

室内人体舒适度研究浅析

杨云洁¹, 张滨, 李玉姣, 袁波, 黎荣, 韩琳²
(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘要:在气象服务中,室内人体舒适度的研究具有十分重要实用价值意义。为了有效预报室内人体舒适度,通过大量的文献分析,归纳总结了国内外与之相关的11大类预报模式,重点讨论不同模式建立的机制性差别,并分析其适用性。由于目前国内外对室内人体舒适度的研究非常少,相关的预报模式鲜有,文章将部分用于室外舒适度预报,但进行室内预报时准确度较高的舒适度模式也纳入了11大类预报模式中。此外,在前人研究基础上,通过科学实验及问卷调查等研究方法,对成都地区的部分高校女性进行室内实际舒适度和预测指标的对比分析。研究结果表明:女性的室内实际舒适度感受要比预测值高1到2个指标。

关键词:人体舒适度; 预报; 室内; 气象服务

0 引言

人体舒适度是指在人类自身与近地大气之间的热交换原理基础上,人体对气温、湿度、风等气象因子综合效应的一项生物气象指标^[1]。它不仅与气温有关,还与湿度有关,是温度与湿度两者的一种综合感受^[2]。

自改革开放以来,我国人民生活水平的日益提高,人们对自身生活的要求不仅仅局限于解决温饱问题,而是更加关注生活的质量以及室内生活环境的舒适问题,因而室内人体舒适度的研究是十分必要的。对于目前的信息时代,人们的学习、生活和工作几乎都是在室内进行的,在室内的时间达到了人一生的80%~90%^[3],如何利用室内人体舒适度的预报来改进室内环境,从而提高学习与工作效率成为了焦点。因此,在气象服务中,室内人体舒适度的研究不仅具有很高的公益价值,而且具有重要的社会经济价值。目前,在国外,室内人体舒适度研究成果相对而言比较多。丹麦学者范格尔(Fanger)提出了热舒适理论和热舒适方程,该理论涉及到了多项与人体舒适度相关的气象因子,其成果在室内人体舒适度的研究进程中,成为了一块重要里程碑^[4]。美国气象生物学家 Stearnan 提出的相对比较完善的以人体平衡方程为基础的感热温度理论,该理论曾经轰动了整个气象生物界^[5-7]。王昭俊^[8]也提出中国严寒地区可以采用有效温度作为舒适指标来预测室内热感觉的观点。在国内,目前全

国各地的大、中、小城市都陆续开展了日常的室外人体舒适度预报工作^[9]。然而,室外人体舒适度是否与室内人体舒适度相符合以及能否用室外人体舒适度的预报结果代替室内人体舒适度的预报结果,还有待研究。室内人体舒适度是由多个因素共同作用的,其影响因素包括空气温度、空气湿度、空气流速、室内平均辐射以及人体自身相应的舒适感觉。所以,研究室内人体舒适度需要从环境以及人体主观感受两个方面着手研究。

总体而言,国外对室内人体舒适度的预报模型研究较多,而中国在室内预报模型的研究方面还是处于不成熟阶段;然而,在气象服务中,室内人体舒适度的研究具有十分重要的实用价值意义。考虑到室内舒适度的实用性,本文归纳了当前国内外相关的室内人体舒适度的研究,通过对各种室内人体舒适度研究成果的讨论,找出合适的且与室内人体舒适度预报的相关公式,为中国室内人体舒适度的气象服务工作做出一定的贡献,有利于气象服务事业的发展 and 人们居住环境质量提高。

1 室内人体舒适度的分类

关于室内人体舒适度的研究可以分为两个方面,一是通过热平衡来分析室内人体舒适度,二是通过温湿风来研究。其中研究方法最为广泛是通过温湿风来进行室内人体舒适度。

1.1 热平衡

1.1.1 PMV-PPD 指标^[1]

丹麦学者范格尔(Fanger)曾经提出预计热指标

收稿日期:2015-03-30

基金项目:国家青年自然科学基金资助项目(41105101);成都信息工程学院科研人才基金资助项目(J201308);成都信息工程学院2013年省级大学生创新创业训练计划资助项目(CX201319)

