



热环境下运动人体热感觉研究进展 Perspective on Thermal Sensation in Sports under Thermal Environment

季泰^{1*},袁伟琪²,王坤¹,季浏³

Ji Tai^{1*}, YUAN Weiqi², WANG Kun¹, Ji Liu³

摘要:基于国内外相关研究,分别对人体热感觉的概念界定、影响因素、评价方法以及预测模型做了系统梳理,结果表明:热感觉是一种人体具备的对自身热状态的感知觉能力。影响运动中人体热感觉的因素包括热环境、新陈代谢率、服装、年龄、种族、性别和心理等。虽然人体核心温度、皮肤温度、新陈代谢率、心率、脑电波、肌电以及排汗率等生理指标能间接评价人体热感觉,但热感觉主观评价量表最为直观和易于获得。人体热感觉预测模型种类繁多,但模型的原理均基于人体热量平衡,其中Fanger模型应用最为广泛,已有模型主要适用于低强度运动中人体热感觉的预测,在中高强度运动中的预测准确性较差。未来研究应结合中高强度运动中人体的特点,聚焦高温和寒冷等极端热环境条件下运动中人体热感觉的研究。

关键词:运动;热环境;热感觉

Abstract: Based on related research at domestic and overseas, this paper systematically reviewed and analyzed the conceptual definition, influencing factors, evaluation methods, and thermal sensation prediction models of thermal sensation. Result shows that thermal sensation is a kind of ability that human body perceives its own thermal state. Factors affecting thermal sensation include age, race, gender, thermal environment, clothing, metabolic rate and psychology etc. Although body temperature, skin temperature, metabolic rate, sweat rate, heart rate, and EEG can indirectly evaluate thermal sensation, thermal sensation scale is the most intuitive and accessible. There are various prediction models for thermal sensation. The core is based on human thermal balance, but the applications are limited. The Fanger model is the most widely used. Existing researches mainly focus on low-intensity activities of the human body. Future research should combine the characteristics of the human body with exercise, and pay more attention to the study of thermal sensation at high and medium exercise intensity, especially in extreme hot and cold conditions.

Keywords: sports; thermal environment; thermal sensation

中图分类号:G806 **文献标识码:**A

基金项目:

上海市哲学社会科学规划青年课题(2019ETY002);上海市教育委员会学校体育科研项目(HJTY-2019-D01)

*通信作者简介:

季泰(1989-),男,讲师,博士,主要研究方向为热环境与运动、学校体育学,E-mail:jitai89512@sjtu.edu.cn。

作者单位:

1. 上海交通大学,上海 200240;
2. 中国科学技术大学,安徽合肥 230027;
3. 华东师范大学,上海 200241
1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
3. East China Normal University, Shanghai 200241, China.

热环境由环境温度、环境相对湿度及环境风速3个环境要素共同组成(吴志丰等,2016)。多年来在各类体育比赛中,出现有关于高温环境影响运动员运动表现、甚至对人体健康造成伤害的报道。据报道,在羽毛球世锦赛和美国网球公开赛中,李宗伟、德约科维奇以及费德勒等顶尖运动员都曾表示环境温过高严重影响了他们的运动表现。清华大学、浙江大学、苏州大学等校园马拉松比赛中,都曾出现由于高温导致多名学生不同程度热中暑的案例。因此,对热环境下运动中的人体进行研究具有重要的学术价值和应用价值。

人体热感觉是人体对于自身热状态的本体感觉,分为非常热、比较热、有点热、不冷不热、有点冷、比较冷和非常冷共7个等级(Fanger,1967)。有研究表明,热感觉可有效反映热环境下人体的热应激程度(Casa et al.,2007;Toner et al.,1986)。目前在体育学

领域,有关热环境下运动中人体的研究主要关注生理生化指标的变化和运动表现的改变,对人体热感觉的研究鲜有涉及。而在人体工效学领域,尽管有关热环境下人体热感觉的研究已有半个世纪之久,但多数研究关注人体日常活动状态下或宇航员在航天状态下的热感觉,鲜有研究关注热环境下运动中人体的热感觉。然而,研究热环境下运动中人体的热感觉对热环境下竞技体育赛事组织、群众体育指南制定、学校体育运动负荷设计都有着重要的指导作用。因此,本研究基于国内外相关研究,从热环境下运动中人体热感觉的相关概念、影响因素、评价方法及预测模型 4 个方面进行梳理。

1 概念辨析

目前体育学领域关于热环境下运动中人体的研究主要包括热应激和热适应 2 个方面。而热应激、热适应和热感觉之间有一定差异,但彼此也存在关联(图 1)。

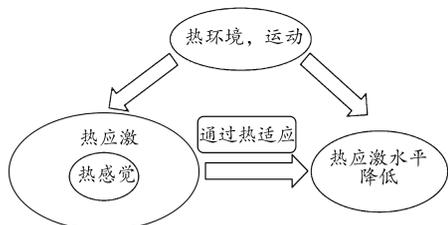


图 1 热环境、热应激、热适应、热感觉之间的关系

Figure 1. The Relationship among Thermal Environment, Heat Stress, Heat Adaptation and Thermal Sensation

