庆村镇住宅热湿环境现状及评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(9): 1119-1122.  
Zhang H L, Zhang R X, Ren X J. Situation and evaluation of dwelling-house thermal environment in Chongqing [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(9): 1119-1122. (in Chinese)
- [13] 王琳, 肖益民. 重庆市高校学生宿舍夏季热湿环境与能耗现状调查研究[J]. *制冷与空调*, 2009, 23(5): 36-44.  
Wang L, Xiao Y M. Study on dormitory indoor environment and energy consumption in Chongqing [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2009, 23(5): 36-41. (in Chinese)
- [14] 毛辉. 成都地区居住建筑热湿环境调查与分析[J]. *制冷与空调*, 2012, 26(3): 280-284.  
Mao H. Survey and analysis on the thermal and humidity environment of Chengdu residential buildings [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2012, 26(3): 280-284. (in Chinese)
- [15] 陈永攀, 王建奎, 林奕, 等. 江南地区建筑湿环境调查及影响分析研究[J]. *浙江建筑*, 2013, 30(2): 43-47.  
Chen Y P, Wang J K, Lin Y, et al. Investigation and analysis of the humidity environment building in the south of the Yangtze River [J]. *Zhejiang Construction*, 2013, 30(2): 43-47. (in Chinese)
- [16] US DoE. Weather Data [DB/OL]. [2013-15-5]. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=2\\_asia\\_wmo\\_region\\_2/country=CHN/cname=China](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=2_asia_wmo_region_2/country=CHN/cname=China).
- [17] Qin M, Belarbi R, Ait-Mokhtar A, et al. Nonisothermal moisture transport in hygroscopic building materials: modeling for the determination of moisture transport coefficients [J]. *Transport in Porous Media*, 2008, 72(2): 255-271.
- [18] Osanyintola O F, Simonson C J. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38: 1270-1282.

(编辑 胡英奎)