PMV,影响预计热指标 PMV 的因素有 6 个,它们分别是:空气温度、空气湿度、空气流速、室内平均辐射温度、服装、新陈代谢率等。预计热指标 PMV 是目前实际应用中,最全面、最通用的室内热环境评价指标。在 1984 年,国际标准化组织提出在 ISO7730 标准中采用了 PMV-PPD 标准,并利用该标准来评价热环境。

Fanger 的预计热 PMV 方程:

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times TL \\ = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{ M - W - 3.05 \times [5.73 - 0.007(M - W) - P_a] - 0.0173M(5.87 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 0.42(M - W - 58) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} a_c (t_{cl} - t_a) \}$$

式中: TL 为人体负荷,人体产热量与散热量之间的差值,反映人体对热平衡的偏离程度; M 为人体新陈代谢产热率,人体在分解食物的化学反应中释放能量的速率, W/m^2 ; W 为人体对外做功率,人体不同活动强度下对外输出的机械效率(一般取值为 0), W/m^2 ; P_a 为空气中水蒸气分压力, KPa ; t_a 为人体周围的空气温度, $^{\circ}C$; t_r 为周围环境的平均辐射温度, $^{\circ}C$;

$$t_r = \frac{\sum_{k=1}^n (F_k \theta_{ik})}{\sum_{k=1}^n F_k}$$

F_k 为房间围护结构各内表面积, θ_{ik} 为房间围护结构各内表面温度, $^{\circ}C$; t_{cl} 为衣服外表面温度, $^{\circ}C$;

$$t_{cl} = \frac{35.7 - 0.0275(M - W) + R_{cl} f_{cl} [4.13(1 + 0.01dT) + a_c t_a]}{1 + R_{cl} f_{cl} [4.13(1 + 0.01dT) + a_c]}$$

R_{cl} 为服装热阻值, $m^2 \cdot K/W$, ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot K/W$); f_{cl} 为服装的面积系数,用来表示人体着装后的实际表面积 F_{cl} 和人体裸身表面积 F_D 之比;即:

$$f_{cl} = F_{cl} / F_D = 1.00 + 0.968 R_{cl}$$

$dT = t_r - 22$, $^{\circ}C$; a_c 为对流交换系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

$$a_c \begin{cases} 2.38(T_{cl} - t_a)^{0.25} & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \\ 12.1\sqrt{v} & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v} \end{cases}$$

v 为空气对人的相对流速度, m/s 。

PMV 指标预测的是在同一环境下,绝大多数人的感觉。当 PMV 为 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 时代表的热感觉分别是寒冷,凉,稍凉,热舒适,稍暖,暖,热。

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^4)]$$

在中国,通常认为在舒适热环境下,当 $-1.0 < PMV < 1.0$,且 $PPD < 26\%$ 时,人们比较容易接受。该公式适合于舒适范围内的应用,对于中国炎热地区并不适用^[1]。

1.1.2 热感觉

李仁欣等^[10]通过大量的数据实验分析,得出实用

性比较强的热舒适方程及其预测模型:

$$SD = -25.09644 + 0.70846T_s + 0.01619HR + 2.08799W$$

$$BC = 0.9926 - 0.183SD$$

SD 预测感觉; T_s 平均皮肤温度(胸臂腿三点加权), $^{\circ}C$,所占比例 85%; HR 心率; W 皮肤相对湿度,所占比例 8%; BC 人体舒适度。

1.2 温湿指数

1.2.1 体表温度

在国外,美国气象生物学家 Steaman 提出的相对比较完善的以人体平衡方程为基础的感热温度理论,该理论曾经轰动了整个气象生物界。通过研究表明,在室内条件下,体感温度模型为^[5-6]:

$$T_p = c_1 T_d + c_2 T_w + c_3 T_g + c_4$$

T_p 体表温度, $^{\circ}C$; T_d 干球温度, $^{\circ}C$; T_w 湿球温度, $^{\circ}C$; T_g 全球温度, $^{\circ}C$; c_i 是常数。

