



新的热适应研究理论模型与方法及其在湿热地区的应用^{*}

华南理工大学 张宇峰[☆] 王进勇 陈慧梅 孟庆林
清华大学 赵荣义

摘要 针对现有热适应研究存在的问题,提出新的热适应研究理论模型与方法,并在我国湿热地区应用,验证了新的理论模型与方法的有效性,初步揭示了受试人群的热适应特征。

关键词 热适应 反馈循环 气候室研究 现场研究

New thermal adaptation research model and method and their applications to hot-humid areas

By Zhang Yufeng[★], Wang Jinyong, Chen Huimei, Meng Qinglin and Zhao Rongyi

Abstract Aimed the problem existing in thermal adaptation research, puts forward a new thermal adaptation research model and a related method, applying them to hot-humid areas in China. Validates their effectiveness. And reveals the adaptive characteristics of the tested people to some extent.

Keywords thermal adaptation, feedback loop, climate chamber study, field study

[★] South China University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

热舒适研究始于上世纪初,于 70 年代形成了以人体热平衡方程和人工气候室实验为基础的經典热舒适评价模型。随后,许多现场研究发现,此模型无法准确预测实际建筑中的人体热反应,由此提出了热适应观点和假说,以期合理解释现场研究与气候室研究结果之间的区别,准确预测实际建筑环境中的人体热反应。

近年来,建筑环境人体热适应研究受到越来越多的关注,在世界各地广泛开展了大规模的现场调研,研究者相继提出若干热适应研究理论模型,以期揭示人体热适应的内在机理。我国的热适应研究始于 1999 年,目前已在华北、华中和华南等地开展了诸多现场调研,积累了大量有价值的观测数据。笔者也于 2008—2009 年在我国湿热地区(广州)开展了自然通风建筑中人群的热适应研究,其中包括现场研究^[1]和气候室研究^[2-3],并对建筑环境人体热适应的国内外研究现状作了详尽的文献

综述^[4]。本文以新的热适应研究理论模型与方法为主线,回顾和总结笔者的前期工作,给出研究的整体框架和清晰脉络,以供同行参考。

1 现有研究存在的问题

在建筑环境人体热适应研究领域,热适应理论模型及其关键适应因素研究可视为理论研究,与热适应相关的气候室研究和现场研究可视为实验研究。一般地,理论研究为实验研究揭示内在机理并提供解释,实验研究为理论研究提供新的观察发现和验证。基于前期文献综述,笔者从以下四方面分析探讨建筑环境人体热适应理论与实验研究存在的脱节及其带来的问题。

1.1 反馈循环

反馈循环是热适应观点有别于经典热舒适研究观点的重要特征,详细描述包括驱动环节和作用环节的反馈循环过程,对理解热适应的内在因果关

①[☆] 张宇峰,男,1979 年 4 月生,博士,副教授
510640 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,建筑节能研究中心

(020) 87112304

E-mail: zhangyuf@scut.edu.cn

收稿日期:2010-02-26

^{*} 国家自然科学基金资助项目(编号:50708038,50838003),华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助课题(编号:2008ZC18)

系至关重要。现有热舒适理论模型中提及的反馈循环过程相关信息概括如下:

1) 行为调节代表了即时的和有意识的反馈循环,其中不适感或不满意感不仅是行为调节的结果,同时也是行为调节的起点^[5]。

2) 行为调节包括人有意识或无意识所作的调整,这些调整反过来改变主导人体热平衡的热质流动^[5]。

3) 现场调研中受试者感觉舒适的环境参数变化范围比理性指标预测结果要宽很多, Nicol 和 Humphreys 首次指出这可能是受试者的舒适感与他们的行为之间反馈的结果,他们适应了现场研究的气候环境^[6]。

