

文章编号: 1000-2022(2001) 04-0527-09

# 以热量平衡为基础的体感温度模型及气候要素的效应分析

刘梅<sup>1</sup>, 于波<sup>2</sup>, 姚克敏<sup>1</sup>

(1. 南京气象学院环境科学系, 南京 210044; 2. 江苏省气象台, 南京 210008)

**摘要:**通过对夏季人体热量平衡方程的建立与计算, 结合我国不同年龄段人群的新陈代谢特点, 分别建立了不同的体感温度模型。经与我国目前应用较为广泛的人体舒适度统计模型的计算结果相比较, 证明以热量平衡为基础的人体体感温度模型更具有普遍性。还分析了风、湿度、辐射对体感温度的影响效应。这些结果将为拓宽舒适度服务范围, 建立以人体舒适度为核心的城市气象服务体系提供理论依据。

**关键词:**体感温度模型, 热量平衡, 人体舒适度, 气候要素, 有效性分析

**中图分类号:** P463.3      **文献标识码:** A

人体舒适度是根据人类机体与气象环境之间的热交换原理, 评价不同气象环境下人体舒适感的生物气象指标。自从 1966 年特吉望(Terjung)提出人体舒适度指数以来, 发达国家相继开展了广泛深入的研究并提出了不同的生物气象指标。如风效指数(Wind Effect Index)、不适指数(DI)、湿温指数等<sup>[1]</sup>, 这些研究都已认识到湿度和风是影响人体热感觉的重要因素。随着研究的逐步深入, 越来越多的研究转向从人体热量平衡角度来描述人体对气候条件的综合反应, 其中丹麦学者范格尔(Fanger)提出的热舒适理论(Thermal comfort)以及热舒适方程对该领域的研究具有重要贡献<sup>[1]</sup>。美国生物气象学家 Steadman 从人体热量平衡角度提出了感热温度理论<sup>[2~5]</sup>, 在生物气象学界引起巨大反响。我国关于人体舒适度的研究始于 80 年代。初期的研究只是一些定性的描述和讨论, 90 年代以后才有一些理论研究进展。王远飞等<sup>[6]</sup>根据实验数据提出了人体舒适的风温曲线和风湿曲线。吕伟林<sup>[7]</sup>通过试验提出了体感温度统计模型, 该模型综合考虑了各种气象要素对体感温度的综合影响。国内目前应用较为广泛的人体舒适度模型主要有北京和上海两家, 它们都是在统计基础上建立的。为了深入开展城市环境气象服务, 提高服务的质量, 建立具有普遍意义的人体舒适度理论模型已显得十分迫切。

本文通过对夏季人体热量平衡方程的建立与计算, 结合我国不同年龄段人群的新陈代谢特点, 导出了不同人群的体感温度模型。经与我国北京上海两市人体舒适度统计模型的计算结果相比较, 证明以热量平衡为基础的人体体感温度模型具有普遍的适用性。通过计算, 本文还分析了风、湿度、辐射等环境条件对体感温度的影响效应。这些结果将为进一步改善人体舒适度服务的效果, 拓宽人体舒适度预报服务范围, 建立以人体舒适度为核心的城市环境服务体系

收稿日期: 2001-06-11; 改回日期: 2001-07-25

第一作者简介: 刘梅, 女, 1973 年 6 月生, 硕士研究生, 助理工程师。

提供思路 and 理论依据。

# 1 体感温度模型的建立

## 1.1 建立体感温度模型的理论基础

美国生物气象学家 Steadman 认为人体体感温度应以人体内产生的热量与人体散失的热量平衡为研究依据。对于一个以  $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  步行的人来说, 获得热量的主要方式, 一是体内新陈代谢产生的热量( $Q$ ), 二是通过皮肤和衣服吸收的太阳辐射( $Q_g$ )。人体的失热应由 3 部分组成, 即肺呼吸作用失热( $Q_v$ )、衣着失热( $Q_f$ ) 和人体裸露部分失热( $Q_u$ ), 若以  $\Phi$  表示人体衣着覆盖率, 则有人体热量平衡方程<sup>[2]</sup>