1984 年,Robert. G. Steadman^[7]又提出:

$$T_p = -1.3 + 0.92T_{\infty} + 2.2P_{\infty}$$

其中, T_p 体表温度, $^{\circ}C$; T_{∞} 周围环境温度, $^{\circ}C$; P_{∞} 周围水汽压, kPa 。该公式基于正午温度计算可得,其周围环境温度适用性范围为 $-10^{\circ}C \sim 45^{\circ}C$,周围水汽压温度的适用范围为 $0.1 \text{ kPa} \sim 4.2 \text{ kPa}$ 。

在国内,徐大海等^[11]对高桥浩一郎提出的体表温度指标进行了详细的分析,并得出各自的适用范围,讨论了相关预报问题:

$$T_p = T - \frac{Q \cdot d}{K}$$

其中, Q 人体内向皮肤外传递的热量, $KJ/(m^2 \cdot h)$,人体温度为 $T = 37^{\circ}C$,皮肤层厚度为 $d = 5 \text{ mm}$, k 为导热系数约为 $2.0921 \times 10^{-3} \text{ J/(cm}^{-1} \cdot s \cdot ^{\circ}C)$ 。

$$Q = Q_{\text{辐射}} + Q_{\text{传导}} + Q_{\text{蒸发}}$$

$$Q_{\text{辐射}} \approx 20.92(T_p - T_a)$$

$$Q_{\text{传导}} \approx 87.03 \cdot \sqrt{V} \cdot (T_p - T_a)$$

$$Q_{\text{蒸发}} \approx 18.74 \cdot \sqrt{V} \cdot (E_s - r \cdot E_a)$$

其中温度单位都是 $^{\circ}C$; V 为人体高度上的风速, m/s ; E_s 人体皮肤表面的饱和水汽压, hPa ; E_a 为气温所对应的饱和水汽压, hPa ; r 空气中的相对湿度; T_a 为空气温度。

判断室内人体舒适度的大小,可以利用室内人体体表温度 T_p 。室内风速为 0.5 m/s 时,当 $T_p < 29^{\circ}C$ 时,体表温度低于环境温度 $29^{\circ}C$ 时,会感到寒冷,人体可能产生不舒适感觉。但当 $T_p > 35^{\circ}C$ 时,体表温度大于 $35^{\circ}C$,人体又会感觉到炎热,同样会产生不舒适的感觉。

1.2.2 体感温度

在中国,研究体感温度的方法很多^[12],但是一般常

用的是吕伟林^[9,12-15]提出的体感温度计算方法,该方法在多数气象局预报服务工作中得到了广泛的应用。

$$T_g = T + T_r + T_u - T_v$$

T_g 体感温度,℃; T 气温,℃; T_r 辐射作用对体感温度的修正,℃; T_u 湿度对体感温度的修正,℃; T_v 风速对体感温度的修正,℃。该公式具有普遍适用性,但是在特殊条件有偏差(低温大风、高温高湿微风)。

1.2.3 皮肤温度

Petterssen 提出皮肤温度这一概念,并用皮肤温度来估计人体舒适度,公式为^[16]:

$$T_s = T_d + 0.034IM + \frac{0.24M - 15 + 120S(1-A)}{2 + 9\sqrt{0.1 + V}}$$

T_s 皮肤温度,℃; T_d 干球温度,℃; I 衣服厚度,cm(对于薄的衣服为0.5,厚的衣服为1.0 cm); M 新陈代谢速率, W (休息时为100 W,轻微运动时为165 W,走路时为420 W,剧烈运动时为830 W); S 晴天指数(范围从0~1); A 衣服反照率,(范围从0~1); V 风速,m/s。

1.2.4 中性温度

杨柳^[17]等对中国5个典型城市(广州、上海、西安、北京、哈尔滨)分别进行了夏季和冬季的室内外气候状况的分析,以及人们在室内外有关热反应的问卷调查和研究,根据大量的实验数据分析,得出室外月平均温度与中性温度的相关关系:

$$T_c = 1.97 + 0.3 T_o$$

T_c 中性温度(18℃~30℃); T_o 室外月平均温度,℃;

