

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.108



# 亚热带地区自然通风体育馆室内热舒适范围

李晋, 卢频, 郑海林

(华南理工大学建筑学院; 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510000)

**摘要:**以广州地区自然通风体育馆为研究对象,用问卷和实测的方式分别采集了建筑内运动人群及观众人群的热感觉投票值和室内外热环境参数,初步建立了这两类人群的适应性热舒适模型和对应的热舒适范围。并通过对比,分析了两类人群的适应性热舒适模型和热舒适范围的区别。研究表明:自然通风体育馆室内运动人群的热敏感度0.326 6要小于观众人群的热敏感度0.379 9;运动人群和观众人群的中性操作温度都随着室外温度的升高而升高,前者中性操作温度高于后者,差值在0.80~1.48℃之间;运动人群和观众人群热舒适范围的上下限都随着室外温度的升高而升高,前者热舒适范围的下限与后者相似,但是前者热舒适范围的上限比后者高,差值在1.86~2.48℃之间。

**关键词:**自然通风;体育馆;热舒适;热舒适模型;运动人群

**中图分类号:**TU111.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)05-0173-10

## Indoor thermal comfort range of naturally ventilated sports buildings in the subtropical regions

Li Jin, Lu Pin, Zheng Hailin

(School of Architecture; State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510000, P. R. China)

**Abstract:** Naturally ventilated sports buildings in Guangzhou were taken as studied object in this study, and the parameters of indoor thermal environment and the thermal sensation votes of exercising people and spectators were collected by field measurement and questionnaires respectively. The adaptive thermal comfort models and comfort ranges of these two groups of people were initially established and then compared. The results showed that the thermal sensitivity of exercising people in the natural ventilation sports building is 0.326 6, which is lower than that of spectators (0.379 9). The neutral temperature of exercising people and spectators increases with the increasing of outdoor air temperature, which of the former is 0.80℃ to 1.48℃ higher than that of the latter. And the upper and lower limits of thermal comfort range of exercising people and spectators increase with the increasing of outdoor air temperature, and the lower limits of thermal comfort range of the former is similar as that of the latter, while the upper limits of thermal comfort range of the former is 1.86℃ to 2.48℃ higher than that of the latter.

**Keywords:** natural ventilation; sports building; thermal comfort; thermal comfort model; exercising people

**收稿日期:**2019-02-22

**基金项目:**国家自然科学基金(51878280);十三五国家重点研发计划(No. 2016YFC0700200)

**作者简介:**李晋(1971-),男,教授,博士,主要从事建筑设计及其理论研究,E-mail: liharbin@126.com.

**Received:**2019-02-22

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878280); Key Research & Development Plan of the 13th Five-year Plan of China (No. 2016YFC0700200).

**Author brief:** Li Jin(1971-) professor, PhD, main research interests: architectural design and theory, (E-mail)liharbin@126.com.

提高建筑室内热环境和建筑能效已经成为建筑相关领域的重要课题<sup>[1]</sup>。首先,为了提高建筑用户的健康,适宜的室内热环境是必需的。室内热环境是除光环境、声环境和空气质量环境之外的室内环境的重要组成部分之一<sup>[2]</sup>。当室内热环境质量较低时,可能会出现疾病、生产效率低和不满意等问题。此外,由于建筑的高能耗意味着资源的浪费,甚至会加剧全球变暖<sup>[3]</sup>,因此,节约建筑能耗也具有必要性。

热舒适是室内热环境最重要的评价指标之一,是一种“建筑内用户对建筑室内热环境是否满意的主观评价”<sup>[4]</sup>。尤其对位于气候条件较为极端的区域(比如在亚热带地区)的建筑,这个评价指标极为重要。热舒适研究有助于创造良好的室内热环境,在提高人们的健康和工作效率的同时保持合理的能耗<sup>[5]</sup>。

目前,大多数热舒适研究集中在办公楼、教学楼或居民楼等,其内用户处于静坐等低强度活动状态。但除此之外,人们还在室内进行其他中高强度的活动,比如在建筑内进行运动。过去人们主要在户外进行运动,但近年随着人们对皮肤癌和其他健康风险认识的不断提高和体育运动项目类型的不断增加,越来越多的人开始在室内进行体育运动,室内体育馆日益流行。因此,人们对体育建筑室内热环境质量的要求也日益提高。

亚热带地区常年炎热潮湿,而且夏季持续时间长,夏季体育建筑室内环境过热是该地区面临的主要问题。为解决这一问题,该地区体育建筑中最主要的室内热环境调节方法有两种:空调调节和自然通风调节。空调调节在该地区使用最为普遍,因为它可以为用户提供一个稳定舒适的室内环境。但是,长期呆在全封闭空调环境下会给人体健康带来诸多不良的影响,而且过度使用空调会导致高建筑能耗以及对环境的污染<sup>[6]</sup>。自然通风调节被认为是“一种极具吸引力的室内热环境调节方法”<sup>[6]</sup>。一个优秀的自然通风调节方案可以在以被动方式维持一个舒适、健康的室内热环境的同时减少建筑主动通风和冷却系统的能耗<sup>[6]</sup>。但是,由于自然通风建筑内环境会随着室外环境的变化而发生改变,因此,该类建筑不能保证全天每时每刻都能为运动人群提供舒适的室内环境。某些时刻过高的室内温度甚至会