$$Q_g + Q = Q_v + (1 - \Phi) Q_u + \Phi Q_f. \quad (1)$$

在炎热天气状况下( $T > 25$  时), 衣服的覆盖率可认为是零, 其热量平衡方程应为

$$Q_g + Q = Q_v + Q_u. \quad (2)$$

为方便讨论, 在进行体感温度理论计算时假设  $Q_g = 0$ , 此时方程为

$$Q = Q_v + Q_u. \quad (3)$$

其中,  $Q_v$  因为在炎热状况下从肺中呼出的气体几乎和人体表面的温度及水汽压相同, 此时肺散失热量仅是海平面状况下散失热量的 2% ~ 12%, 根据 McCutchan 等<sup>[8]</sup> 给出的肺散失热量表达式可知

$$Q_v = 0.143 - 0.00112T_a - 0.0168e_a. \quad (4)$$

式中,  $T_a$  为气温( ),  $e_a$  为周围空气中的水汽压(kPa)。  $Q_u$  可通过物理学中的欧姆定律求得

$$Q_u = \frac{T_b - T_a}{R_s + R_a} + \frac{e_b - e_a}{Z_s + Z_a} \times \frac{R_a}{R_s + R_a} - Q_g \frac{R_a}{R_s + R_a}. \quad (5)$$

其中,  $R_s$  为皮肤的显热传输阻力,  $Z_s$  为潜热传输阻力,  $R_a$  为空气的显热传输阻力,  $Z_a$  为空气的潜热传输阻力,  $T_b$  为体温( ),  $T_a$  为气温( ),  $e_b$  为体内水汽压(kPa),  $e_a$  为周围空气中的水汽压(kPa)。

$Q$  应是一个随年龄、性别、活动剧烈程度而变化的量。根据我国人种、年龄、性别的特点, 结合医学上人体基础代谢率, 本文把  $Q$  分为 3 个级别(表 1)<sup>[1,2]</sup>。

表 1 不同年龄段人群的  $Q$  值

Table 1 The  $Q$  values for people in different ages

年龄段/岁	男女平均基础代谢率/ $\text{J} \cdot \text{h}^{-1}$	活动状况/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
0 ~ 16	50	1.4	233.0
16 ~ 50	39	1.4	183.0
> 50	34	1.4	158.7

由上, 在炎热条件下( $T > 25$  时) 的人体热量平衡方程可表达为

$$Q = Q_v + \frac{T_b - T_a}{R_s + R_a} + \frac{e_b - e_a}{Z_s + Z_a} \times \frac{R_a}{R_s + R_a} - Q_g \frac{R_a}{R_s + R_a}. \quad (6)$$

在上式成立的前提下, 方程中的  $T_a$  即为人体体感温度。

## 1.2 基本变量

方程(6) 表明, 在炎热状况下体感温度的计算主要取决于  $R_s$ 、 $T_b$  和  $e_b$  3 个变量, 因人体内部与外界环境的热量传输是一个逐步逼近的过程, 因此以上 3 个变量需利用迭代方法计算。

(6) 式中其他各要素目前已有一些经验公式可以借鉴。下面逐个介绍各个变量的意义和计算方法。

(1) 空气显热传热阻力( $R_a$ )<sup>[2]</sup>  $R_a$  可用(7)式求得

$$R_a = 1/(h_c + h_r)。 \quad (7)$$

式中, $R_a$  单位为  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ;  $h_c, h_r$  分别为对流热交换系数和辐射热交换系数,其表达式分别为<sup>[2,3]</sup>

$$h_c = \begin{cases} 7.6 + 1.85V_{10}, & \text{整体;} \\ 7.0 + 1.76V_{10}, & \text{衣着覆盖部分;} \\ 11.0 + 2.60V_{10}, & \text{裸露部分。} \end{cases} \quad (8)$$

$$h_r = \begin{cases} 4.10 + 0.028T_a, & \text{整体;} \\ 3.35 + 0.049T_a, & \text{衣着覆盖部分;} \\ 4.18 + 0.036T_a, & \text{裸露部分。} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $h_c, h_r$  单位均为  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,  $V_{10}$  为风速( $m \cdot s^{-1}$ ),  $T_a$  为温度( )。