4) 生理习服受自律神经系统支配并直接影响体温调节设定点^[5]。

5) 心理适应包含认知和文化因素的作用,描述习惯与期望会改变人对感觉信息感知与反应的程度^[5]。

由上可知,现有热适应理论模型对反馈循环过程的描述并不完整,未提及生理习服和心理适应的反馈循环起点,也未详细刻画任一方式热适应反馈循环的全部过程。这使得热适应内在机理探寻所依托的理论框架不清晰,针对反馈循环构成要素的实验研究无法展开,对实验现象的解释也只能停留在定性推断和概念分析阶段。

1.2 关键适应因素

在现有热适应理论模型中,刻画热适应的关键因素均未以定量的方式提出,这给热适应模型的实验验证和实际应用带来障碍。

在 Brager 和 de Dear 提出的热适应模型^[5]中,以往热经历(历史)与感知控制是影响热期望与心理适应的关键因素。但模型仅给出这些因素的概念性解释,而无定量的概念与方法,这在一定程度上造成了选择关键适应因素上的混乱,相关文献中已出现了以室内、室外或室内外综合热环境参数为热适应特征指标的研究。

在 Fanger 和 Toftum 提出的修正 PMV 模型^[7]中,期望因子是其关键适应因素,且有明确的方法加以确定,但其中两个最为重要的参数,即全年热天气的持续时间和自然通风建筑与当地其他空调建筑的相比性,都是模糊的定性参数,而非严格的定量参数,由此造成模型实际使用上的困难和

理解上的一致性。

1.3 热适应的气候室证据

Brager 和 de Dear 首次收集整理了与热适应相关的气候室研究成果^[5](见表 1)。他们通过对这些研究成果间的对比分析指出,较慢的生理习服过程与相对适中的建筑环境的热适应关系较小,在住宅和办公建筑中,静坐或轻微活动者的主观不适和热可接受度不受生理习服过程影响。

表 1 与热适应相关气候室研究的基本情况

受试者	受试地点	测试方法	来源
丹麦大学生	丹麦	1	文献[8]
丹麦冬泳者	丹麦	1	文献[9]
丹麦冷藏仓库的肉类包装工人	丹麦	1	文献[9]
热带地区常驻居民	丹麦	1	文献[10]
新加坡大学生	新加坡	1	文献[11]
中国香港大学生	中国香港	2	文献[12]
美国人	美国	2	文献[13]

注:测试方法 1 为偏好温度方法;测试方法 2 为稳定工况方法(设计不同温湿度组合工况获取受试者的稳态反应)。

以上热适应气候室研究证据的提出基于以下观点:其一,热适应的作用主要体现在最佳环境下的人体热反应上(即中性(或偏好)温度);其二,气候、生活或工作环境不同形成的生理习服背景不同。这些观点并不完全合理,说明如下。其一,热适应不仅能影响人体在最佳环境下的热反应,还可能更为显著地影响人体在偏热(冷)环境下的热反应;其二,所有形成生理习服背景的因素,如气候、季节、长期生活或工作的环境,都可能同时影响受试者的热经历,这将反过来改变受试者的热期望和心理适应水平。因此,现有的热适应气候室研究证据还不够充分,不能完全否定生理习服的作用,对证据的解释需要更为全面的考虑。

1.4 热适应的现场证据

现场研究为热适应提供了大量证据,现有的热适应现场证据可分为以下三种。第一种为热感觉与室内热环境指标的线性关系(一般以中性温度和可接受温度范围为其表征),第二种为室内中性温度与室外热环境指标的线性关系。这两种热适应证据都建立在现场研究结果与人体热平衡模型(如 PMV 模型)预测结果的对比,或在不同建筑类型、季节或气候的对比基础上。第三种证据为适应行为出现的频率或概率与室内或室外热环境指标的线性关系。以上三种热适应现场证据均与室内或室外热环境指标密切相关,室内外热环境指标的选

取在很大程度上决定着现场证据所揭示的意义与效力。

常见的室内热环境指标可分为简单指标(空气温度、作业温度、黑球温度和新有效温度)和综合指标(包含影响人体热反应各已知变量的指标,如 *PMV* 和标准有效温度)。简单指标具有明确的物理意义、成熟的测试技术和便利的应用条件,基于简单指标的现场证据明显居多。但是,简单指标可能无法全面表征实际建筑的室内热环境的特征,基于简单指标的现场证据可能缺乏效力。