引发健康问题,比如头昏、脱水、中暑等症状<sup>[2]</sup>。为了最大化自然通风系统节能效率的同时保证室内环境的舒适,及时介入空调、风扇等主动调节手段成为必须。建立自然通风体育馆室内用户的热舒适范围,可以为这种协同调节手段提供理论依据,即为主动调节手段选择合理的介入时间。

适应性热舒适模型是当前探究自然通风建筑室内用户舒适范围的主要研究方法<sup>[7]</sup>。该方法之所以被科学界广泛采用,是因为它考虑了人体对环境的行为适应、生理适应和心理适应<sup>[8]</sup>。正是由于这些适应性,自然通风建筑内,用户可以在更大的温度范围内依旧感觉舒适<sup>[9-10]</sup>。因此,该方法预测的舒适范围比其他方法预测的舒适范围更宽、更精确,从而可以降低用于维持室内用户舒适度的主动调节系统的能耗<sup>[11]</sup>。

相关模型已经被国际上的热舒适标准所采用,作为预测自然通风建筑室内环境热舒适的工具。比如 de Dear<sup>[12]</sup>和 McCartney 等<sup>[13]</sup>所建立的模型分别被美国热舒适标准 ASHRAE 55 和欧洲热舒适标准 EN 15251 所采用<sup>[4,14]</sup>。除此之外,考虑到国际热舒适标准中的模型并不适用于所有地区,先后有研究者们通过实地调研,建立了不同地理环境和气候区域的模型<sup>[15-18]</sup>。但是,现有模型依旧不能直接用于自然通风体育馆,因为这些模型的研究对象多为居住建筑或办公建筑内处于静坐状态的人。受试者的热感觉不仅会根据气候、地理位置的变化而变化,还会根据运动强度的变化而发生改变<sup>[19-21]</sup>。迄今为止,鲜有研究以自然通风体育馆内用户(运动人群和观众人群)为研究对象,建立对应的适应性热舒适模型和舒适范围。

广州地处亚热带地区,其气候特征为常年温暖多雨、光照充足、夏季长,夏季高温和维持体育馆室内热舒适是该地区的主要矛盾。因此,本文以广州地区夏季自然通风体育馆中运动人群和观众人群为研究对象,尝试通过建立两者的适应性热舒适模型,对自然通风体育馆室内用户的热舒适范围进行研究与分析。

## 1 研究方法

### 1.1 调研地点

选择广州市 3 个典型的自然通风体育馆进行实

地调研。3 个体育馆分别位于市中心的 3 所大学,具有相似的室外气候。3 个体育馆皆为侧面开敞,但侧面开敞的面积比不同,涵盖了该地区自然通风体育馆的主要类型。3 个体育馆主要供在校学生进行篮球运动,因此,建筑中的篮球场地被选作调研地点(其中,每个体育馆随机选择了 6 个半场篮球场作为调研场地)。实地调研选在篮球场处于完全自然通风状态,即没有开启风扇及空调等主动调节系统的情况下进行。实地调研在夏天进行,5 月、7 月和 9 月各 7 d。调研环境如图 1 所示,调研场地的平面图如图 2 所示。



图 1 3 个体育馆现场环境

Fig. 1 Field photos of the surveyed surroundings of three sports buildings

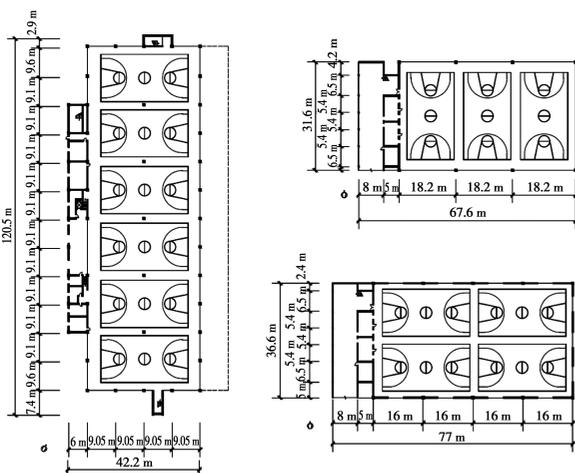


图 2 3 个体育馆的平面图

Fig. 2 Floor plans of three sports buildings

### 1.2 调研对象

为了保证研究的可靠性和代表性,建筑中 1 093 名身体健康的大学生被随机抽选出来参加调研。调研对象首先作为观众人群在篮球场边观看他人进行篮球运动,这个阶段他们处于静坐状态;然后,再作为运动人群在篮球场内进行篮球运动,这个阶段他

们处于运动状态。所有研究对象均在广州生活超过两年,已经基本适应广州地区的热环境。调研对象的基本信息如表 1 所示。

表 1 研究对象的基本信息

Table 1 Anthropometric information of the surveyed subjects

性别	平均年龄/岁	平均身高/cm	平均体重/kg	平均身体表面积/m <sup>2</sup>	生活在广州平均时间/年
男	24.3	175.2	69.3	1.81	10.4
女	22.5	158.7	52.1	1.45	9.2

