

中国气候与人体热舒适气候适应研究

林宇凡^{1,2,5}, 杨柳², 闫海燕⁴, 茅艳⁴, 郑武幸², 李红莲³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学信控学院, 陕西 西安 710055; 4. 河南理工大学 建筑学院, 河南 焦作 454003;
5. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要: 针对中国地域辽阔, 气候多样, 各地区人群对室内环境的热适应有很大差异的现状, 分析了热适应研究的代表性模型, 阐述了国内气候适应现场研究有哪些成果, 从不同角度探讨了气候适应现场研究存在的问题和不足, 提出气候适应研究仍需解决的基础科学问题。

关键词: 气候; 适应模型; 热适应; 现场研究

中图分类号: TU111.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)02-0251-05

近年来, 随着人类社会可持续发展的需要以及全球气候变暖的影响, 研究如何在消费最少能源与资源的前提下, 创造舒适、健康的室内热环境已成为建筑学科前沿的焦点问题。为此, 中国学者展开大规模的现场调研, 目的是揭示人体热舒适的气候适应机制, 就以下问题对人体热舒适的气候适应进行讨论: (1) 目前在中国与热舒适相关的气候适应现场研究有哪些; (2) 分析气候适应研究仍需解决哪些基础科学问题。

1 热适应模型

气候不仅是影响室内热环境与建筑能耗的重要因素, 同时也对不同气候区人群的热舒适产生影响。大量实地测试结果表明: 由实测回归模型得到的人体热中性温度比由 PMV 模型^[1]预测结果更符合人体实际热感觉。在此领域具有代表性的三个模型分别是 Brager 和 de Dear 的模型、Humphreys 和 Nicol 的模型、Fanger 和 Toftum 模型。Brager 和 de Dear 模型提出热适应的三种方式: 行为调节、生理习服和心理适应; Humphreys 和 Nicol 的模型, 提出热适应是受试者的舒适感与其适应行为之间的反馈^[2]; Fanger 和 Toftum 的模型, 提出期望因子可以修正 PMV 模型高估非空调建筑人群热感觉, 生理习服和感知控制的作用通过讨论被否定, 行为调节的作用被认为。最终, 三个热适应模型在行为调节和生理习服的观点上达成一致^[3], 即认为前者作用于热环境但不改变人的感觉与热环境的关系, 后者对人体热反应的影响可合理地忽略。因此, 刻画热适应的关键因素均未以定量的方式提出, 这将是热适应模型未来验证和应用的一大障碍。

2 中国的气候特征及分区

中国是典型的季风气候区。其气候特征是: 冬季降水稀少, 气候寒冷干燥; 夏季降水充沛, 气候炎热潮湿。因此, 我国的气候特点使不同地区人群对气候有不同的适应能力和舒适标准。

为区分我国不同地区气候条件对建筑影响的差异性, 我国 1993 年制定了《建筑气候区划标准》, 将我国的建筑气候的区划系统分为一级区和二级区两级: 一级区划分为 7 个区, 二级区划分为 20 个区。

同年我国制订了《民用建筑热工设计规范》, 确定了我国建筑热工设计分区的原则和分区范围。整个建筑热工设计分区将全国划分为 5 个建筑热工设计分区。分别是严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区、温和地区。

3 与中国气候相关的基于现场研究的气候适应研究

3.1 早期热舒适现场研究

国内的热舒适现场研究始于 1993 年, 谭福君^[4]首次在我国严寒地区开展了办公建筑冬季室内热环境和舒适性的调查研究; 1998 年清华大学夏一哉对北京自然通风居民住宅进行了热舒适的现场测试和问卷调

查^[5]。随后,热舒适研究涵盖了我国东部的大部分地区,但对我国西部大部分区域的热舒适现场调研还处于空白。

国内的现场研究大多遵循国外现场研究的传统方法,得到不同气候条件下所在城市或地区的中性温度、可接受温度范围。基于我国五个主要城市的调研,杨柳^[6]于 2003 年开创性建立了基于我国人群的中性温度与室外空气温度的线性关系式,并成为各气候区考虑被动式设计时的设计基准。