以笔者在湿热地区自然通风建筑中开展的现场研究为例,对此加以说明。研究以空气温度为室内热环境指标,对现场观测数据分组后回归获得热感觉与空气温度的线性关系。通过进一步的分析发现,影响热感觉的其他因素(如相对湿度、空气流速等)在数据组间或组内的波动较大(见表 2),这使得关系式所表达的含义及其适用范围变得模糊不清,在此情况下进行的现场研究结果与 *PMV* 模型的对比也不够充分和完整,无法为理论研究提供有效的证据和验证。

表 2 以空气温度分组得到的热环境因素波动

热环境因素	组间波动最大值	组内标准偏差最大值
相对湿度/%	51.48	15.37
空气流速/(m/s)	0.99	0.56
平均辐射温度/°C	17.23	2.43
服装热阻/clo	0.61	0.30

常见的室外热环境指标有室外月平均干球温度和室外月平均新有效温度,显然,它们不能表征所有与热舒适和热适应相关的室外热环境特征。Haldi 和 Robinson 尝试检验了其他参数,如降水量、风速和风向等,作为室外热环境指标的可能性^[14]。对于具有不同反馈循环特征的三种方式热适应,相应的室外热环境指标也不必然相同。

2 新的热适应研究理论模型与方法

综上所述,现有热适应的理论研究和实验研究均存在一定问题,这些问题一方面造成理论模型和关键适应因素的模糊和缺少量化,不能为实验研究提供有效解释和指导,另一方面致使气候室证据和现场证据含义模糊、缺乏效力,无法为理论研究提供有效验证。现有热适应的理论研究与实验研究关系松散,存在明显的脱节,这使得热适应内在机理与因果关系的深入挖掘无从开展。针对以上问题,本文提出新的热适应研究理论模型与方法,以

期重新架构热适应理论与实验研究的有机联系,揭示建筑环境人体热适应的内在机理。

2.1 新的热适应理论模型

详细刻画三种方式热适应的反馈循环过程是确保热适应理论模型完整性的重要基础,同时,借助经典人体热平衡模型已确立的关系,将其与热适应模型有机结合而非对立,将有助于建立更为清晰的理论架构。

考虑到不适感已被广泛接受为人体热适应的最强驱动力,本文假定人体热反应为所有方式热适应反馈循环的共同起点,同时将人体热平衡模型视为已知的人与热环境的确切关系,由此绘制成新的热适应理论模型图,如图 1 所示。

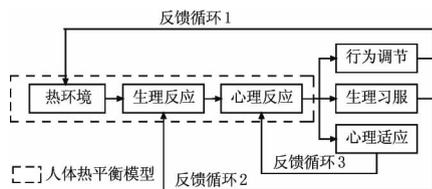


图 1 新的热适应理论模型图^[4]

图 1 明确给出了三种方式热适应反馈循环的形成与作用过程。反馈循环 1 可代表 Nicol 和 Humphreys 提出的模型^[6], 反馈循环 3 可代表 Fanger 和 Toftum 提出的模型^[7], 反馈循环 1 和 3 一起可代表 Brager 和 de Dear 提出的模型^[5]。

2.2 建立理论与实验研究的联系

以新的热适应理论模型为基础,总结已知的热适应关键因素、气候室证据和现场证据,在理论研究和实验研究之间建立联系,如图 2 所示。

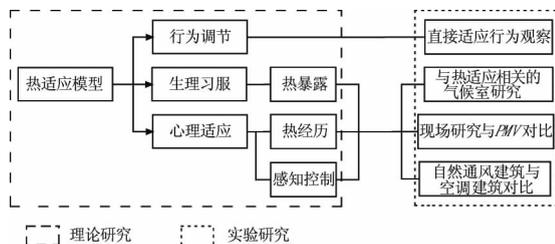


图 2 热适应理论研究与实验研究的联系

观察适应行为在不同人群、气候和建筑类型中的变化,可直接确定行为调节的作用。对比不同气候、季节或长期生活和工作环境人群的气候室实验结果,可为以往热暴露和热经历的综合作用提供证据。当以热适应观点看待 *PMV* 模型时,参与建立 *PMV* 模型用气候室实验的受试者的以往热暴露、