该公式作用是:为对自然通风热舒适区的建立提供了依据。当中性温度确定后,当室内湿度大于70%时,每增加10%,可接受的空气温度下降0.4℃^[18]。

1.2.5 评价温度

在自然通风的条件下,不仅温度对室内人体舒适度产生重要的影响,而且湿度和风速也扮演着不可或缺的角色。成都地区夏季气候最明显的特点是:高温高湿微风。针对这一特点,王宇等^[19]认为:风速和湿度对人体舒适度的影响很大,不可忽略。根据研究结果,他们提出新的概念:补偿温度和评价温度:

$$T_p = t_c + \Delta t = 0.326t_a + 16.826 + \Delta t$$

$$\Delta t = \Delta t_v + \Delta t_h = -2.38 \exp\left(-\frac{v_a}{0.38}\right) + 2.35 + 0.025(H_a - 0.6)(H_a \geq 0.6)$$

T_p 评价温度,℃; t_c 中性温度,℃; Δt 补偿温度,℃; t_a 室外月平均温度,℃; Δt_v 风速补偿温度,℃; Δt_h 相对湿度补偿温度,℃; v_a 风速,m/s; H_a 相对湿度。

$$T_{cu} = T_p + 3; \quad T_{cd} = T_p - 3$$

其中, T_{cu} 为舒适上限, T_{cd} 为舒适下限。

当室内温度 T_a 在舒适温度下限和评价温度之间时,即 $T_{cd} < T_a \leq T_p$,舒适温度为 T_a ;当室内温度在评价温度和舒适温度上限之间时,舒适温度为 $T_p < T_a \leq T_{cu}$ 且 $\Delta t_h \leq \Delta t_v$;当室内温度大于舒适温度上限时,舒适温度为 $T_{cu} < T_a$ 且 $\Delta t_v \geq \Delta t_h + T_d - T_{cu}$ 。

1.2.6 不舒适指数

E. C. Thom 提出不舒适指数为^[11,15-16]:

$$I_d = 0.4(T_d + T_w) + 4.78$$

E. C. Thom 提出的表示无风闷热的程度不舒适指数,在美国有普遍的适用性,常用于预测春秋季节人体舒适度。表达式为:

$$I_d = 0.72(T_d + T_w) + 40.6$$

I_d 不舒适指数; T_d 干球温度,℃; T_w 湿球温度,℃; 在该公式中,当不舒适指数 < 60 时,感到寒冷,表示不舒适;但当不舒适指数 > 75 时,感到闷热,同样表示不舒适。

$$I_d = 0.5(T_d + T_w)$$

在1963年,Sohar等^[11,16]认为,温湿对人体舒适度的影响权重是一样的,所以提出如下不舒适公式:

$$I_d = 0.5(T_d + T_w)$$

I_d 不舒适指数; T_d 干球温度,℃; T_w 湿球温度,℃;

1.2.7 炎热指数

炎热指数表示的是一种热应力的舒适指标。影响炎热指数的因素,不仅与气温有关,还与相对湿度有关。主要用于预测夏季人体舒适度。Thom 提出炎热指数的计算公式^[20]为:

$$I_T = 1.8 \times T_{\max} - 0.55 \times (1.8 \times T_{\max} - 26) \times (1 - R_H) + 32$$

I_T 炎热指数; T_{\max} 日极端最高温度,℃; R_H 日平均相对湿度,%。

Bosen 对 Tom 的提出做出进一步的发展^[21]。

$$I_T = T_d - 0.55(1 - R)(T_d - 58)$$

式中 T_d 为干球温度,℃, R 为相对湿度。

该公式同样适合于中国人体舒适度的预测,实际结果表明:北京气象局利用该公式作为人体舒适度指数的指标,获得很好的服务效果。

1.2.8 热指数

热指数是一种衡量人体耐热的标准,可以作为夏季高温热浪预警的评价指标。该指标在美国、加拿大等国得到了有效的应用。影响热指数的因素同样是气温和湿度。热指数计算公式^[22]:

$$T_{aw} = -2.653 + 0.994T_a + 0.368T_w^2$$

T_{aw} 热指数,也称显温; T_a 干球温度,℃; T_w 露点温度,℃;