3.2 五个不同气候区热适应模型建立

2007年,茅艳^[7]在我国五个不同气候区选择典型城市为代表,进行现场热舒适研究,建立了人体热舒适气候适应性理论的实施方法,即找出室内热舒适度与室外主要气候状态之间的变化关系,在此基础上得出了不同气候区的热适应模型。

严寒地区: $T_n=0.121t_0+21.488$ ($16.3<T_n<26.2$) $R=0.804$

寒冷地区: $T_n=0.271t_0+20.014$ ($15.8<T_n<29.1$) $R=0.894$

夏热冬冷: $T_n=0.326t_0+16.826$ ($16.5<T_n<27.8$) $R=0.907$

夏热冬暖: $T_n=0.554t_0+10.578$ ($16.2<T_n<28.3$) $R=0.973$

温和地区: $T_n=0.517t_0+11.166$ ($16.4<T_n<23.4$) $R=0.879$

我国不同气候区热适应模型的建立,很好地解决了室外气候条件和人体热舒适之间的关系,它可以预测不同气候下的室内舒适温度,并确定了室内舒适温度的范围。

3.3 典型气候区域中性温度的预测模型

该模型选取对人体热舒适影响最大的四个参数:温度、水汽压、太阳辐射和风速做为自变量,每个气候区的中性温度做为因变量,分别研究因变量和自变量之间的相关关系。

分析结果如表1所示^[8],大多数地区中性温度和室外主要环境参数具有较高相关性($P<0.001$)。但中性温度与室外温度、水汽压的相关性要高于和太阳总辐射、直接辐射、风速的相关性。图1是湿冷湿热地区中性温度和室外各气象参数之间的散点图和回归曲线^[8]。

表 1 中性温度与室外单一气象要素的决定系数
Tab.1 Decision coefficient of neutral temperature and outdoor single of meteorological elements

典型地域气候	与单一气象要素之间				
	室外温度	水汽压	太阳总辐射	风速	直接辐射
干冷干热	0.857	0.810	0.805	0.777	
寒冷温和	0.721	0.721	0.716	0.307	
寒冷湿热	0.933	0.950	0.075 ^a	0.569	0.163 ^a
湿冷是热	0.957	0.953	0.819	0.371	
温和湿热	0.799	0.798	0.733	0.493	0.543
全年温和	0.824	0.827	0.804	0.192	0.782
高原气候	0.630	0.631	0.583	0.193 ^a	0.458

注:显著性水平均为0.05.空白表示该地区直接辐射值缺省.a表示回归模型显著性检验 $0.01 < P < 0.05$

同理,取室外即时气象参数,以中性温度为因变量,即时室外气象参数做为自变量,按照同样的方法进行回归分析得出,大多数地区均具有较高相关性($P<0.001$)。如表2所示^[8],各地区中性温度和室外温度、水汽压的相关性最高,其次是太阳辐射,相关性最弱的是室外风速。图2是干冷干热地区中性温度和室外各气象参数之间的散点图和回归曲线^[8]。

表2 中性温度与室外单一气象要素的二次或线性回归模型的决定系数
Tab.2 Decision coefficient of the linear regression model of neutral temperature and outdoor single meteorological elements

典型地域气候	与单一气象要素之间				
	室外温度	水汽压	太阳总辐射	风速	直接辐射
干冷干热	0.847	0.853	0.327 ^a	0.210 ^b	
寒冷温和	0.661	0.667	0.311	0.227	
寒冷湿热	0.833	0.787	0.387	0.390	
湿冷湿热	0.938	0.951	0.685	0.333	
全年温和	0.801	0.795	0.723	0.004 ^b	0.252