(2) 空气的潜热传输阻力( $Z_a$ )( $m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$ )<sup>[2]</sup>  $Z_a$  可利用边界层的湿度传输理论求得,其值大小主要取决于湿度或风速的大小,有

$$Z_a = 0.0606/h_c。 \quad (10)$$

(3) 皮肤的潜热传输阻力( $Z_s$ )  $Z_s$  值在炎热状态下的变化主要取决于湿度。本文假设  $Z_s = 0.0446 m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$ 。

(4) 体内温度( $T_b$ ) 炎热的夏季因人体排汗,体内温度经常是高于体表温度。当体表温度较低时,体内温度也可能很高,人体感觉并不舒适,因此体表温度不能作为衡量舒适程度的指标。鉴于此,本文通过体内温度的逐步逼近求解,并结合人体热量平衡方程,确定有效描述人体舒适程度的体感温度,在整个体感温度的求解过程中  $T_b$  的确定起到关键作用。具体计算方法见 1.3 节。

(5) 体内水汽压( $e_b$ ) 体内水汽压大小主要取决于外界相对湿度,在饱和水汽压下,  $T = 37$  时体内水汽压为 5.65 kPa。因此,在一般情况下取  $e_b = 5.65$  kPa。而在炎热的夏季,由于皮肤传输阻力作用,体内水汽压一般要大于 5.65 kPa,其具体计算方法也将在 1.3 中介绍。

(6) 净辐射( $Q_g$ )( $W \cdot m^{-2}$ )  $Q_g$  为人体单位面积的净辐射,可利用各站的直接辐射和散射辐射进行计算。根据太阳辐射的传输,人体吸收的能量主要有直接吸收的太阳辐射  $Q_1(W \cdot m^{-2})$ ,吸收的散射辐射  $Q_2(W \cdot m^{-2})$ ,吸收来自地表辐射  $Q_3(W \cdot m^{-2})$ ,支出的能量为天空的散射辐射  $Q_4(W \cdot m^{-2})$ 。在整个辐射传输过程中,  $Q_g = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4$ ,其中  $Q_1 = \alpha \Phi_1 \Phi_3 Q_d$ <sup>[3]</sup>。 $\Phi_1$  为人体有效辐射面积占总体表面积的比例,对于整个人体来说其值取 0.8,裸露部分取 0.85,衣着覆盖部分取 0.79。 $Q_d(W \cdot m^{-2})$  为单位面积上的太阳直接辐射,  $\Phi_3$  人体垂直投影面积换算系数,可利用以下公式计算<sup>[3]</sup>

$$\Phi_3 = 0.386 - 0.0032A。 \quad (11)$$

式中, $A$  为太阳高度角。

$$\sin A = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos(15H)。 \quad (12)$$

式中, $H$  为正午时的太阳时角(  $\gamma$ ,  $\lambda$  为纬度(  $\gamma$ ,  $\delta$  为太阳赤纬(  $\gamma$ ,  $\alpha$  为吸收系数。

$$Q_2 = 0.40\alpha\Phi_1 Q_i。 \quad (13)$$

其中,  $\alpha = 0.66$ ,  $Q_i$  为天空散射辐射( $W \cdot m^{-2}$ )<sup>[3]</sup>。

$$Q_3 = 0.1 \times 0.5\alpha\Phi Q_h. \quad (14)$$

其中,  $Q_h = 1.44(Q_d + Q_i)^{[3]}$ 。 $Q_4$  是云量、温度、海拔高度、水汽压的函数, 其表达式为<sup>[3]</sup>

$$Q_4 = (1 - \Phi^2/2)(T_a + 103) \{1 - \exp(-0.11E) + \exp(-0.11E - 1.1)\} \exp(-0.1e_a). \quad (15)$$