### 1.3 现场调研

1.3.1 客观物理因素调研 客观物理因素调研包括室外环境参数和室内环境参数的采集。室外环境参数(主要包括室外空气温度)由本地区气象站所采集,室内环境参数(主要包括室内空气温度、相对湿度、黑球温度、风速等)由布置在体育馆内的测量仪器采集。测量仪器的具体型号及对应功能如表 2 所示。测量仪器被放置在篮球场边界(如图 3 所示),仪器探头距离地面 1.1 m。



图 3 测量仪器布置图

Fig. 3 Layout of instruments around basketball court

表 2 仪器的详细信息

Table 2 Detailed information of instruments

仪器名称	型号	测量内容	仪器测量范围	测量精度
热线风速仪	TES-1341	空气温度	-10~60 ℃	±0.5 ℃
		黑球温度	1~60 ℃	±0.2 ℃
		风速	0~5 m/s	±0.03 m/s
		相对湿度	0%~100%	±5%
黑球温度表	AZ-8778	平均辐射温度	0~50 ℃	±0.3 ℃

1.3.2 主观人为因素调研 采用调查问卷进行主观人为因素调研。调查问卷分为 3 个部分:第 1 部

分用来是收集受试者的基本信息,包括:年龄、性别、体重、身高、生活在广州的时间等;第2部分用来收集观众人群的主观热感受和适应性行为;第3部分用来收集运动人群的主观热感受和适应性行为。问卷中的主观热感觉投票刻度采用ASHRAE Standard 55-2013所建议使用的7级刻度,具体刻度图如表3所示。

表3 热感觉投票刻度

Table 3 The scale of thermal sensation vote

热感觉	极热	热	稍热	不冷不热	稍冷	冷	极冷
刻度级别	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

#### 1.4 实测计划

每个研究对象在8:00—18:00之间参与了一次时长60 min的现场实测,该实测分为3个阶段。第1个阶段,实测人员用10 min的时间向研究对象介绍实测计划和方法,并在问卷上记录研究对象的基本信息;第2个阶段,研究对象作为观众人群在篮球场边观看他人进行篮球运动(这个阶段他们处于静坐或者放松站立的状态),并于20 min后及时填写了这个阶段的主观热感受问卷,与此同时,实测人员用仪器记录了20 min内的室内环境参数;第3个阶段,研究对象作为运动人群在篮球场内进行篮球运动(这个阶段他们处于运动状态),并于20 min后及时填写了有关这个阶段的主观热感受问卷,与此同时,实测人员用仪器记录了20 min内的室内环境参数。具体实验流程如图4所示。



图4 实验流程及时间安排

Fig. 4 Procedure and time management of field survey

考虑到当代谢率改变时人的热感觉和皮肤温度在15~20 min内会趋于稳定<sup>[22]</sup>,实测将静坐状态和运动状态的测试时间都设定为20 min。除此之外,考虑到高强度活动产生的热量或汗水可能会影响受试者在低强度活动测试中对热环境的反应<sup>[23]</sup>,实测将静坐状态测试安排在运动状态测试之前。

## 2 研究结果

### 2.1 环境参数测量结果

2.1.1 室外环境参数测量结果 实测采集的主要室外环境参数为室外空气温度。为了使模型更加准确,ASHARE Standard 55推荐使用连续平均室外空气温度,因为该值可以体现人对环境的适应<sup>[4]</sup>。除此之外,de Dear等人指出7 d短得足够包含最近的天气的动态变化,长得足够捕捉到天气的暂时记忆,因此,建议在热适应的研究中使用过去7 d的连续平均室外空气温度<sup>[24]</sup>。据此,结合ASHARE Standard 55给出的计算连续平均室外温度的计算式<sup>[4]</sup>,推算出了计算过去7 d连续平均室外温度的计算式(1)。

$$t_{pma(out)} = (1-\alpha) [t_{e(1)} + \alpha t_{e(2)} + \alpha^2 t_{e(3)} + \alpha^3 t_{e(4)} + \alpha^4 t_{e(5)} + \alpha^5 t_{e(6)} + \alpha^6 t_{e(7)}] \quad (1)$$

式中: $t_{e(1)}$ 和 $t_{e(2)}$ 表示所测时间点前一天和前两天的平均室外温度,其他以此类推; $\alpha$ 是一个推荐值介于0.6和0.9之间的常数,研究中取值为0.6。根据该计算式和实测搜集的室外空气温度,研究计算了实测期间每天的连续7 d平均室外空气温度,如图5所示。