注:显著性水平均为0.05.空白表示该地区直接辐射值缺省.a表示回归模型显著性检验 $P=0.04$,b表示回归模型显著性检验 $P>0.05$

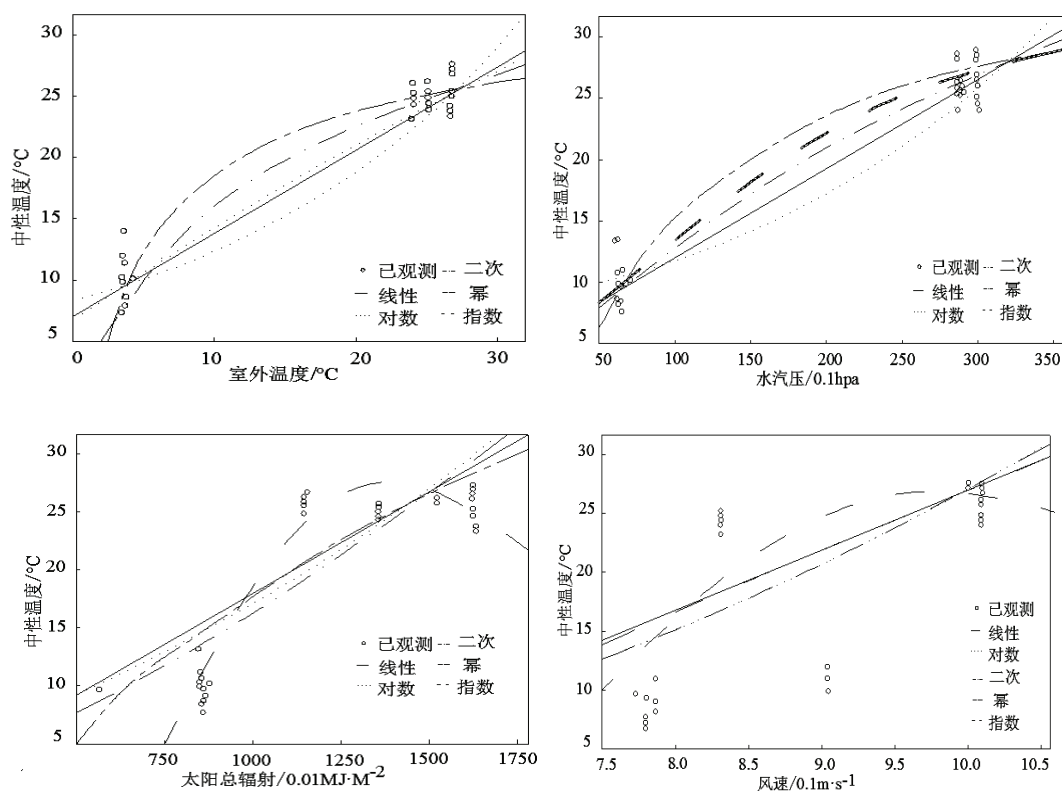


图1 湿冷湿热地区中性温度和室外各气象参数之间的散点图和回归曲线

Fig.1 The scatter plot and regression curve between neutral temperature and the outdoor meteorological parameters in hot humid region and cold and humid region