1.1 热应激

热应激是指人体接触热环境时受环境致热因子刺激而产生的机体反应,这种机体反应表现在生理和心理 2 个方面(刘鹏等, 2014)。生理方面表现为呼吸速率加快、心率加快、脑充血、肺水肿、体内氧化代谢增加、水和电解质平衡紊乱以及排尿增加等。在运动状态下,这些非特异性的生理反应会加剧,主要表现在脑部温度过高、肌肉温度过高以及脱水 3 个方面(洪长青等, 2004)。而心理方面包括热感觉、热舒适以及出汗感等。

1.2 热适应

热适应,也称热习服,即机体在长期反复的热作用下,对热环境的一系列适应性反应。表现为机体对热的反射性调节功能逐步完善,各种生理功能达到一个新的水平(吴卫兵等, 2013)。在运动中,热习服是机体在热刺激的反复作用下逐步建立的耐受高温和抵抗热损伤的保护性生理反应,可缓解高温热环境引起的机体生理紧张,提高机体运动能力,减少训练伤害及过度疲劳的发生。

1.3 热感觉

传统观念认为,热感觉是人对环境是“冷”还是

“热”的主观描述(胡钦华等, 2007)。但实际上,人体不能直接感觉到环境温度,只能感觉到位于自己皮肤表面下的神经末梢的刺激。因此,周围热环境只是影响人体热感觉的重要因素,人体热感觉并非只取决于周围热环境。如在冬天如果穿的衣服足够多,人体主观上还是会感到热,但此时周围的热环境客观上是冷的。综上,热感觉是一种人体具备的对自身热状态的感知能力。

2 影响人体热感觉的因素

影响热环境下运动中人体热感觉的因素较多,主要包括热环境、平均辐射温度、服装、新陈代谢率、年龄、性别、种族以及心理等。

2.1 热环境

热环境是影响人体热感觉的主要因素,其中环境温度的影响最大。Indraganti(2009)研究发现,在自然通风、室内温度 26.00 °C~32.45 °C 的情况下,室内温度与预测热感觉(PMV)以及实际热感觉(AMV)之间均存在线性相关,其中,温度影响占 PMV 86.1% 的变化,而 AMV 中 42.1% 的变化是由温度造成的。Nicol 等(2010)分别研究了欧洲自然通风以及热带湿热地区建筑内温度与热感觉的关系并建立了线性回归方程,尽管不完全相同,但都表明了温度对热感觉影响的重要性。此外,Kenshalo(1970)发现,热感觉的变化取决于空气温度改变(ΔT)的速率,但具体的速率阈值在个体间存在差异。

环境相对湿度会直接影响皮肤的蒸发散热,进而影响人体的热感觉。关于湿度对热感觉的影响目前存在着争议,有研究在温度 20 °C~34 °C,相对湿度 20%~90% 的热环境范围内进行了人体热感觉的实验研究,结果表明,在高温环境下湿度对人体热感觉的影响较小(Kong et al., 2019)。而另有研究则认为,湿度对热感觉的影响较大,如 Luo 等(2018)发现了新陈代谢率的调节效应,即在新陈代谢率较低时,湿度对人体热感觉的影响较小,但随着新陈代谢率的升高,湿度对人体的影响会变大。田元媛等(2003)研究表明,当环境温度 ≥ 28 °C、空气相对湿度 $\geq 70\%$ 时,湿度对人体热感觉有明显影响。

环境风速会影响人体的对流散热和皮肤蒸发散热,降低皮肤表面湿润度和皮肤表面温度,从而对热感觉产生影响(Du et al., 2019)。风速过大会使人体感到冷而风速过小又会影响人体降温(Kabanshi et al., 2016)。Tucker 等(2006)研究表明,大强度运动中皮肤表面的风速会明显改变运动员所处的实际热环境,从而影响运动中人体的热感觉。

2.2 平均辐射温度

平均辐射温度是指环境四周表面对人体辐射的平均温度。辐射包括太阳辐射以及人体与周围环境之间通过辐射形式的热交换(Tucker et al., 2006)。影响人体热感觉因素的敏感性分析表明,环境温度对人体热感觉的影

响最为显著,其次为平均辐射温度和风速,相对湿度对热感觉的影响最弱(徐涛等,2010)。周峰等(2018)认为,在严寒地区,影响人体热感觉的最有效特征变量是空气温度、平均辐射温度和服装热阻及其交互作用的影响。Vanos等(2017)研究表明,在户外跑步情境下对热感觉影响最大的因素为性别、平均辐射温度以及环境温度。这些研究均表明了平均辐射温度对人体热感觉影响的重要性。

2.3 新陈代谢率

新陈代谢率是反映人体运动强度的重要指标。与安静状态相比,运动中人体新陈代谢率会高于平时数倍,此时人体的新陈代谢率对热感觉的影响也会大大增强。从生理机制上看,新陈代谢率的增加会触发身体的热应激以及体温调节系统进而影响人体的热感觉,运动中肌肉收缩会产生更多的热量,从而影响热感觉,且新陈代谢率越大,肌肉收缩产生的热量越多,人体感觉越热。Mora-Rodriguez等(2008)在高温热环境下比较了运动员在变化的运动强度和固定的运动强度下人体产热和散热的差异,结果发现,变化强度的运动中会产生更大的热负荷和更高等级的热感觉。此外在新陈代谢率较高时会导致人体心理发生较大变化,进而影响热感觉。Luo等(2016)研究表明,新陈代谢率较高时人的心理会发生变化导致对热接受能力的增强。