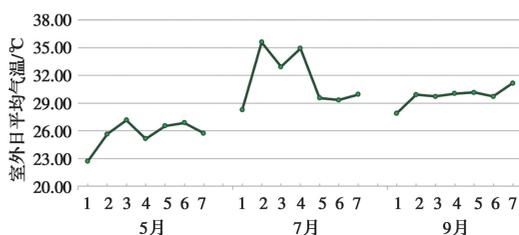


图5 调研期间室外日平均气温

Fig. 5 Prevailing mean outdoor air temperature during field survey

2.1.2 室内环境参数测量结果 实测采集的室内环境参数包括室内空气温度、黑球温度、风速和湿度。为了使模型更加准确,研究采用操作温度作为室内热环境指标。原因有两个:1)较其他室内环境参数,操作温度可以与人的热感觉生成更好的线性关系;2)较其他室内环境参数,操作温度考虑了多环境因素的综合影响,可以更全面地代表室内热环境<sup>[25]</sup>。使用ISO Standard 7726-2002所提供的计算公式(2)计算操作温度<sup>[26]</sup>。

$$t_{op} = A t_a + (1-A) t_r \quad (2)$$

式中: $t_{op}$ 是操作温度; $t_a$ 是平均空气温度; $t_r$ 是平均

辐射温度;A 是一个常数,ISO Standard 中列出了它在不同的风速范围下对应的不同数值。根据该计算式和实测所得室内环境参数,计算出实测期间每天的室内操作温度,如表 4 所示。

表 4 实测期间的室内环境参数

统计信息	$T_a/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$	$V_a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$RH/\%$	$T_{op}/^\circ\text{C}$
Mean	28.96	28.97	0.38	67.05	29.27
Min.	21.16	20.59	0.01	56.05	21.45
Max.	33.41	33.56	1.00	91.45	33.58
S. D.	2.6	2.6	0.4	4.2	2.8

## 2.2 衣服热阻和新陈代谢率

2.2.1 衣服热阻 分别记录了受试者在静坐状态下和运动状态下的穿衣情况,并按照 ASHRAE Standard 提供的方法计算了对应的衣服热阻。观众人群的衣服热阻范围在 0.50~1.00 clo 之间,运动人群的衣服热阻范围在 0.50~0.65 clo 之间。需要指出的是,夏季人群(特别是运动人群)衣服热阻的最小值受到社会习俗的约束,即极少有人穿着暴露或赤裸上身在体育馆进行运动,因此,基于更换衣物所产生的适应性调节行为大大减少。

2.2.2 新陈代谢率 依据 ASHRAE Standard 中提供的不同活动强度对应的新陈代谢率,对静坐和运动人群的新陈代谢率分别给与了赋值。调查对象作为观众的状态为 ASHRAE Standard 中所述的静坐状态和放松站立状态,对应的代谢率为 1.0~1.2 met;调查对象进行篮球运动状态的新陈代谢率为 5.0~7.6 met。值得指出的是,ASHRAE Standard 中所应用的适应性热舒适模型并不适用于新陈代谢率高于 1.3 met 的人群,目前,也没有相关研究建立新陈代谢率高于 1.3 met 的运动人群的适应性热舒适模型。因此,第一次探讨了运动人群的热感觉与室外环境参数之间的关系,并尝试建立了运动人群的适应性热舒适模型。

## 2.3 适应性热舒适模型和热舒适范围

2.3.1 热感觉投票结果 受试者在运动状态和静坐状态下的热感觉投票分布如图 6 所示。运动状态和静坐状态下的热感觉投票值处于-1~1 之间的百分比分别是 98.08% 和 91.67%(5 月份),59.74%和 57.58%(7 月份),94.07%和 93.39%(9 月份)。热感觉投票值处于-1~1 之间的区间为舒

适范围区间<sup>[27]</sup>,因此可推断:实测期间觉得舒适的运动人群要多于观众人群。

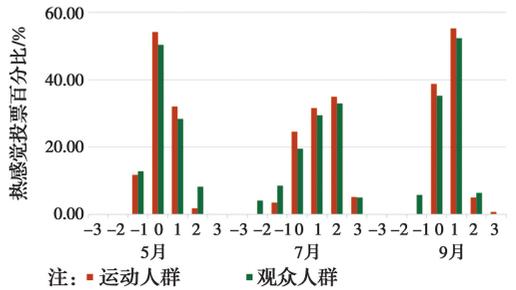


图 6 实测期间热感觉投票百分比

Fig. 6 The Percentage of Thermal Sensation Vote in Each Month

2.3.2 中性温度和舒适温度的上下限 研究依据 de Dear 的推荐,采用建立线性回归的方法求出了受试者处于静坐状态和运动状态下的中性温度<sup>[28]</sup>,具体方法如下:

1) 将所采集的数据进行分组,把每天每个半场对应的室内外环境参数和该球场中受试者在静坐和运动状态下的热感觉投票值作为一个数据组。

2) 建立每组数据中静坐和运动状态下的热感觉投票值和对应区域操作温度的线性关系,得到每组数据的静坐和运动状态下的等式(3)和式(4)。

$$TSV_{观众} = a + b \times t_{op} \quad (3)$$

$$TSV_{运动} = c + d \times t_{op} \quad (4)$$

式中: $TSV_{观众}$ 为静坐状态下的平均热感觉投票值; $TSV_{运动}$ 为运动状态下的平均热感觉投票值; $t_{op}$ 为操作温度。建立线性回归过程中,显著性大于 0.001 ( $p > 0.001$ )的数据组会被作为无效数据组剔除。

3) 计算每组数据所对应的两个等式中当  $TSV_{观众}$  和  $TSV_{运动}$  为零时对应的操作温度值,这两个温度值即是每组数据中受试者分别处于静坐状态下和运动状态下的中性温度。