1.2.9 有效温度

有效温度^[8,23]是多种温度的一种合成温度,它的

主要影响因素是空气温度和平均辐射温度。因为一般而言,在冬季严寒地区,当温度接近舒适温度时,湿度对人体体感的影响并不明显,可以忽略不计,但是此时空气温度和平均辐射温度对人体热感觉的影响比较明显,有效温度比较适合于严寒地区的应用。王昭俊认为,利用有效温度作为室内热舒适指标,计算简单且更具有统计意义。其表达式为:

$$t_o = (h_r t_r + h_c t_a) / (h_r + h_c)$$

其中, h_r 为辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_r 为平均辐射温度, $^\circ C$; t_a 为空气温度, $^\circ C$ 。

舒适温度范围:夏季: $25.1^\circ C \leq t_o \leq 28.2^\circ C$ (衣服热阻=0.5 clo); 冬季: $21.5^\circ C \leq t_o \leq 26.5^\circ C$ (衣服热阻=1.0 clo)。

表1 室内人体舒适度公式

分类	名称	公式	未知测量值	舒适区和局限性
1.1 热平衡	1.1.1 PMV-PPD 指标	见上文	见上文	舒适区:见上文;炎热寒冷地区不适合
	1.1.2 热感觉	$BC=0.9926-0.18SD$ $T_p=c_1 T_d+c_2 T_w+c_3 T_g+c_4$	T_s 平均皮肤温度(0.85);HR 心率;W 皮肤相对湿度率(0.8) 干球温度,; 湿球温度,; 全球温度	
	1.2.1 体表温度	$T_p=-1.3+0.92T_\infty+2.2P_\infty$ $T_s=T-\frac{Q \cdot d}{K}$	周围环境温度(0.996);周围水汽压(0.03) 周围环境温度	公式基于正午温度计算可得 舒适区:29-35
	1.2.2 体感温度	$T_g=T+T_r+T_u-T_v$	气温、着衣颜色、天空云量、大气湿度、风速	高温高湿微风、低温大风条件下有偏差
1.2.3 皮肤温度	$T_s=T_d+0.034IM+\frac{0.24M-15+120S(1-A)}{2+9\sqrt{0.1+V}}$	干球温度/晴天指数(0~1);衣服反射率	舒适区:31-35	
1.2.4 中性温度	$T_c=1.97+0.3T_o$	干球温度、湿球温度、室外月平均温	T_c 在 18-30	
1.2 温湿风	1.2.5 评价温度	$T_p=t_c+\Delta t=0.326t_a+16.826+\Delta t$ $I_d=0.4(T_d+T_w)+4.78$	干球温度、湿球温度、室外月平均温 干球温度、湿球温度	舒适区:见 1.2.5 舒适区:21.1-23.9
	1.2.6 不舒适指数	$I_d=0.72(T_d+T_w)+40.6$ $I_d=0.5(T_d+T_w)$	干球温度、湿球温度 干球温度、湿球温度	舒适区:60-75 F (春秋)
	1.2.7 炎热指数	$I_T=1.8 \times T_{max}-0.55 \times (1.8 \times T_{max}-26) \times (1-R_H)+32$ $I_T=T_d-0.55(1-R)(T_d-58)$	干球温度、湿球温度 干球温度、湿球温度	适合在低纬度地区和中纬度夏季 舒适区:18.9-25.6(夏)
	1.2.8 热指数	$T_{wv}=-2.653+0.994T_a+0.368T_w^2$ $T_e=T_a-0.4(T_a-10)(1-\frac{R_h}{100})$ $t_o=(h_r t_r+h_c t_a)/(h_r+h_c)$	干球温度、露点温度 干球温度、湿球湿度 平均辐射温度、空气温度	适合在低纬度地区和中纬度夏季 舒适区:12-24
	1.2.9 有效温度	$t_o=0.5t_a+0.5t_r$ $t_o=0.47t_a+0.53t_r$ $t_o=0.56t_a+0.44t_r$	平均辐射温度、空气温度 平均辐射温度、空气温度 平均辐射温度、空气温度	夏季:25.1-28.2; 冬季:21.5-26.5