热经历和对测试环境的感知控制水平都与现场研究的受试者不同,由此可推知,现场研究与 PMV 的对比为生理习服和心理适应的综合作用提供证据。同理,自然通风建筑与空调建筑的对比亦如此。

2.3 新的热适应研究方法

由上述分析可知,以新的理论模型为基础建立的理论研究与实验研究的联系中,现有的热适应研究方法除直接适应行为观察外,均无法有效分离不同方式热适应的影响,由此便无法得到对应每种方式热适应的直接证据。据此,本文提出新的热适应研究方法,以期有效剥离三种方式热适应的影响,分别得到行为调节、生理习服和心理适应的直接证据及其对人体热反应的作用关系。

气候室研究具有严格控制的环境条件、准确测量的生理参数和高度可再现的实验过程,这使得气候室研究在揭示热适应内在机理方面具备一定优势。现场研究富含实际建筑的真实性、人与环境的交互作用和各种适应机会,是热适应研究最为重要的来源,能为热适应提供最为有力的证据。本文提出的新的热适应研究方法充分利用气候室研究和现场研究的优势和二者的区别,选取同一组受试者分别展开气候室实验和现场调研,基于综合室内热环境指标全面对比分析气候室研究与现场研究的结果,从而揭示每种方式热适应的作用关系。具体说明如下。

第一,对比相同受试者在相同季节的现场研究(尤其是自然通风建筑的现场研究)和气候室研究结果,因生理习服背景和以往热经历保持一致,可提供感知控制的直接证据;第二,对比不同季节或气候下气候室实验的生理反应,可提供生理习服的直接证据;第三,当感知控制和生理习服的作用已知时,对比不同季节或气候下气候室实验的心理反应,可提供以往热经历的直接证据。

3 湿热地区自然通风建筑人群热适应研究

以新的热适应研究理论模型和方法为基础,笔者开展了湿热地区自然通风建筑人群的热适应研究,以验证理论模型与方法的有效性。以下给出研究的基本情况和主要结果,详细内容可参考文献[1-3]。

3.1 研究概述

选取出生并长期生活于珠江三角洲地区(我国

典型湿热地区)、20~23 岁的 30 名健康在校大学生为受试者,男女比例为 1:1,在校时间 3 年以上,校园生活学习环境(见图 3b)均无空调。现场调研从 2008 年 5 月至 2009 年 5 月,为期一年。热环境物理测量完全依照国际标准 ISO 7726^[15] 进行,采用实验室级别测量仪器,选择距地 0.1, 0.6, 1.1 m 的 3 个高度布置测点。总计获得了 921 人次现场调研数据。



图 3 现场调研建筑和测试

在现场研究期间,分别于秋季(2008 年 9—10 月)和冬季(2008 年 12 月~2009 年 1 月)对 30 名受试者进行气候室实验。采用 Fanger 的经典实验方法^[16],工况涵盖从凉到热的较大范围,实验期间测试受试者的生理热反应(见图 4)。