4) 热感觉投票值处于-1~1 之间的区间为舒适范围区间。计算每组数据所对应等式中,当  $TSV_{观众}$  为+1 和-1 时对应的操作温度值,这两个温度值即是每组数据中受试者处于静坐状态下的舒适温度上下限。同理,可求得受试者处于运动状态下的舒适温度上下限。

2.3.3 适应性热舒适模型 将每天每个球场受试者处于运动状态和静坐状态下的中性操作温度分别与当天连续平均室外空气温度相关联,生成的线性关系如表 5 和图 7 所示,其中, $T_{out}$ 为室外日平均气温, $T_n$ 为日中性温度。

表5 运动人群和观众人群中性操作温度和室外温度的回归方程

Table 5 The regression equations of neutral temperature and outdoor temperature for exercising people and spectators

类型	方程式	$R^2$
运动人群	$T_n=0.3266 T_{out}+18.301$ (5)	0.4150
观众人群	$T_n=0.3799 T_{out}+15.604$ (6)	0.7626

注:  $T_n$  表示中性操作温度;  $T_{out}$  表示室外空气温度

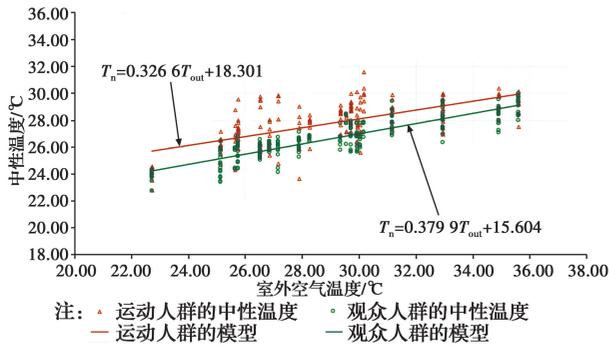


图7 运动人群和观众人群的适应性热舒适模型

Fig. 7 Adaptive thermal comfort model of exercising people and spectators

如表5中所示,对于观众人群,0.3799是日中性温度随室外空气温度的变化率,15.604是一个常数。模型的室外空气温度的有效范围为22.72~35.61℃,对应的中性温度范围为24.24~29.13℃。良好的决定系数 $R^2$  ( $R^2=0.7626$ )表明方程式(6)能较好的解释观众人群的中性温度随着室外温度的变化而变化。显著性水平 $p<0.001$ 表明观众人群的中性温度和室外空气温度之间的线性回归方程具有高度统计学意义。对于运动人群,0.3266是日中性温度随室外空气温度的变化率,18.301是一个常数。模型的室外空气温度的有效范围为22.72~35.61℃,对应的中性温度范围为25.72~29.93℃。良好的决定系数 $R^2$  ( $R^2=0.4150$ )表明方程式(5)能较好地解释运动人群的中性温度随着室外温度的变化而变化。显著性水平 $p<0.001$ 表明运动人群的中性温度和室外空气温度之间的线性回归方程具有高度统计学意义。如图7所示,观众人群和运动人群中性温度(舒适温度)随着室外空气温度的改变而改变。室外空气温度越高,中性温度也越高。这表明观众人群和运动人群的中性温度都跟对应的室外环境密切相关。

2.3.4 热舒适范围 将每天每个球场受试者处于

运动状态和静坐状态下的舒适温度上下限值分别与对应的当天连续平均室外空气温度相关联,生成的线性关系如表6和图8所示。图8中运动人群的上限和下限之间为运动人群的舒适范围,观众人群的上限和下限之间为观众人群的舒适范围。室外空气温度的有效范围为22.72~35.61℃,对应的运动人群舒适温度范围为23.13~32.85℃,观众人群舒适温度范围为22.60~31.00℃。如图8所示,观众人群和运动人群舒适温度范围随着室外空气温度的改变而改变。室外空气温度越高,舒适温度上下限值也越高。这表明观众人群和运动人群的舒适温度范围都跟对应的室外环境密切相关。

表6 运动人群和观众人群的中性温度与室外温度的回归方程

Table 6 The regression equations of comfort temperature and outdoor temperature for exercising people and spectators

类型	模型方程	$R^2$
运动人群舒适温度上限	$T_c=0.3549 T_{out}+20.221$ (7)	0.3868
运动人群舒适温度下限	$T_c=0.2983 T_{out}+16.357$ (8)	0.2316
观众人群舒适温度上限	$T_c=0.4026 T_{out}+16.652$ (9)	0.6508
观众人群舒适温度下限	$T_c=0.3572 T_{out}+14.556$ (10)	0.6176