其中,  $\Phi$  是天空云量, 把整个天空看作 1, 则  $\Phi$  为 0~1 的小数,  $E$  为海拔高度(km),  $e_a$ ,  $T_a$  分别为环境水汽压(kPa)和温度( )。

### 1.3 体感温度的计算

当  $T > 25$  时, 人体可视为无衣着覆盖, 其温度和水汽的传输情况可用图 1 表示。

根据图 1, 在热量达到平衡的过程中, 体表温度  $T_s$  和体表水汽压  $e_s$  的传输方程可表示为

$$\begin{cases} T_s = T_b - Q_u R_s, \\ e_s = e_b - (e_b - e) Z_s / (Z_s + Z_a). \end{cases} \quad (16)$$

假设  $T_s$ ,  $e_s$  的初值分别为<sup>[2]</sup>

$$T_s = (37 + T_a) / 2; \quad e_s = (5.65 + e_a) / 2.$$

代入(16)式, 经多次迭代, 当相邻两次  $T_b$ ,  $e_b$  的计算差值接近 0 时, 即为  $T_b$ ,  $e_b$  的确定值。

Steadman 经过大量计算提出了  $T_b$ ,  $e_b$  的统计模型为

$$T_b = 33.5 + 1/(7R_s), \quad (17)$$

$$e_b = 4.4 + 1/(20R_s). \quad (18)$$

(17)(18)两个统计式为  $T_b$ ,  $e_b$  的确定大大减少了工作量。把(17), (18)式代入无辐射时的热量平衡方程(3)即可确定  $R_s$ ,

$$R_s = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (19)$$

其中,  $2a = 14(Q - Q_v)(Z_s + Z_a)$ ,  $b = 7(Q - Q_v)R_a(Z_s + Z_a) - 7(33.5 - T_a)(Z_s + Z_a) - 7R_a(4.4 - e_a)$ ,  $c = -(Z_s + Z_a + 0.35R_a)$ 。

再次把  $R_s$  代入热量平衡方程, 求得  $e_a = 1.6$  kPa 时的  $T_a$ 。此时的  $T_a$  即为达到热量平衡条件下的体感温度(AT)。其表达式为

$$AT = T_a = T_b - (Q - Q_v)(R_s + R_a) + R_a \frac{e_b - e_a}{Z_s + Z_a} + Q_g R_a. \quad (20)$$

据以上分析认为, 人体体感温度可定义为在人体热量平衡条件下, 人体对实时综合环境以热感觉温度表示的生物气象指标。

从方程(20)中可知体感温度的变化主观上主要取决于  $Q$  值的大小,  $Q$  的不同决定了体感温度模型的不同。根据以上理论计算分析, 可分别求得炎热夏季室内、室外有遮蔽、室外无遮蔽情况下幼年、成年、老年的体感温度模型:

$$\text{室内幼年: } AT_{\text{room-y}} = -1.636 + 0.910T + 0.949e, \quad R^2 = 0.99;$$

$$\text{室内成年: } AT_{\text{room-c}} = -1.475 + 0.914T + 0.956e, \quad R^2 = 1.00;$$

$$\text{室内老年: } AT_{\text{room-l}} = -1.428 + 0.918T + 0.960e, \quad R^2 = 0.99;$$

$$\text{室外有遮蔽幼年: } AT_{\text{shade-y}} = -0.963 + 0.885T + 1.111e - 0.298V_{10}, \quad R^2 = 0.9984;$$

$$\text{室外有遮蔽成年: } AT_{\text{shade-c}} = -0.848 + 0.890T + 1.117e - 0.256V_{10}, \quad R^2 = 0.9950;$$

$$\text{室外有遮蔽老年: } AT_{\text{shade-l}} = -0.834 + 0.894T + 1.121e - 0.236V_{10}, \quad R^2 = 0.9935;$$