注:(1) F 为华氏度,舒适区的单位若无特殊说明,均为 $^\circ C$ 。

(2) 1.2.2 体感温度、1.2.3 皮肤温度、1.2.7 炎热指数,以及 1.2.8 热指数等,虽然是根据室外温、湿、风建立的预报模式,但利用室内温、湿、风资料,其预报结果跟室内人体实际热感觉调查的结果有较大的吻合度,所以把其归为室内人体舒适度模型。

无风时,对流产生的热量交换小于辐射产生的热量交换,相比之下,辐射对人体舒适度产生的影响相对

较大。可得:

$$t_o = 0.47t_a + 0.53t_r$$

有风时,对流产生的热量交换等于辐射产生的热量交换,即辐射与表面传热系数相等,多篇文献采用该公式计算有效温度^[8],其表达式:

$$t_o = 0.5t_a + 0.5t_r$$

当风速增大时,对流产生的热量交换大于辐射产生的热量交换,相比之下,对流对人体舒适度产生的影响相对较大。其表达式:

$$t_o = 0.56t_a + 0.44t_r$$

1937年 Missenard 提出,有效温度不仅仅环境温度有关,还与相对湿度有密切的联系,定义为^[11]:

$$t_o = t_a - 0.4(t_a - 10) \left(1 - \frac{R_h}{100}\right)$$

t_o 有效温度,℃; t_a 干球温度,℃; R_h 相对湿度;舒适区间 12℃~24℃。

2 室内人体舒适度的特征值

表1为室内人体舒适度公式的分析表,该分析表对第一部分的内容进行简单的归纳和总结,表中还增加了各个公式的舒适区间和局限性,为不同地区的舒适度研究提供了便利。

3 女性室内人体舒适度的实际感受与预测之间的差异

由于仪器设备等的局限性,文章暂时只从温湿风方面考虑适合成都室内人体舒适度预报的模型。根据研究表明,炎热指数适用于中国南方夏季不太炎热的地区(四川、云南等地)^[21]。炎热指数虽是通过室外温湿风资料建立的人体舒适度模型,但通过多个模型的对比分析,炎热指数仍然适合进行成都室内人体舒适度的预报。科学表明,女性对冷的感知比较强,对成都进行炎热指数的人体舒适度预报是否与女性的实际感受相吻合。

对成都高校11名女性自愿受试者从2014年12月16日到1月23日,进行了为期27天的连续的关于室内人体舒适度的问卷调查,其中数据有效天数为26天。主要是调查受试者的舒适感觉,人感觉投票制采用9级指标表示(+4 极其闷热,极不舒适;+3 闷热,不舒适;+2 偏热,较不舒适;+1 比较凉爽,较舒适;0 非常凉爽,非常舒适;-1 比较凉爽,舒适;-2 偏冷,较不舒适;-3 寒冷,不舒适;-4 极冷,极不舒适)。与此期间,还测量了成都部分高校寝室内的温度和湿度。根据炎

热指数公式,计算出预测舒适度。将预测舒适度和人体实际感受进行相比较。

根据数据统计表明,调查有效天数为26天,女性的实际热感觉与预测完全符合的有5天,实际热感受比预测高一个指标的有13天,占总天数的50%,比预测高两个指标的有8天,占总天数的31%。

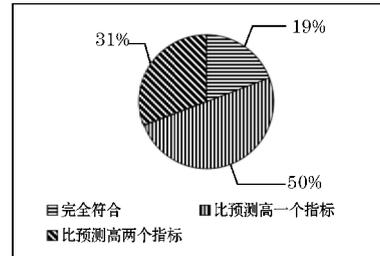


图1 女性实际舒适度与预测指标

4 结论

关于室内人体舒适度感觉的指标的研究中,主要是以温湿指数为基础的研究较多,以人体内外热平衡方面的研究较少。部分室外人体舒适度的预报模式,同样适用于进行室内人体舒适度预报。