注:  $T_c$  为舒适温度;  $T_{out}$  为室外空气温度

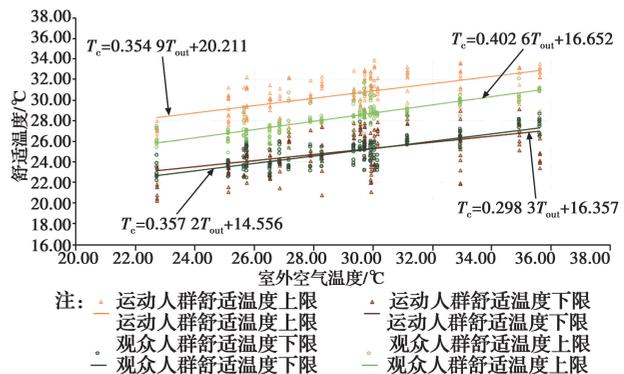


图8 观众人群和运动人群的舒适温度范围

Fig. 8 Comfort range of exercising people and spectators

## 3 讨论

### 3.1 观众人群和运动人群的对比

比较观众人群和运动人群的适应性热舒适模型的斜率(见表5),发现运动人群的斜率(0.3266)要小于观众人群的斜率(0.3799)。已有研究指出适应性热舒适模型的斜率可以被看作人对温度变化的敏感程度<sup>[29]</sup>。因此,运动人群热敏感度要小于观众人群。

比较观众人群和运动人群适应性热舒适模型的中性操作温度(见图 7),发现运动人群和观众人群的中性操作温度都随着室外空气温度的升高而升高,但相同的室外空气温度对应的运动人群的中性操作温度要高于观众人群,差值维持在 0.80 ℃到 1.48 ℃之间。这说明两类人群的适应性热舒适模型具有较大差别,为了准确的推断出相同环境下两类人群的舒适温度,应该分别建立相应的适应性热舒适模型。

比较观众人群和运动人群的舒适温度范围(见图 8),发现运动人群和观众人群的舒适温度范围上下限皆随着室外温度的升高而升高,但运动人群的舒适范围比观众人群的舒适范围更宽,前者舒适温度下限与后者舒适温度下限相近,但前者舒适温度上限比后者舒适温度上限高,差值维持在 1.86~2.48 ℃之间。这说明当观众人群觉得舒适的时候,运动人群基本感觉舒适,但当运动人群感觉舒适的时候,观众人群则不一定舒适。

目前,已有研究指出人的热感觉(包括:热敏感度、中性温度和舒适范围等)会被环境因素、生理因素和心理因素影响<sup>[30]</sup>。为了找到影响研究中受试者热感觉的主要因素,下文将依次对这 3 种因素进行讨论。关于环境因素:受试者处于静坐状态和运动状态时都在球场附近,而且处于这两个状态之间的时差仅 30 min,因此,受试者在两个状态下所处的环境基本相似。关于生理因素:静坐状态和运动状态下受试者的运动强度有较大区别。目前,已有大量研究指出人体中性温度和舒适温度会随着运动强度的升高而降低<sup>[19-21]</sup>,但本文结果却与之相反。综合以上两点,推测受试者处于运动状态与静坐状态的热感觉有差异的主要原因不是环境因素和生理因素,而是心理因素。由于研究中的调查对象多为运动爱好者,他们即便在高温环境下依旧渴望参加运动,这一心理因素使得他们容易忽略温度的变化。将实测中各个温度段所对应的运动人群的热感觉投票值进行统计(如图 9 所示),当室内温度高于 30 ℃时,依旧有高达 60% 的投票值处于舒适区间(-1、0、1)。这表明即便在炎热的室内环境中,大部分运动人群依旧感觉舒适。

基于上述讨论,推测运动爱好者渴望参加运动的心理因素使他们容易忽略温度的变化,甚至在高温下依旧愿意进行体育锻炼,从而忽视温度的变化

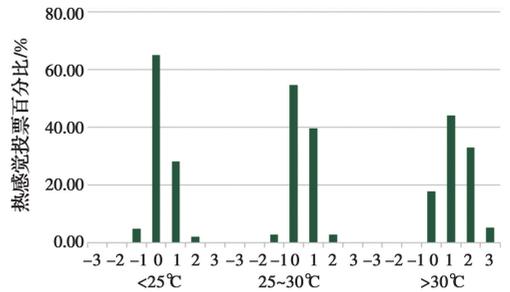


图 9 不同室内温度范围的运动人群热感觉投票百分比

Fig. 9 The percentage of thermal sensation vote in different indoor temperature ranges

和高温对他们健康造成的潜在威胁。因此,未来对运动人群热环境的研究应考虑两种温度,一种对应运动人群生理健康的需求,另一种对应运动人群舒适的需求。

### 3.2 舒适范围与体育馆室内温度对比

将实测中 3 个自然通风体育馆室内温度分别和观众人群、运动人群的舒适温度范围进行比较,具体步骤如下:首先,选择实测期间 5 月、7 月和 9 月室外空气温度最高的那天作为夏季典型日。如图 5 中所示,3 个典型日的室外温度分别为 27.17、35.61、31.16 ℃。其次,根据观众人群和运动人群热舒适范围的计算式(7)~式(10),计算出 3 个典型日中观众人群和运动人群热舒适范围:24.26~27.59 ℃和 24.46~29.86 ℃(5 月典型日),27.28~30.99 ℃和 26.98~32.86 ℃(7 月典型日);25.69~29.20 ℃和 25.65~31.28 ℃(9 月典型日)。最后,将 3 个典型日中两类人群的舒适温度范围分别与当天 3 个自然通风体育馆的全天室内操作温度进行比较,结果如图 10、图 11、图 12 所示。