图 4 人工气候室实验

3.2 热适应的现场证据

选择标准有效温度作为室内热环境指标,按 0.5 °C 间隔对现场研究的原始数据进行分组,并通过样本量加权的方法回归得到热感觉与标准有效

温度之间的线性关系,如图 5 所示。根据 PMV 与

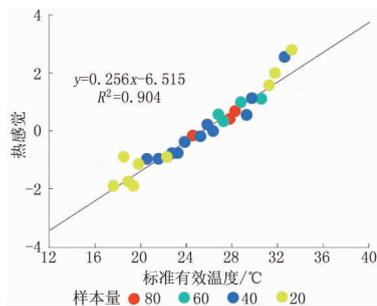


图 5 热感觉与标准有效温度的关系

标准有效温度的线性关系,进一步获得热感觉 TSV 与 PMV 的确定关系式:

$$TSV = 0.7PMV - 0.04 \quad (1)$$

式(1)中的常数项接近 0,可近似忽略,由此验证了修正 PMV 模型^[7]在我国湿热地区的适用性(期望因子为 0.7)。式(1)提供了重要的热适应现场证据。因为行为调节可由 PMV 模型完全考虑,此证据潜在包含了生理习服和心理适应的综合作用。

3.3 季节性适应

应用配对样本 t 检验(paired-samples t test),分析冬季和夏季气候室实验结果在生理和心理热反应上的变化,结果如图 6,7 所示。在多数实验工况下,受试者平均皮肤温度无季节性差异,而热感觉在所有工况下均无显著的季节性差异。这表明湿热地区受试者因季节性热暴露或热经历形成的生理习服或心理适应特征不明显,季节性适应对热反应的影响可近似忽略。

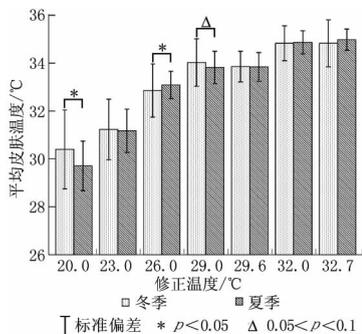


图 6 气候室实验平均皮肤温度的季节对比^[3]

应用成组样本 t 检验(independent-samples t test),分析受试者在实际建筑中热感觉反应的季节变化,如图 8 所示。个别偏热环境下夏季热感觉显著高于春季,大范围的偏冷环境下秋季热感觉显

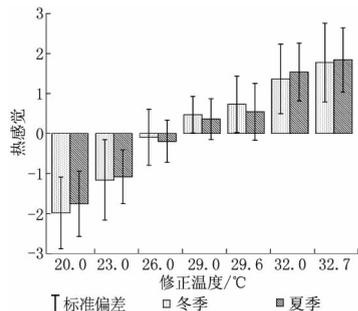


图 7 气候室实验热感觉的季节对比^[3]

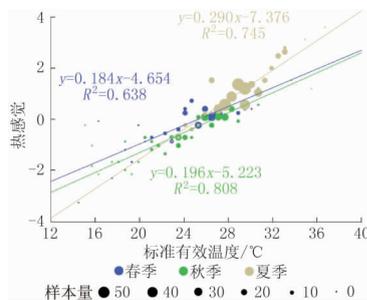


图 8 现场研究热感觉的季节对比

著低于春季。在偏热环境中,受试者未出现明显的季节性适应特征。湿热地区夏季漫长、冬季短暂,四季不甚分明,是以上结果的可能原因。

3.4 气候性适应

PMV 模型^[16]由 Fanger 基于欧美国家(温带气候为主)人群的气候室实验得到。汇总本文湿热地区(属亚热带季风气候)冬季和夏季的气候室实验结果,得到热感觉与 PMV 的关系,如图 9 所示。 PMV 模型在多数工况下明显高估了湿热地区受试者的热感觉,其潜在原因可能是不同气候地区受试者生理习服和与以往热经历相关的心理适应的作用。

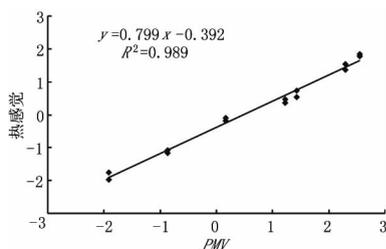


图 9 气候室实验热感觉与 PMV 的关系

两节点模型由 Gagge 等人基于欧美地区人群的实验结果建立^[17],将本文湿热地区人群的气候室研究结果与两节点模型的预测值对比(见图 10)可知,两节点模型严重高估了湿热地区受试者的平