2.4 服装因素

服装通过保温对人体热感觉产生重要影响。Gagge等(1941)研究了服装调节对皮肤温度的影响并提出了服装隔热指标,Woodcock(1962)在纺织材料的传湿研究中又提出了服装透湿指标。这些研究都表明了服装热阻和服装湿阻对人体热感觉的显著影响。此外,服装颜色的差异也会影响人体热感觉,Nielsen(1990)测量了太阳辐射对户外自行车运动中身穿黑色和白色衣服的受试者热负荷的差异,结果发现,与白色衣服相比,穿黑色衣服受试者的平均皮肤温度高了 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,每分钟心率增加了10次,出汗量每小时增加了100 g。Vanos等(2012)也发现,在颜色暗的表面热负荷更大,对反射率为 $0.21\sim 0.57$ 的服装,热辐射的平均改变量在 $115\sim 157\text{ W/m}^2$ 。

2.5 其他因素

人体AMV还受到地理位置、性别、年龄、气候适应、种族以及对天气的预估等因素的共同影响(Hasan et al., 2016; Kim et al., 2015; Mora et al., 2018)。Nikolopoulou等(2006)研究表明,最近的经历和对天气的预估可以造成热感觉的显著差异。Li等(2016)发现,户外活动的热感觉与环境温度以及晴朗指数显著相关,尽管在有些情况下从客观上而言热环境并不舒适。年龄因素可能会对热感觉产生影响,年轻人相比老年人在相同热环境下的热接受程度更高(尹慧等,2016)。性别因素对人体热感觉也会产生影响,Tanabe等(1987)研究表明,女性的

热中性温度比男性高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境变化对女性热感觉的影响大于男性。Modera(1993)也发现,当运动量较大时女性的最佳环境温度比男性低 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而运动量较小时最佳环境温度相同。

3 人体热感觉的评价方法

人体热感觉的评价方法主要包括热感觉量表法、皮肤温度法、新陈代谢率法、心率变异性法、肌电法、脑电波法以及排汗率法等。

3.1 热感觉量表

热感觉量表是评价人体热感觉最直接的方法,在具体的热感觉等级划分上有所差异。Fanger(1967)提出的热舒适模型中最早使用了7级热感觉调查量表(表1)。Spagnolo(2003)在Fanger 7级热感觉量表的基础上,提出了热中性概念,即将热感觉划分为5个等级更利于数据的分析,但前提是受试者能够精确描述他们的热感觉(表2)。美国建筑技术协会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)2009年提出了热感觉(TSENS)指标,将热感觉分为11个等级(表3)。

表1 Fanger 7级热感觉量表

Table 1 Fanger's Grade 7 Thermal Sensation Scale

热感觉	热	暖	微暖	中性	微凉	凉	冷
PMV值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

表2 Spagnolo 5级热感觉量表

Table 2 Spagnolo's Grade 5 Thermal Sensation Scale

热感觉	冷	凉	中性	暖	热
模型计算值	-2	-1	0	+1	+2

表3 TSENS 11级热感觉量表

Table 3 TSENS Grade 11 Thermal Sensation Scale

热感觉	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
TSENS	极冷	很冷	冷	凉	微凉	适中	微暖	暖	热	很热	极热

3.2 皮肤温度

Mundel等(2016)研究发现,人体热感觉在很大程度上取决于皮肤温度。Wang等(2007)发现,手指皮肤温度或手指-前臂皮肤温度差可以用于人体热感觉的监测。刘国丹等(2014)研究表明,人体在没有显著性出汗时平均皮肤温度与热感觉之间的相关性很强,但当环境温度升高或新陈代谢率增加时人体显性出汗,二者之间的相关性减弱。然而,人体各部分的皮肤温度存在差异,这是由于身体各部分质量、体积以及血流量有所不同(Metzmacher et al., 2018; Roelofsen et al., 2016)。此外男女之间的皮肤温度也存在显著差异,Wang等(2019)研究表明,

由于男性的新陈代谢率比女性高出约 11%，因此男性的局部皮肤温度相对更高。

3.3 人体核心温度

人体核心温度定义为人体内部胸腔、腹腔和中枢神经的温度，即医学和临床上所说的体温。Flouris 等(2015)研究表明，相比于皮肤温度，人体核心温度能够解释的热感觉变异更高。Nagashima 等(2019)认为，人体核心体温和皮肤温度对热感觉影响的解释几乎相同，在热中性之上人体核心温度每上升 1℃，血流就会由于血管扩张增加 56 g/(s·m²)，最终导致皮肤表面的对流散热增加从而影响人体的热感觉，因此，人体核心温度可以作为有效评价热感觉的指标之一。

3.4 心率变异性

人体体温调节活动受自主神经系统(交感神经与副交感神经系统)的支配，心率变异性(heart rate variability, HRV)是一种用来评价自主神经系统活动情况的有效方法，因此也可以用来评价人体的热感觉状态(Shaffer et al., 2017)。Liu 等(2008)发现了心率变异性与热感觉之间的关联，当人体处于非热中性状态时，低频波段与高频波段比值(LF/HF)显著高于热中性状态。