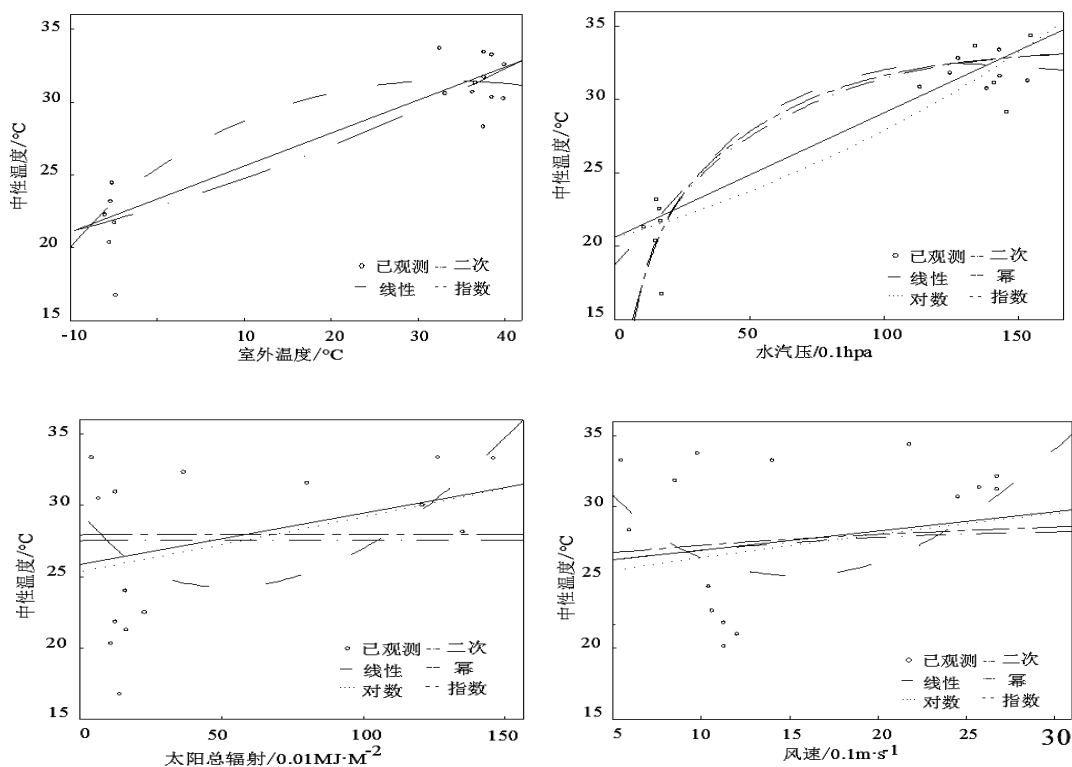


图2 干冷干热地区中性温度和室外各气象参数之间的散点图和回归曲线

Fig.2 The scatter plot and regression curve between neutral temperature and the outdoor meteorological parameters in hot and dry region and cold and dry region

从表2和图2可以看出,我国不同典型气候区,不管线性还是二次关系式,人们的中性温度和室外温度的关系均具有高度统计学意义($P<0.001$),那么不同气候要素作用下中性温度和室外温度的关系又是如何呢?闫海燕博士认为不同湿度作用下中性温度和室外温度的关系如下^[8]:

$$\text{湿度低: } T_n = 0.011T_{rm}^2 - 0.027T_{rm} + 18.96 \quad R=0.8386, \quad P<0.001 \quad (6)$$

$$\text{湿度高: } T_n = -0.018T_{rm}^2 + 1.247T_{rm} + 5.963 \quad R=0.9235, \quad P<0.001 \quad (7)$$

不同辐射作用下中性温度和室外温度的关系,由图3所示,不管冬夏,太阳辐射强度较高的地方,人们的中性温度也随之增加,中性温度的增加还受室外温度和建筑运行模式的共同影响。

不同风速作用下中性温度和室外温度的关系如下:

平均风速低:

$$T_n = -0.072T_{rm}^2 + 5.06T_{rm} - 57.64, \quad R=0.7591, \quad P<0.001 \quad (8)$$

平均风速高:

$$T_n = 0.022T_{rm}^2 - 0.594T_{rm} + 26.50, \quad R=0.6928, \quad P<0.001 \quad (9)$$

公示表明冬季平均风速高地区人们的中性温度要高于平均风速低的地区;夏季风速高地区的中性温度大于风速低地区的中性温度,且两者中性温度的差值随着室外温度的增加而增加。

图4是不同压力作用下中性温度和室外温度的关系。当室外温度低于 0°C 时,不同压力条件下中性温度与室外温度的关系较为复杂,但当室外温度在 0°C 以上时,压力较低地区的中性温度要高于标准大气压地区的中性温度,而且压力越低,其预测的中性温度越高。