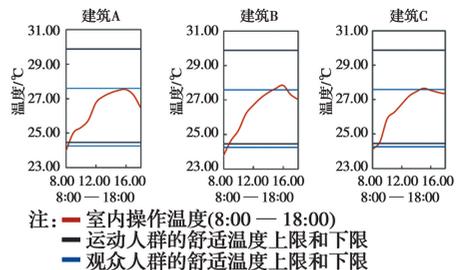


图 10 5 月份典型日 3 个体育馆室内操作温度与舒适范围的比较

Fig. 10 Indoor operative temperature and comfort range of three sports buildings in typical day of May

图中深蓝色线和浅蓝色线分别代表运动人群和观众人群的舒适温度上下限,橙色线代表室内操作

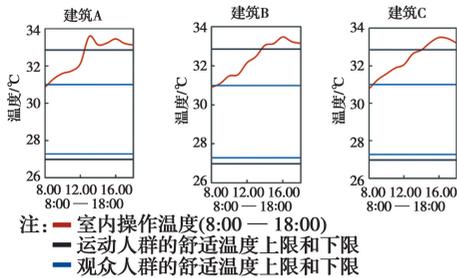


图 11 7 月份典型日 3 个体育馆室内操作温度与舒适范围的比较

Fig. 11 Indoor operative temperature and comfort range of three sports buildings in typical day of July

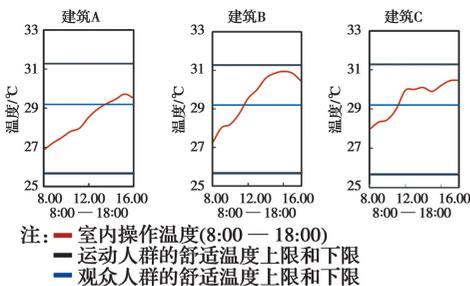


图 12 9 月份典型日 3 个体育馆室内操作温度与舒适范围的比较

Fig. 12 Indoor operative temperature and comfort range of three sports buildings in typical day of September

温度。如图所示,3 个典型日中运动人群的舒适温度范围都比观众人群舒适范围更宽。在 5 月份典型日当天,3 个建筑全天室内操作温度基本都处于观众人群和运动人群的舒适温度范围之内;在 7 月份典型日当天,3 个建筑全天室内操作温度基本都处于观众人群舒适温度范围之外。3 个建筑室内操作温度在 13:00 前基本都处于运动人群舒适温度范围之内,在 13:00 后基本都处于运动人群舒适温度范围之外;在 9 月份典型日当天,3 个建筑室内操作温度只在 12:00 前基本处于观众人群舒适温度范围之内,在 12:00 后基本处于观众人群舒适温度范围之外。3 个建筑全天室内操作温度基本都处于运动人群的舒适温度范围之内。

上述比较结果说明,自然通风体育馆可以在不使用主动调节的情况下在某些时间段为用户提供舒适的环境,但在某些时间段,过高的室内温度依旧无法有效满足用户的舒适需求。其能满足运动人群舒适的时间要长于能满足观众人群舒适的时间。

因此,为了最大化自然通风系统的效率,同时保证建筑室内环境的舒适,及时地介入空调制冷等主

动调节手段成为必须。将自然通风系统和空调系统作为相互辅助的手段,对建筑室内热环境进行协同调节,可以有效提高建筑的经济性和环保性能<sup>[31]</sup>。而通过建立运动人群适应性热舒适模型推测出运动人群的舒适范围,则可以为这种协同调节手段提供理论依据,即为空调制冷等主动调节手段选择准确的介入时间。需要注意的是,应该分别以运动人群和观众人群的舒适范围为参考依据去设定运动区域和观众区域的主动调节系统的介入时间。

研究保证了数据的精确性和分析方法的严谨性,建立了自然通风体育建筑室内运动人群的适应性热舒适模型和舒适范围,从而为体育建筑室内热环境设计和管理提供依据,并对后续相似的研究提供理论基础和参考依据。但是,由于研究的局限性,研究所得体育馆内运动人群热舒适范围的准确度会受到影响。研究的局限性在于研究对象仅限于进行篮球运动的人,由于篮球运动人群的生理和心理状况与其他运动人群不完全相同,因此,研究结果不一定适用于其他种类的运动场馆。为此,有必要在将来开展更广泛的研究,讨论不同运动强度人群的适应性热舒适模型和舒适范围。同时,还需要在将来采集更大的样本量去做进一步的研究来支持本文的研究结果,使该方向的研究更加精确。

## 4 结论

1) 运动人群和观众人群的中性操作温度都与连续平均室外空气温度存在良好线性关系,这说明适应性热舒适模型对亚热带地区自然通风体育馆中这两类人群皆具有适用性。

2) 运动人群热敏感度 0.326 6,小于观众人群的热敏感度 0.379 9。

3) 运动人群和观众人群的中性操作温度都随着室外空气温度的升高而升高,前者中性操作温度一直比后者高,差值维持在 0.80~1.48 °C 之间。

4) 运动人群和观众人群的热舒适范围上下限皆随着室外空气温度的升高而升高,前者热舒适范围下限与后者相近,但前者热舒适范围上限一直比后者高,差值维持在 1.86~2.48 °C 之间。