3.5 新陈代谢率

在热中性环境温度下，人体的新陈代谢率最低；在高温条件下，人体的呼吸、循环系统处于较高水平导致新陈代谢率较高；在低温条件下，人体内部产热也会导致新陈代谢率增加。叶晓江(2005)比较了冷环境和热中性环境下人体的新陈代谢率发现，在冷环境下人体的新陈代谢率显著高于热中性环境下的新陈代谢率。

3.6 脑电波

研究表明，热感觉变化时会影响到脑电波的频率进而对其功率密度谱造成显著影响(Oi et al., 2017)。因此，不同类型的脑电波能反映人体的热感觉状态。Yao 等(2008)研究发现，当人体热感觉为稍凉、中性、稍暖时， α 波所占的功率比率显著高于其他热感觉；而当人体热感觉为热或冷时， β 波所占功率比率明显高于其他热感觉。

3.7 肌电

人体热感觉等级较低时会通过加强肌肉活动产热(如冷颤)以维持热平衡，此时肌电与热中性状态相比有较大差异(Sin et al., 2016)。这在动物研究中已得到验证，叶晓江(2005)研究表明：在环境温度较低时，大鼠四肢肌和躯干肌的放电活动显著提高；当环境温度为 26℃~28℃时，其放电活动下降到最低；当环境温度较高时，其放电活动又有所增加，但增幅较小。

3.8 排汗率

研究表明，在热中性和热感觉等级较低时，人体排汗率较低；当热感觉等级较高时，人体通过辐射和对流方式散发的热量不足以带走人体产生的热量，此时汗腺开始分泌汗液，排汗率增大(李文强, 2016)。

4 人体热感觉预测模型的发展

由于人体热感觉受多种因素的共同影响，因此整合多个因素建立人体热感觉预测模型能够大幅提高人体热感觉的预测精确度，有效预防热中暑的发生。对已有的人体热感觉预测模型目前国内外已经提出了几十种。这些模型大致可以分为 4 类：1) Fanger 模型，关注人体热负荷与热感觉之间的对应关系，是最早的人体热感觉预测模型，基于该模型提出了预测平均热感觉投票指标 PMV；2) 两节点模型，将人体分为核心层和皮肤层 2 个节点，代表模型包括 Gagge 模型、MEMI 模型以及 COMFA 模型，基于 Gagge 模型提出了标准有效温度(SET)指标，基于 MEMI 模型提出了生理学等价温度(PET)指标；3) 多层多节点模型，将人体分为多层、多部分及多个节点，但划分形式有所差异，因此也产生了不同的热感觉模型，包括 Stolwijk 模型、Wissler 模型、KSU 模型、Tanabe 模型、Berkeley 模型以及 Fiala 模型，基于 Fiala 模型提出了通用热气候指标(UTCI)；4) 综合性模型，通过整合以上各类模型建立新的模型，如在 Fanger 模型和 MEMI 模型的基础上产生的 Rayman 模型。这些模型各有利弊，但对中到大强度下运动人体热感觉的预测准确性均有待提高。

4.1 Fanger 模型

为了建立一个舒适的室内热环境，Fanger(1967)基于人体热平衡方程[式(1)]，利用堪萨斯州立大学对 1 396 名受试者热感觉的调查研究，建立了人体热感觉预测模型，提出了 PMV 评价指标，并得到了热感觉与热负荷、新陈代谢率以及人体表面积之间的回归关系式[式(2)]。

$$L = M - W - R - C - E_D - E_{re} - E_{sw} \quad (1)$$

式中， M 为人体新陈代谢产生热量； W 为对外做功； R 为辐射散热； C 为对流散热； E_D 为体表扩散失热； E_{re} 为呼吸失热； E_{sw} 为汗液蒸发失热； L 为人体热负荷， $L < 0$ 表示散热速率大于产热速率， $L > 0$ 则表示散热速率小于产热速率。所有项的单位均为 W。

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M/A) + 0.0275]L \quad (2)$$

式中，PMV 是预测热感觉值， A 为人体表面积/m²。Fanger 模型计算出的 PMV 值与热感觉的对应关系如表 1 所示。

Fanger 模型是最早建立的人体热感觉预测模型，对之后人体热感觉模型的相关研究具有开创性的引导作用，应用也最为广泛。1994 年国际标准化组织在 Fanger 热感觉模型的基础上提出了 ISO 7730 标准。另外，Fanger 等(2002)还针对不同的国家(或地区)和气候区域提出了一个适用于不同国家(或地区)的 PMV 指标，即在原有的 PMV 指标基础上分别乘以 0.5~1.0 的修正系数。

4.2 Gagge 模型

Gagge(1986)提出了“两节点模型”，将人体分为核心层和皮肤表面层，并由 2 个子系统组成，即控制系统和被控制系统。核心层和皮肤层的热平衡方程式分别如式(3)、(4)

所示,据此可以计算出核心层及皮肤层温度。

$$M_{cr}c_{cr}\frac{dT_{cr}}{dt} = M + M_{sh} - W + Q_{re} - (K + m_{bl}c_{p,bl})(T_{cl} - T_{sk}) \quad (3)$$

$$M_{sk}c_{sk}\frac{dT_{sk}}{dt} = (K + m_{bl}c_{p,bl})(T_{cl} - T_{sk}) - Q_{dr} - Q_{ev} \quad (4)$$