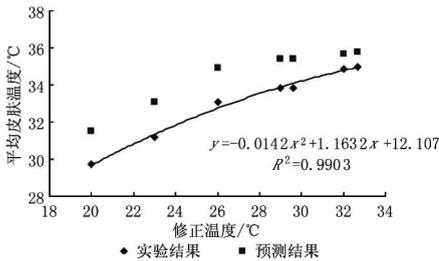


图 10 气候室实验平均皮肤温度的气候性对比^[3]

均皮肤温度,这为气候性生理习服提供了直接证据。

Gagge 等人于 1967 年对平均皮肤温度与热感觉的关系进行了系统研究^[18]。将湿热地区研究结果与之进行对比(见图 11)可知,除少数高温工况外,热感觉与平均皮肤温度的关系基本保持不变,这表明,生理习服能够在很大程度上解释图 9 给出的热感觉气候性差异,而与热经历相关的心理适应作用不明显。

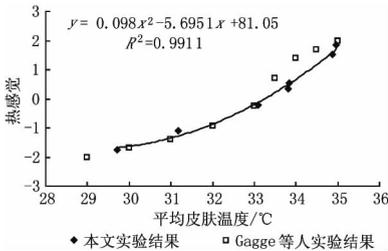


图 11 平均皮肤温度与热感觉关系的气候性对比^[3]

3.5 感知控制

测试环境的变化可影响受试者的感知控制,改变其热期望,从而形成不同的心理适应水平和热反应。将同一组受试者在严格受控气候室内的实验结果与在实际建筑内的调研结果进行对比,结果发现(见图 12),多数情况下二者存在显著性差异,这为感知控制相关的心理适应提供了直接证据。

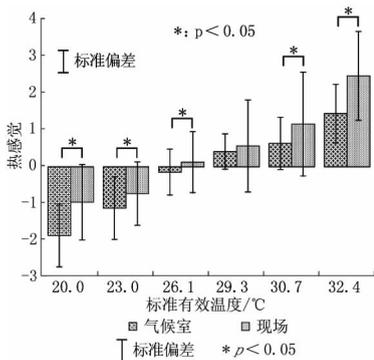


图 12 气候室与现场的热感觉对比

3.6 行为调节

自然通风建筑中最为常见的行为调节为调整服装、开窗通风和使用风扇(吊扇或摇头风扇)。与以上行为相对应,现场调研发现了服装热阻、开窗频率和使用风扇频率随室内环境标准有效温度的变化关系。随着室内环境标准有效温度的升高,受试人群的服装热阻线性降低,开窗和使用风扇的频率提高,这为行为调节提供了直接证据。

3.7 小结

综上所述,基于新的热适应研究理论模型和方法开展的热适应研究,有效剥离了三种方式热适应的影响,分别得到行为调节、生理习服和心理适应的直接证据。对于我国湿热地区长年生活于自然通风建筑的受试人群,行为调节、气候性生理习服和与感知控制相关的心理适应是其主要热适应特征,而其季节性生理习服和与热经历相关的心理适应特征不明显。长年生活环境形成的气候性生理习服对人与热环境关系的影响较大,感知控制的影响稍小。

4 结论

4.1 现有热适应理论研究与实验研究出现脱节是热适应内在机理与因果关系缺乏深入挖掘的重要原因。

4.2 综合考虑人体热平衡模型和热适应模型的关键信息,在完整描述反馈循环过程基础上提出的新的热适应理论模型为热适应机理研究提供更为清晰和完整的理论框架。

4.3 新的热适应研究方法的主要特征为:同时开展气候室实验与现场调研,基于综合热环境指标进行分析。

4.4 湿热地区的热适应研究验证了新的理论模型与方法在获取三种方式热适应直接证据方面的有效性,初步揭示了受试人群的热适应特征。

参考文献:

[1] 陈慧梅,张宇峰,王进勇,等. 我国湿热地区自然通风建筑夏季热舒适研究——以广州为例[J]. 暖通空调,2010,40(2):96-101

[2] 陈慧梅,张宇峰,王进勇,等. 我国湿热地区人群基础热舒适反应研究(1):实验方法与结果[J]. 暖通空调,2010,40(3):83-88

[3] 张宇峰,陈慧梅,王进勇,等. 我国湿热地区人群基础热舒适反应研究(2):研究结果的对比分析[J]. 暖

通空调, 2010, 40(4): 26-30, 25

- [4] 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
- [5] Brager G S, de Dear R J. Thermal adaptation in the built environment: A literature review[J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1): 83-96
- [6] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings[C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards into 21st century. Windsor, UK, 2001
- [7] Fanger P O, Toftum J. Thermal comfort in the future—Excellence and expectation[C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards into 21st Century. Windsor, UK, 2001
- [8] Fanger P O, Langkilde G. Interindividual differences in ambient temperatures preferred by seated persons [G] // ASHRAE Trans, 1975, 81(2): 140-147
- [9] Fanger P O, Højbjerg J, Thomsen J O B. Can winter swimming cause people to prefer lower room temperatures? [J]. International Journal of Biometeorology, 1977, 21(1): 44-50
- [10] Fanger P O. Near-future prospects of the meteorological environment in developing countries in deserts and tropical areas. Improvement of comfort and resulting effects on working capacity [M] // Tromp S W, Weihe W H, Boima J J. Biometeorology, 1972

- [11] de Dear R J, Leow K G, Ameen A. Thermal comfort in the humid tropics. Part II. Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore[G] // ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 880-886
- [12] Chung T M, Tong W C. Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong[J]. Building and Environment, 1990, 25(4): 317-328
- [13] Gonzalez R R. Role of natural acclimatization (cold and heat) and temperature: Effect on health and acceptability in the built environment[M] // Fanger P O, Valborn O. Indoor Climate. Danish Building Reserch Institute, 1979: 737-751
- [14] Haldi F, Robinson D. Interactions with window openings by office occupants [J]. Building and Environment, 2009, 44(12): 2378-2395
- [15] ISO International Standard 7726 Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities[S]. Geneva: ISO, 1998
- [16] Fanger P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970
- [17] Gagge A P, Stolwijk J A J, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [G] // ASHRAE Trans, 1971, 77(1): 247-262
- [18] Gagge A P, Stolwijk J A J, Hardy J D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures [J]. Environmental Research, 1967, 1(1): 1-20

（上接第 19 页）

3 结论

3.1 我国在经历城市化高速进程的同时,要面对低碳化城市规划建设、改善城市环境问题和应对资源能源紧缺的多重问题。

3.2 低碳城市规划需进行建筑区域能源规划,改变传统规划中各专业“各自为战”的传统做法,将城市供水、供热、供电、供气等涉及能源的各项规划统一考虑。

3.3 建筑区域能源规划是一项多元、复杂的系统工程,规划时需结合城市规划、能源计划与状况、灾害预防、居民生活等因素综合分析。

3.4 选择建筑区域能源时,需考虑能源的多元性、可替代性和低碳性。

参考文献:

- [1] 仇保兴. 我国低碳生态城市发展的总体思路[J]. 建设科技, 2010
- [2] 中国低碳生态城市发展战略主报告[M]. 北京: 中国城市出版社, 2009
- [3] 裴军. 城市环境污染的现状、原因及对策建议[J]. 中国科技论坛, 2009, (2 期)
- [4] 戴亦欣. 中国低碳城市发展的必要性和治理模式分析[J]. 中国人口资源与环境, 2009, (3)
- [5] 郑忠海, 江亿. 城市建筑能源规划模拟软件的介绍 [C] // 2008 年全国暖通空调制冷学术年会论文集, 2008
- [6] 周大地. 2020 中国可持续能源情景[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003