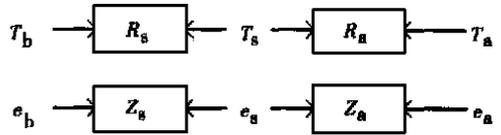


图 1 人体温度和水汽的传输途径

Fig. 1 Transferring way of temperature and vapor for body

$$\text{室外无遮蔽幼年: } AT_{\text{out-y}} = 0.590 + 0.962T + 0.190e + 0.060Q_g - 0.149V_{10}, \\ R^2 = 0.9800;$$

$$\text{室外无遮蔽成年: } AT_{\text{out-c}} = -0.467 + 0.963T + 0.190e + 0.060Q_g - 0.130V_{10}, \\ R^2 = 0.9836;$$

$$\text{室外无遮蔽老年: } AT_{\text{out-l}} = -0.420 + 0.964T + 0.191e + 0.059Q_g - 0.120V_{10}, \\ R^2 = 0.9853.$$

式中,  $T, e, Q_g, V_{10}$ 均为温度( ), 水汽压(kPa), 人体吸收的净辐射( $W \cdot m^{-2}$ ), 10 m 高处的风速( $m \cdot s^{-1}$ )。对以上回归方程进行  $t$  检验和  $F$  检验, 检验结果显示: 所有回归方程都达到0.01 的显著水平。利用这些模型结合当地的气候观测资料, 就可计算不同地区不同年龄阶段的体感温度, 从而可以客观评价不同地区之间的舒适度情况。

## 2 体感温度模型的适应性分析

体感温度模型是在人体热量平衡的原理基础上结合我国人种特点建立的, 应不受任何地区的限制, 因而应能广泛适用于全国各地。为了验证体感温度模型的普遍性, 本文用北京、上海人体舒适度模型和本文的体感温度模型分别计算新疆乌鲁木齐市 6, 7, 8 月的人体舒适度并进行比较; 同时利用体感温度模型计算北京、上海的体感温度并和地方模型的计算结果相比较, 以验证体感温度模型的普遍适应性。

### 2.1 3 种舒适度模型在乌鲁木齐市的适应性分析

北京和上海的舒适度模型为<sup>[9]</sup>: 1) 北京模型:  $DI = F - 0.55(1 - U)(F - 58)$ 。式中,  $DI$  为人体舒适指数,  $F$  为华氏温度,  $U$  为空气相对湿度, 取百分数值。2) 上海夏季的舒适度指数模型:  $SSDI = 1.8T - 0.145RH(1.8T - 26) + \alpha(T - 33) \overline{V} + 0.134S + 27$ 。式中,  $T$ 、 $RH$ 、 $V$ 、 $S$  分别为温度、湿度、风速、日照时数。  $\alpha$  是夏半年风向订正系数,

$$\alpha = \begin{cases} -0.14, & \text{SSE-E-NE;} \\ -0.07, & \text{WNW-N-NE;} \\ 0.07, & \text{W-SW-S.} \end{cases}$$

表 2 和图 2 是用北京、上海和本文的体感温度模型分别计算的新疆乌鲁木齐市 6, 7, 8 月的人体舒适度结果。

表 2 利用 3 模型计算乌鲁木齐夏季舒适度结果

Table 2 The results of summer comfort for Wulumuqi using three models

	6月上旬	6月中旬	6月下旬	7月上旬	7月中旬	7月下旬	8月上旬	8月中旬	8月下旬
北京模型	192.7	253.9	246.4	232.0	267.1	194.3	265.8	310.0	262.6
上海模型	42.3	32.1	32.6	36.9	29.4	42.8	33.4	30.3	45.3
体感温度模型	23.8	25.2	25.2	25.7	26.0	21.9	29.4	31.5	31.6