式中, M_{cr} , M_{sk} 为单位表面的核心层质量和皮肤质量/kg; c_{cr} , c_{sk} 为核心层和皮肤层平均比热容/($J \cdot kg \cdot ^\circ C^{-1}$); T_{cr} , T_{sk} 为核心层及皮肤层温度/ $^\circ C$; t 为时间/s; M 为新陈代谢率/($W \cdot m^{-2}$); M_{sh} 为寒战调节产热量/($W \cdot m^{-2}$); W 为对外所做的机械功/($W \cdot m^{-2}$); Q_{re} 为呼吸热损失/($W \cdot m^{-2}$); Q_{dr} 为与环境间的显热换热量/($W \cdot m^{-2}$); Q_{ev} 为与环境间的潜热换热量/($W \cdot m^{-2}$); K 为核心层与皮肤间的导热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$); m_{bl} 为核心层与皮肤层间的血流量/($m \cdot s^{-1}$); $c_{p,bl}$ 为血液比热容/($J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$)。

在利用上述公式求解出核心层及皮肤层温度后,可计算出 SET (Koelblen et al., 2017)。再根据 SET 与人体热感觉之间的对应关系(表 4),可以对不同实际热环境下人体的热感觉做出预测(De Freitas et al., 2015)。

表 4 SET 评价尺度表
Table 4 SET Evaluation Scale

SET/ $^\circ C$	热感觉	人体体温调节	健康状态
40	很热	皮肤不能蒸发水分	中暑危险增加
35	热		
30	暖和	血管舒张,排汗增加	
25	稍暖和		
20	中性	正常健康状态	
15	稍凉爽	血管收缩	
10	凉爽		口干舌燥
5	冷	开始寒颤	全身循环削弱
0	很冷		

4.3 MEMI 模型

Hoppe 在 1984 年提出的慕尼黑人体热量平衡模型(MEMI)也是根据人体两节点划分法发展而来的,被应用于建筑环境领域(Katavoutas et al., 2015)。MEMI 模型的原理是在人体热平衡方程的基础上[(式 5)],加上另外 2 个传热方程,即:从人体核心向皮肤的传热方程[(式 6)]以及从皮肤表面向服装表面的传热方程[(式 7)],联立上述 3 个方程可求解出服装表面温度、皮肤表面温度以及人体核心温度这 3 个决定人体热感觉的关键指标,继而预测人体的热感觉(Krüger et al., 2017)。

$$M + W + R + C + E_D + E_{re} + E_{sw}S = 0 \quad (5)$$

$$F_{cs} = v_b \times \rho_b \times c_b \times (T_c - T_{sk}) \quad (6)$$

式中, F_{cs} 为身体核心流向皮肤的热量, v_b 为从身体核心流向皮肤的血流量/($l \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$), ρ_b 是血液的密度/($kg \cdot l^{-1}$), c_b 是血液的比热容/($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$), T_c 为人体核心温度/ $^\circ C$, T_{sk} 为人体皮肤表面温度/ $^\circ C$ 。

$$F_{sc} = (1/I_{cl}) \times (T_{sk} - T_{cl}) \quad (7)$$

式中, F_{sc} 为皮肤表面流向服装表面的热量, I_{cl} 是服装热阻/($km^2 \cdot W^{-1}$), T_{sk} 为人体皮肤表面温度/ $^\circ C$, T_{cl} 为服装表面温度/ $^\circ C$ 。

基于 MEMI 模型, Hoppe 进而提出了生理学等效温度(PET)指标。其很好地将不同的实际热环境转化为标准环境并预测人体热感觉(Chen et al., 2018)。PET 具体的评价标准如表 5 所示。

表 5 PET 评价尺度表(Chen et al., 2018)
Table 5 PET Evaluation Scale (Chen et al., 2018)

PET/ $^\circ C$	人体热感觉
≤ 4	很冷
4~8	冷
8~13	凉
13~18	微凉
18~23	舒适
23~29	微暖
29~35	暖
35~41	热
≥ 41	很热

4.4 COMFA 模型

Brown 等(1986)在前人的基础上,同时基于热舒适满足的 4 点标准,即:舒适的人体核心温度、舒适的人体皮肤温度、舒适的出汗率以及接近于 0 的热负荷,建立了 COMFA 热感觉模型。COMFA 模型和 MEMI 模型的不同之处在于,对不同年龄、不同性别个体的新陈代谢率及出汗率的计算存在差异;此外,在身体表面积、人体核心区域到皮肤的血流密度,血液密度以及血液的热容上也有显著不同,这些参数的不同引起了人体核心区域到皮肤表面热量流动计算上的差异。并且在 59 种不同温度、辐射和风速的户外自然条件下研究了模型计算值/($W \cdot m^{-2}$)与实测热感觉之间的相关性,结果表明两者之间的相关系数为 0.91。户外热环境下运动中人体热平衡方程:

$$B = M + R_{RT} - C - E - L \quad (8)$$

式中, B 为热负荷, M 为传导到身体表面的新陈代谢产热量, R_{RT} 为人体受短波和长波辐射吸收热量(如太阳辐射), C 为对流传热量, E 为蒸发散热量, L 为人体长波辐射散热量。