5) 广州地区自然通风体育馆在夏季某些时间段无法有效满足观众人群和运动人群的舒适需求。分别以运动人群和观众人群的热舒适范围为参考去设定运动区域和观众席区域的主动调节系统开启时

间,可以在最大化自然通风功效的同时,保证体育馆室内热环境舒适。

### 参考文献:

- [1] PIOZ J. Learning from nature as a tool for innovation in architecture [J]. IABSE Symposium Report, 2014, 102(4): 3142-3149.
- [2] CHAPPELLES H, SHOVE E. Debating the future of comfort: environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment [J]. Building Research Information, 2005, 33(1): 32-40.
- [3] International Energy Agency 2016 [S/OL]. <http://www.iea.org/S/OL>.
- [4] Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE Standard 55-2013 [S]. Atlanta, Georgia, 2013.
- [5] LAN L, WARGOCKI P, LIAN Z W. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(5): 1057-1062.
- [6] YU T, HEISELBERG P, LEI B, et al. A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study [J]. Energy and Buildings, 2015, 90: 142-155.
- [7] JIAO Y, YU H, WANG T, et al. Thermal comfort and adaptation of the elderly in free-running environments in Shanghai, China [J]. Building and Environment, 2017, 118(1): 256-272.
- [8] NICOL J F, HUMPHREYS M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 563-572.
- [9] 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, 9(1): 38-48.
- ZHANG Y F, ZHAO R Y. Literature review and discussion on human thermal adaption in built environment [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 9(1): 38-48. (in Chinese)
- [10] BRAGER G S, DE DEAR R J. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55 [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(1): 549-561.
- [11] KLEMM W, HEUSINKVELD B G, LENZHOLZER S, et al. Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summer time in the Netherlands [J]. Building and Environment, 2015, 83(1): 120-128.
- [12] DE DEAR R J. A global database of thermal comfort field experiments [J]. ASHRAE Transaction, 1998, 104(1): 1141-1152.
- [13] MCCARTNEY K J, FERGUS NICOL J. Developing an adaptive control algorithm for Europe [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 623-635.
- [14] CEN. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic: EN15251 [S]. London, Intelligent Energy Europe.
- [15] SINGH M K, MAHAPATRA S, TELLER J. Development of thermal comfort models for various climatic zones of North-East India [J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 14(1): 133-145.
- [16] BOUDEN C, GHRAB H. An adaptive thermal comfort model for Tunisian context: A field study results [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(1): 952-963.
- [17] 李俊鸽,杨柳,刘加平,等. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究 [J]. 暖通空调, 2008, 38(7): 20-24, 5.
- LI J G, YANG L, LIU J P, et al. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(7): 20-24, 5. (in Chinese)
- [18] YAN H Y, MAO Y, YANG L. Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China [J]. Energy and Buildings, 2017, 141(1): 28-38.
- [19] LUO M, ZHANG Z, KEVIN K, et al. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge [J]. Building and Environment, 2018, 131(1): 44-52.
- [20] WANG H, HU S. Experimental study on thermal sensation of people in moderate activities [J]. Building and Environment, 2016, 100(1): 127-134.
- [21] 马高祥,丁秀娟. 新陈代谢对人体热舒适的影响 [J]. 建筑节能, 2009, 7(1): 37-38.
- MA G X, DING X J. Impact of metabolic rate on human thermal comfort [J]. Construction Energy Conservation, 2009, 7(1): 37-38. (in Chinese)
- [22] GOTO T, TOFTUM J, DEAR R D, et al. Thermal sensation and thermo physiological responses to metabolic step-changes [J]. International Journal of

- Biometeorology, 2006, 50 (1): 323-332.
- [23] ZHAI Y C, ELSWORTH C, ARENS E, et al. Using air movement for comfort during moderate exercise [J]. Building and Environment, 2015, 94: 344-352.
- [24] 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 H Y, 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. (in Chinese)
- [25] HUMPHREYS M A, NICOL J F, RAJA I A. Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach [J]. Advanced Building Energy Research, 2007, 1(1): 55-88.
- [26] Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities: ISO 7726 [S]. Geneva Switzerland: International Standard Organization, 2002.
- [27] DHAKA S, MATHUR J, BRAGER G, et al. Assessment of thermal environmental conditions and quantification of thermal adaptation in naturally ventilated buildings in composite climate of India [J]. Building and Environment, 2015, 86 (1):17-28.
- [28] DE DEAR R, BRAGER G. Towards an adaptive model of thermal comfort and preference [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(1): 145-167.
- [29] MUSTAPA M S, ZAKI S A, RIJAL H B, et al. Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer [J]. Building and Environment, 2016, 105 (1) :332-342.
- [30] ZHANG Z J, ZHANG Y F, LING J. Thermal comfort in interior and semi-open spaces of rural folk houses in hot humid areas [J]. Building and Environment, 2018, 128(1): 336-347.
- [31] OROPEZA-PEREZ I, PETZOLD-RODRIGUEZ A H, BONILLA-LOPEZ C. Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling [J]. Energy and Buildings, 2017, 145: 251-258.

(编辑 胡玲)