根据表 2 和图 2 的计算结果, 北京模型计算出乌鲁木齐 6, 7, 8 三个月的旬平均舒适度指数变化范围为 192 ~ 309, 其级别应属于极其闷热的天气。而用上海夏季的舒适度指数模型计算的舒适度指数为 29 ~ 45, 属于冷且大部分人感觉不舒适或少部分人感觉不舒适的天气。两种方法得出的结论差异很大, 和当地的实际情况也均不符合, 表明北京和上海根据地方情况制定的统计模型并不适用于乌鲁木齐。而用本文室外无遮蔽模型计算乌鲁木齐 6, 7, 8 月的  $AT$

值在 21~31 之间,这比较符合人体的真实感受。从  $AT$ 、 $e$ 、 $V$ 、 $Q_g$  的变化图中可以看出(图 3),在乌鲁木齐  $AT$  的变化主要受到温度和辐射的影响,风速和湿度并不是影响  $AT$  的主要因素,这一点和乌鲁木齐的气候特点也是符合的。

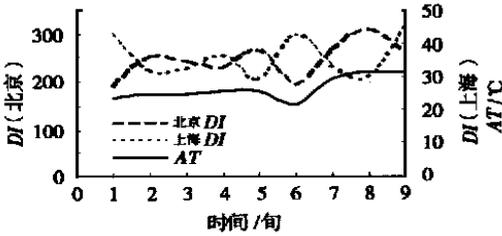


图 2 北京、上海和体感温度模型计算新疆乌鲁木齐市 6~8 月的人体舒适度

Fig. 2 The results of comfort in Jun. ~ Aug. for Wulumuqi using Beijing, Shanghai and apparent temperature model

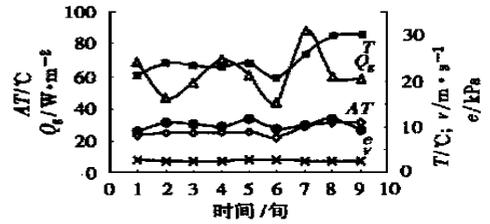


图 3 6~8 月  $AT$ 、 $T$ 、 $e$ 、 $v$  和  $Q_g$  的旬变化趋势

Fig. 3 The variation curves of  $AT$ 、 $T$ 、 $e$ 、 $v$  and  $Q_g$  for each decade in Jun. ~ Aug.

### 2.2 体感温度模型在北京上海的适应性

图 4 和图 5 是用体感温度模型和上海、北京的气象资料计算的两地夏季多年旬平均的体感温度。结果表明,两地夏季的体感温度多年旬平均变化趋势和本地模型计算的结果相吻合。从计算数值大小可看出,在 6~8 月上海的体感温度一般在 25~35,北京一般在 25~30 范围内,和两地的气候基本一致。同时,上海因夏季温度和湿度均比较高,辐射强;而北京夏季温度和南京较接近,但湿度较低,辐射弱,结果上海夏季的体感温度大于北京的体感温度。北京的舒适度稍好于上海,这也和人体的实际感觉相符。

据以上分析,可以认为体感温度模型应可广泛适应于全国各地,由此将便于在全国范围内开展舒适度的比较和应用,克服了舒适度模型的区域性限制。

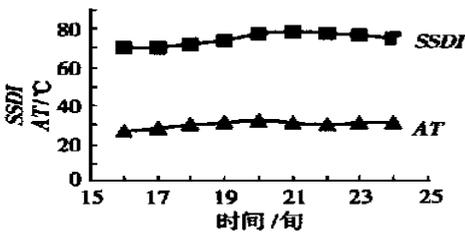


图 4 夏季上海体感温度和舒适度指数的逐旬变化趋势

Fig. 4 Apparent temperature and comfort index curves in Shanghai for each decade in Jun. ~ Aug.