通过上述每一项的计算,并将计算值带入户外环境下运动中的人体热平衡方程,可计算出热负荷值 B (Bud-

get)。基于 COMFA 模型, Harlan 等(2006)发明了 7 点 PMV 量表, 找出了模型计算值与 PMV 之间的对应关系(表 6)。Kenny 评估了 COMFA 模型在户外高强度体力活动中热舒适的适用性, 27 名受试者在室外环境中进行了 30 min 的中等强度运动(步行、跑步和骑自行车)。将 COMFA 模型的 PMV 与受试者 AMV 进行比较, 发现模型随着运动强度的增加误差逐渐变大(Kenny et al., 2009)。

表 6 COMFA 模型计算值与热感觉的对应关系(Harlan, 2006)

Table 6 Correspondence between Calculated Values of COMFA Model and Thermal Sensation (Harlan, 2006)

热力等级	计算值/(W·m ⁻²)	热感觉
-3	≤-201	冷
-2	-200~-121	冷
-1	-51~-120	微冷
0	-50~50	舒适
1	51~120	微暖
2	121~200	暖
3	≥201	热

4.5 多层多节点模型

多层多节点模型(multi-layered multi-node model)由 Stolwijk 提出, 其对人体采取网格划分方法, 将人体由内向外横向分成不同的 4 个层次, 分别是核心层、肌肉层、脂肪层以及皮肤层, 同时由上到下纵向划分成 6 个不同部分, 分别为头、躯干、胳膊、手、腿和足, 从而对人体进行逐层、逐部分的细化分析。有学者认为这种划分方式较单节点和两节点更好(Psikuta et al., 2017; Xie et al., 2018)。

Fiala 模型是在 Stolwijk 模型的基础上发展起来的一种应用较为广泛的多节点热感觉模型。该模型由 2 个相互作用的系统组成: 被动系统部分模拟了人体内的热交换以及身体表面与周围环境间的热交换; 主动系统通过血管收缩、血管舒张、寒战以及出汗 4 种方式模拟了复杂的人体生理现象。国际生物气象学会从 2000 年开始以 Fiala 模型为基础, 提出了通用热气候指数(UTCI)(Kruger et al., 2017), UTCI 与热感觉之间的对应关系如表 7 所示。

4.6 Rayman 模型

Rayman 模型近年来受到了较多关注(Froehlich et al., 2019), Matzarakis 等(2007)综合了 Fanger 模型和 MEMI 模型, 建立了 Rayman 模型, 通过 PMV 和 PET 2 个热感觉预测指标共同反映人体的热状态。Lin 等(2010)发现, Rayman 模型可以精确预测每小时的 PET 及平均辐射温度。Pezzoli 等(2012)为了预防世界公路自行车赛比赛地点的气候条件对运动员可能产生的不利影响, 利用 Rayman 模型对自行车运动员的实地热感觉进行了详细分析, 并凭借对整个运动过程中 PMV 和 PET 指标的分析, 发现了运

动中不同阶段自行车运动员热感觉和相关生理指标的变化规律。

表 7 UTCI 评价尺度表(Kruger et al., 2017)

Table 7 UTCI Evaluation Scale (Kruger et al., 2017)

人体热感觉	UTCI 尺度/°C
极端冷	<-40
非常强冷	-40~-27
强冷	-27~-13
温和冷	-13~0
微小冷	0~9
中性	9~26
温和热	26~32
强热	32~38
非常强热	38~46
极端热	>46

5 结论与展望

5.1 结论

热感觉是一种人体具备的对自身热状态的感知觉能力。影响运动中人体热感觉的因素包括热环境、新陈代谢率、服装、年龄、种族、性别和心理等。虽然人体核心温度、皮肤温度、新陈代谢率、心率、脑电波、肌电以及排汗率等生理指标能间接评价人体热感觉, 但热感觉主观评价量表最为直观和易于获得。人体热感觉预测模型种类繁多, 但模型的原理均是基于人体热量平衡, 其中 Fanger 模型应用最为广泛, 已有模型主要适用于低强度运动中人体热感觉的预测, 在中高强度运动中的预测准确性较差。

5.2 展望

未来应该更加关注高温和寒冷等极端热环境条件下运动中人体热感觉的研究, 并在实践中应用以预防运动中热中暑的发生。在竞技体育中, 可以利用热感觉模型根据比赛当天的热环境条件和具体的运动项目有效预测比赛中运动员的热感觉, 对体育馆内的比赛预先对场馆的温度、湿度进行调节, 对户外比赛根据热感觉等级选择比赛时间。在日常锻炼以及学校体育活动中, 可以根据具体的热环境条件给出科学的锻炼指导, 如不同热环境下进行多大强度的运动最为适宜。

参考文献:

洪长青, 严翊, 谢敏豪, 2004. 热应激与运动[J]. 北京体育大学学报, 27(4): 496-498.
 胡钦华, 丁秀娟, 李奎山, 2007. 关于热感觉和热舒适与热适应性的讨论[J]. 山西建筑, (29): 1-2.
 李文强, 2016. 体力活动下人体热舒适实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
 刘国丹, 元峰, 胡松涛, 等, 2014. 综合皮肤指标及其与热感觉关系的探讨[J]. 暖通空调, 44(11): 109-111.
 刘鹏, 郑洁, 2014. 夏季人体皮肤湿润度水平对热应激响应的研究[J].