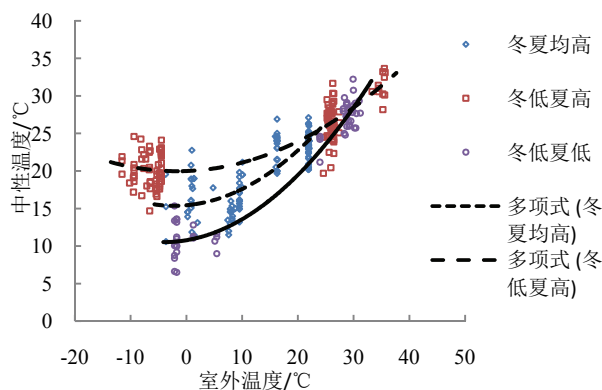


图3 不同辐射强度条件下中性温度与室外温度的关系
Fig.3 The relationship between neutral temperature and outdoor temperature under different intensity

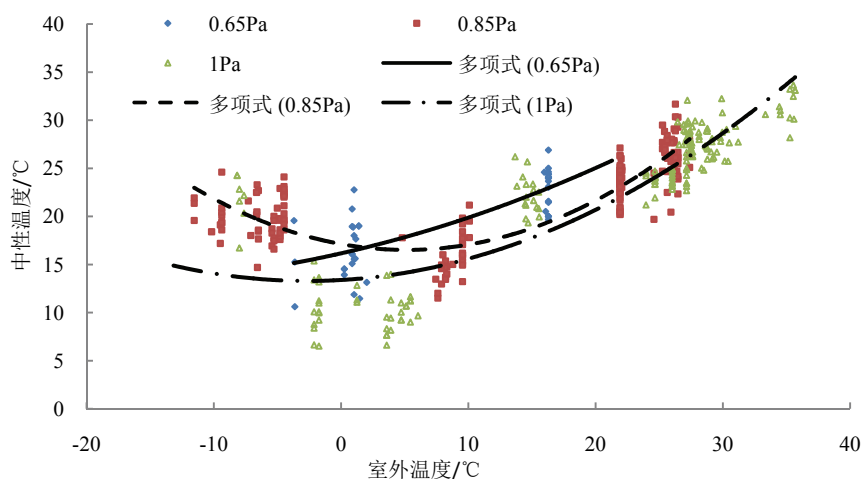


图4 不同压力作用下中性温度和室外温度的关系
Fig.4 The relationship between neutral temperature and outdoor temperature under different pressure

4 研究展望

从目前的研究成果来看,中国学者在热舒适的现场研究广泛开展,但是,仍有一些基础科学问题尚待解决。

(1) 还需完善不同气候类型、强度和持续时间对热舒适的影响研究。闫海燕博士研究中国七个典型地域气候下人们的热反应规律、适应行为分析,但仍需要大量的统计数据来证实除室外温度之外的其它气候要素对热舒适的影响机理,准确提炼影响人体热舒适的关键气候要素。

(2) 时间是影响室外热环境与热适应关系的重要因素,有研究者分别提出在天、星期或月的级别上,通过概念推理等形式建立相应的时均指标^[9].但采用哪一种时间尺度的室外指标仍存在着争议.

(3) 热舒适现场研究忽略了不同气候特征下热适应能力差异的事实,得到的关系式在很大程度上遗失了热适应的重要信息,而仅适用于某种假想的平均的气候和建筑类型^[8].目前,各个气象参数对人体热感觉和热舒适的影响研究主要来自实验室,因此,有必要针对不同地域气候室外各气候要素之间的典型组合开展现场调查研究,以探索不同的热湿耦合对人体热适应和热舒适的作用机理.