由于中国国土广阔,区域气象差异大,房屋建筑在不同的地方差异也特别的大,而且室内人体舒适度研究也较少,所以到目前还没有研究出一个能够广泛适用的室内人体舒适度预报的模式。因此,在室内人体舒适方面的研究还有很大的发展空间。

因为女性对冷的感知比较强,所以室内人体舒适度的预测等级与女性实际感受到的有一定的偏差,即女性的实际热感觉要比预测的指标高1到2个指标。例如,如果预测是-1(比较凉爽,舒适),女性实际感受是-2(偏冷,较不舒适)或-3(寒冷,不舒适)。

参考文献:

- [1] 许景峰. 浅谈 PMV 方程的适用范围[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3): 13-18.
- [2] 陈桂标. 人体舒适度的预报方法[J]. 广东气象, 2000, (4): 29-30.
- [3] 孟文斌, 葛红, 于海燕, 等. 室内辐射标准概述[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(3): 26-29.
- [4] 彭昌海. 南京地区室内自然条件下 PMV-PPD 分析[J]. 华中建筑, 2005, 23(1): 83-84.
- [5] R G Steadman. The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science[J]. Journal

- of Applied Meteorology, 1979, 18:861-873.
- [6] R G Steadman. The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature[J]. Journal of Applied Meteorology, 1979,18: 874-885.
- [7] R G Steadman. A Universal Scale of Apparent Temperature[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23:1674-1687.
- [8] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. 暖通空调, 2004,34(12):39-42.
- [9] 刘梅,于波,姚克敏. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景[J]. 气象科技, 2002,30(1):11-14,18.
- [10] 李仁欣,唐世君. 穿着服装热舒适性的预测模型和应用[J]. 航天医学与医学工程, 1994,7(4): 258-265.
- [11] 徐大海,朱蓉. 人对温度、湿度、风速的感觉与着衣指数的分析研究[J]. 应用气象学报, 2000,11(4): 429-439.
- [12] 杨静. 体感温度的研究及业务化应用[J]. 沙漠与绿洲气象(新疆气象), 2002,25(2):18-19.
- [13] 许东蓓,王小勇,黄玉霞,等. 兰州市人体舒适度预报系统开发研制[J]. 甘肃气象, 2003,21(1):20-23.
- [14] 骆月珍,石蓉蓉,陈海燕. 人体舒适度预报中体感温度的引进、修正及应用[J]. 浙江气象, 2002,23(3):18-21.
- [15] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论[J]. 气象科技, 2003,31(6):370-372.
- [16] Mordecai Segal, Roger A Pielke. Numerical Model Simulation of Human Biometeorological Heat load Conditions—Summer Day Case Study for the Chesapeake Bay Area[J]. Journal of Applied Meteorology, 1981,20:735-749.
- [17] 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.
- [18] 王磊,龚波,余南阳. 自然通风热舒适性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009,41(12):254-258.
- [19] 王宇,易小楠. 成都地区气候条件对人体热舒适影响的研究[J]. 制冷与空调(四川), 2011, 25(1):19-22.
- [20] 陈辉,黄卓,田华,等. 高温中暑气象等级评定方法[J]. 应用气象学报, 2009,20(4):451-457.
- [21] 胡毅,李萍,杨建功,等. 应用气象学[M]. 北京:气象出版社, 2005:194-195.
- [22] L S Kalkstein, K M Valimont. An Evaluation of Summer Discomfort in the United States Using a Relative climatological index[J]. Bulletin American Meteor Society, 1986, 67: 842-848.
- [23] 丁秀娟,胡钦华,李奎山,等. 人体热舒适研究进展[J]. 东莞理工学院学报, 2007,14(1):43-47.
- [24] 朱学玲,任健. 人体舒适度的分析与预报[J]. 气象与环境科学, 2011,34(Z1):131-134.
- [25] 张清. 从人体舒适度看高温及其影响[J]. 甘肃气象, 1998,16(2):38-39.