- 安全与环境学报, 14(6): 302-306.
- 田元媛, 许为全, 2003. 热湿环境下人体热反应的实验研究[J]. 暖通空调, 33(4): 27-30.
- 吴卫兵, 王人卫, 许弟群, 2013. 中长跑运动员10天热适应过程中机体热调节反应及HSP₍₇₀₎变化[J]. 体育科学, 33(9): 46-51.
- 吴志丰, 陈利顶, 2016. 热舒适度评价与城市热环境研究: 现状、特点与展望[J]. 生态学杂志, 35(5): 1364-1371.
- 徐涛, 刘刚, 康侍民, 等, 2010. 动态热环境下人体热舒适的实验研究[J]. 建筑热能通风空调, (2): 66-70.
- 叶晓江, 2005. 人体热舒适机理及应用[D]. 上海: 上海交通大学.
- 尹慧, 王丽娟, 张亚娟, 等, 2016. 影响人体热舒适的因素及其确定方法综述[J]. 洁净与空调技术, (1): 19-23.
- 张宇峰, 2016. 热环境对睡眠的影响[J]. 暖通空调, 46(6): 55-64.
- 周峰, 孙澄, 2018. 东北严寒地区居住小区室外热环境优化设计研究[J]. 城市建筑, 303(34): 121-123.
- BROWN R D, GILLESPIE T J, 1986. Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model[J]. Int J Biometeorol, 30(1): 43-52.
- CASA D J, BECKER S M, GANI M Set al O., 2007. Validity of devices that assess body temperature during outdoor exercise in the heat[J]. Journal of Athletic Training, 42(3): 333-342.
- CHEN Y, MATZARAKIS A, 2018. Modified physiologically equivalent temperature-basics and applications for western European climate[J]. Theor Appl Climatol, 132(3): 1275-1289.
- DE FREITAS C R, GRIGORIEVA E A, 2015. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices[J]. Int J Biometeorol, 59(1): 109-120.
- DU C, LI B, LIU H, et al., 2019. Quantification of personal thermal comfort with localized airflow system based on sensitivity analysis and classification tree model[J]. Energy Buildings, 194: 1-11.
- FANGER P O, 1967. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation[J]. ASHRAE Trans, 73(2): 1-20.
- FANGER P O, TOFTUM J, 2002. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates[J]. Energy Buildings, 34(6): 533-536.
- FLOURIS A D, SCHLADER Z J, 2015. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat[J]. Scand J Med Sci Sports, 251(SI): 52-64.
- FROELICH D, GANGWISCH M, MATZARAKIS A, 2019. Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments: Application of the RayMan and SkyHelios model[J]. Urban Climate, 27: 1-7.
- GAGGE A P, 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment[J]. ASHRAE Trans, 92: 709-731.
- GAGGE A P, BURTON A C, BAZETT H C, 1941. A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment[J]. Science, 94(2445): 428-430.
- HARLAN S L, BRAZEL A J, PRASHAD L, et al., 2006. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress [J]. Soc Sci Med, 63(11): 2847-2863.
- HASAN M H, ALSALEEM F, RAFAIE M, 2016. Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation[J]. Build Environ, 110: 173-183.
- INDRAGANTI M, 2009. Thermal comfort in naturally ventilated apartments in summer: Findings from a field study in Hyderabad, India[J]. Appl Energ, 87(3): 866-883.
- KABANSHI A, WIGÖ H, SANDBERG M, 2016. Experimental evaluation of an intermittent air supply system-Part 1: Thermal comfort and ventilation efficiency measurements [J]. Build Environ, 95: 240-250.
- KATAVOUTAS G, FLOCAS H A, MATZARAKIS A, 2015. Dynamic modeling of human thermal comfort after the transition from an indoor to an outdoor hot environment[J]. Int J Biometeorol, 59(2): 205-216.
- KENNY N A, WARLAND J S, BROWN R D, et al., 2009. Part A: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity[J]. Int J Biometeorol, 53(5): 415-428.
- KENSHALO D R, 1970. Psychophysical studies of temperature sensitivity[J]. Contrib Sens Physiol, 4: 19-74.
- KIM J T, LIM J H, CHO S H, et al., 2015. Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances[J]. Build Environ, 98: 100-105.
- KOELBLEN B, PSIKUTA A, BOGDAN A, et al., 2017. Thermal sensation models: A systematic comparison[J]. Indoor Air, 27(3): 680-689.
- KONG D, LIU H, WU Y, et al., 2019. Effects of indoor humidity on building occupant' thermal comfort and evidence in terms of climate adaptation[J]. Build Environ, 155: 298-307.
- KRUGER E L, DRACH P, 2017. Identifying potential effects from anthropometric variables on outdoor thermal comfort[J]. Build Environ, 117: 230-237.
- KRÜGER E, ROSSI F, DRACH P, 2017. Calibration of the physiological equivalent temperature index for three different climatic regions[J]. Int J Biometeorol, 61(7): 1323-1336.
- LI K, ZHANG Y, ZHAO L, 2016. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China[J]. Energ Buildings, 133(12): 498-511.
- LIN T P, MATZARAKIS A, HWANG R L, 2010. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort[J]. Build Environ, 45 (1): 213-221.
- LIU W, LIAN Z, LIU Y, 2008. Heart rate variability at different thermal comfort levels[J]. Eur J Appl Physiol, 103(3): 361-366.
- LUO M, WANG Z, KE K, et al., 2018. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge[J]. Build Environ, 131: 44-52.
- LUO M, ZHOU X, ZHU Y, et al., 2016. Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate[J]. Energy Buildings, 118: 152-159.
- MATZARAKIS A, RUTZ F, MAYER H, 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Application of the RayMan model[J]. Int J Biometeorol, 51(4): 323-334.
- METZMACHER H, WÖLKI D, SCHMIDT C, et al., 2018. Real-time human skin temperature analysis using thermal image recognition for thermal comfort assessment[J]. Energ Buildings, 158: 1063-1078.
- MODERA M P, 1993. Skin temperature and evaporative heat loss variations for men and women in thermal comfort[J]. ASHRAE

Trans, 99: 210-220.