(4) 已有的热舒适现场研究忽略了生理适应的作用.事实是当人体感觉结果是舒适时,人们就不需要通过任何调节方式来改变此时的状态,当感觉结果是不舒适时,人们就会通过生理、心理、行为的反馈与环境进行多种交互作用,使自身逐渐恢复到舒适的状态.

近年来,有研究者将生理指标引入人体热舒适研究^[10-17].目前的生理热适应研究主要集中在两个方面,一是探讨哪些生理参数可以客观反映人体热舒适,二是选取若干生理参数,通过实验测试分析它们与人体热舒适的关系.虽然现有的生理热适应研究弥补了热适应模型将室内热中性温度简单归结为室外气候的影响,揭示了热适应对热舒适的影响机理,但这方面的研究还不够深入完善,因此,生理热适应的研究还需在以下方面进一步探讨:

如何揭示在不同的环境温度下,人体是否会形成不同的生理适应?学者张宇峰^[3]认为当处于可以适应温度区时,生理适应对偏离舒适条件下的人体主观热反应有显著的影响作用,生理适应能力更强的人感觉舒适和可接受的温度范围要更宽泛一些.中国学者建立了各气候区室内热中性温度与当地室外气候条件的气候适应模型,但从生理适应机制角度来解释为什么不同气候区人群的热中性温度会有差异,这方面的研究还处于空白.

(5) 人体热舒适对建筑节能设计、热工设计具有更重要的指导意义.但目前的热适应模型在建筑的设计、运行及管理方面的应用还缺乏系统的研究,这也是下一步的研究重心所在.

参考文献 References

- [1] FANGER P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [2] HUMPHREYS M A. Field studies of thermal comfort compared and applied [J]. J. Inst. Heat. & Vent.Eng., 1976, 44(1): 5-27.
- [3] 张宇峰,赵荣义.建筑环境人体热适应研究综述与讨论[J].暖通空调,2010,40(9):38-48.
ZHANG Yufeng, ZHAO Rongyi. Literature review and discussion on human thermal adaptation in built environment[J].HV&AC, 2010,40(9):38-48.
- [4] 谭福君.办公建筑冬季室内热环境和舒适性的调查及研究[D].哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1993.
TAN Fujun. Investigation and study on indoor thermal environment and comfort in office building[D].Haerbin: Harbin Construction University,1993.
- [5] 夏一哉,赵荣义,江亿.北京市住宅环境热舒适研究[J].暖通空调,1999(2):1-5.
XIA Yizai, ZHAO Rongyi, JIANG Yi. Study on Beijing residential environmental thermal comfort [J].HV&AC, 1999(2):1-5.
- [6] 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.
YANG Liu. Climatic analysis and architectural design strategies for bio-climatic design [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [7] 茅艳.人体热舒适气候适应性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
MAO Yan. Study on climate adaptability of human being to thermal comfort in China [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [8] 闫海燕.基于地域气候的适应性热舒适研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
YAN Haiyan. Study on adaptive thermal comfort on the basis of regions and climates of China [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [9] NICOL JF, ROAF SC. Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan Project [J].Energy and Buildings, 1996(23):169-174.
- [10] 刘红.重庆地区建筑室内动态环境热舒适研究[D].重庆:重庆大学,2009.
LIU Hong. Thermal comfort in indoor dynamic environment in Chongqing [D].Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [11] WANG Danni, ZHANG Hui, Arens Edwards. Observations of upper- extremity skin temperature and corresponding over-all-body thermal Sensations and comfort[J]. Building and Environment,2007,42(12):3933-3943.
- [12] HUIZENGA Charlie, ZHANG Hui, Arens Edward. Skin and core temperature response to partial and whole-body heating and cooling [J]. Journal of Thermal Biology,2004, 29(7- 8):549-558.
- [13] KAZUYO Tsuzuki, YUTAKA Toehihara, TADAKATSU Ohnaka. The effects of wind and thermal radiation on thermal response during rest and exercise in a cold environment [J]. Journal of Thermal Biology, 1993,18(5/6):633-637.

(下转第 265 页)