MORA, BEAN, 2018. Thermal comfort: Designing for people [J]. ASHRAE J, 60: 40-46.

MORA-RODRIGUEZ R, COSO J D, ESTEVEZ E, 2008. Thermo-regulatory responses to constant versus variable-intensity exercise in the heat [J]. Med Sci Sports Exer, 40(11): 1945-1952.

MÜNDEL T, RAMAN A, SCHLADER Z J, 2016. Head temperature modulates thermal behavior in the cold in humans [J]. Temperature, 3(2): 298-306.

NAGASHIMA Y, OHSUGI Y, HIRAISHI M, et al., 2019. Development of laser speckle blood flowmeter for evaluating the physiological function of skin [J]. Biomedical Phys Engineering Express, 5(5): 055012.

NICOL, HUMPHREYS, 2010. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251 [J]. Build Environ, 45: 7-11.

NIELSEN B, 1990. Solar heat load: Heat balance during exercise in clothed subjects [J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 60(6): 452-456.

NIKOLOPOULOU M, LYKOUUDIS S, 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries [J]. Build Environ, 41(11): 1455-1470.

OI H, HASHIMOTO T, NOZAWA T, et al., 2017. Neural correlates of ambient thermal sensation: An fMRI study [J]. Sci Rep, 7(1): 19-23.

PEZZOLI A, CRISTOFORI E, GOZZINI B, et al., 2012. Analysis of the thermal comfort in cycling athletes [J]. Procedia Eng, 34(4): 433-438.

PSIKUTA A, ALLEGRINI J, KOELBLER B, et al., 2017. Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research: A review [J]. Renew Sust Energ Rev, 78: 1315-1330.

ROELOFSEN P, VINK P, VINK P, et al., 2016. Improvement of the Stolwijk model with regard to clothing, thermal sensation and skin temperature [J]. Work, 54(4): 1009-1024.

SHAFFER F, GINSBERG J P, 2017. An overview of heart rate variability metrics and norms [J]. Front Public Health, doi: 10.3389/fpubh.2017.00258.

SIN N L, SLOAN R P, MCKINLEY P S, et al., 2016. Linking daily stress processes and laboratory-based heart rate variability in a national sample of midlife and older adults [J]. Psychosom Med, 78(5): 573-582.

SMITH C J, JOHNSON J M, 2016. Responses to hyperthermia. Optimizing heat dissipation by convection and evaporation: Neural control of skin blood flow and sweating in humans [J]. Auton Neurosci-Basic Clin, 196(SI): 25-36.

SPAGNOLO J, 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia [J]. Build Environ, 38: 721-738.

TANABE S, KIMURA K, HARA T, 1987. Thermal comfort requirements during the summer season in Japan [J]. Ashrae Transactions, 93: 564-577.

TONER M M, DROLET L L, PANDOLF K B, 1986. Perceptual and physiological responses during exercise in cool and cold water. [J]. Perceptual and Motor Skills, 62(1): 211-220.

TUCKER R, MARLE T, LAMBERT E V, et al., 2006. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion [J]. J Physiol, 574(3): 905-915.

VANOS J K, HERDT A J, LOCHBAUM M R, 2017. Effects of physical activity and shade on the heat balance and thermal perceptions of children in a playground microclimate [J]. Build Environ, (126): 119-131.

VANOS J K, WARLAND J S, GILLESPIE T J, et al., 2012. Thermal comfort modelling of body temperature and psychological variations of a human exercising in an outdoor environment [J]. Int J Biometeorol, 56(1): 21-32.

WANG D, CHEN G, SONG C, et al., 2019. Experimental study on coupling effect of indoor air temperature and radiant temperature on human thermal comfort in non-uniform thermal environment [J]. Build Environ, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106387.

WANG D, HUI Z, ARENS E, et al., 2007. Observations of upper-extremity skin temperature and corresponding overall-body thermal sensations and comfort [J]. Build Environ, 42(12): 3933-3943.

WOODCOCK A H, 1962. Moisture transfer in textile systems, Part II [J]. Textile Res J, 32(9): 628-633.

XIE Y, HUANG T, LI J, et al., 2018. Evaluation of a multi-nodal thermal regulation model for assessment of outdoor thermal comfort: Sensitivity to wind speed and solar radiation [J]. Build Environ, 132: 45-56.

YAO Y, LIAN Z, LIU W, et al., 2008. Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures [J]. Physiol Behav, 93(1): 310-321.

(收稿日期:2019-11-26; 修订日期:2022-04-05; 编辑:丁合)