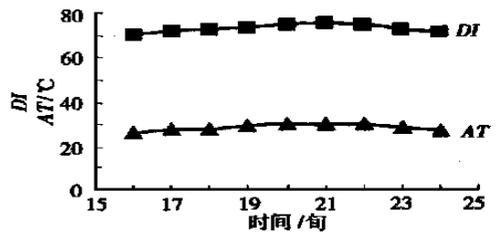


图 5 夏季北京体感温度和舒适度指数的逐旬变化趋势

Fig. 5 Apparent temperature and comfort index curves in Beijing for each decade in Jun. ~ Aug.

### 3 湿度、风速、辐射对体感温度的影响分析

从人体热量平衡方程到体感温度的整个推导过程可知,湿度、风速、辐射是影响体感温度的主要因素。了解 3 要素对体感温度的影响机制,将更有利于进行不同地区特殊气候条件下的

舒适度预报,提高舒适度预报的准确性和可靠性。同时,根据3要素的作用,还可以进行预防工作,提高人体舒适度,减少不必要的伤害和损失。

### 3.1 湿度的有效性分析

炎热的夏季人体对湿度的反应比较敏感,根据人体热量平衡方程可知,湿度不仅影响着人体和空气的潜热传输阻力,同时也影响着热量平衡过程中汗液的蒸发和呼吸的失热量,因此湿度对夏季的舒适情况起着不可忽视的作用。本文通过热量平衡方程的求解,计算了26~40范围内不同水汽压下的体感温度(表3)。由表3可知,在同一温度下,水汽压增加,体感温度增大,并且随温度的升高,体感温度也逐步升高。这主要是因为炎热的夏季,外界水汽的增加使体表水汽压升高,阻止了汗液的蒸发,体内热量不能有效散失,使人感觉更加闷热。

表3 不同温度不同水汽压下的体感温度值

Table 3 The apparent temperature values for different temperatures and vapor pressures

温度/ °C	水汽压/kPa													
	0.67	0.71	0.81	0.94	1.07	1.23	1.4	1.6	1.82	2.06	2.34	2.64	2.98	3.98
26	22.84	22.88	22.98	23.11	23.24	23.40	23.57	23.77	24.00	24.24	24.52	24.81	25.15	26.14
28	24.73	24.77	24.87	25.00	25.13	25.29	25.46	25.65	25.87	26.11	26.38	26.68	27.01	27.99
30	26.61	26.65	26.74	26.87	27.00	27.15	27.32	27.51	27.73	27.96	28.23	28.52	28.85	29.82
32	28.46	28.50	28.60	28.72	28.85	29.00	29.16	29.36	29.57	29.80	30.06	30.35	30.68	31.63
34	30.30	30.34	30.43	30.55	30.68	30.83	30.99	31.18	31.39	31.62	31.88	32.17	32.49	33.43
36	32.12	32.16	32.25	32.37	32.50	32.65	32.81	32.99	33.20	33.43	33.69	33.97	34.29	35.22
38	33.93	33.97	34.06	34.18	34.30	34.45	34.61	34.80	35.00	35.23	35.49	35.77	36.08	37.01
40	35.74	35.77	35.86	35.99	36.11	36.25	36.41	36.60	36.80	37.02	37.28	37.56	37.87	38.79

### 3.2 风速的有效性分析

一般来说风速具有降温作用,首先,风速的变化影响空气的潜热传输阻力和显热传输阻力。由 $R_a$ 、 $Z_a$ 的表达式可知,当风速增大时, $R_a$ 、 $Z_a$ 均变小,从而加速了人体热量向外界的传输。再者,风速影响了体表汗液的蒸发,当风速增大时,由汗液蒸发而散失的热量将增加,因此风一般具有降温作用。表4的计算结果表明,当 $e_a = 1.6$  kPa时,风速每增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,体感温度的减少量约为0.3左右。另外,风速对体感温度的作用还受到湿度的影响,两者的变化关系如图6所示。当湿度增加时风速的降温作用减弱,当 $V = 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,水汽压增加1 kPa,其风速降温量将减少约0.12。

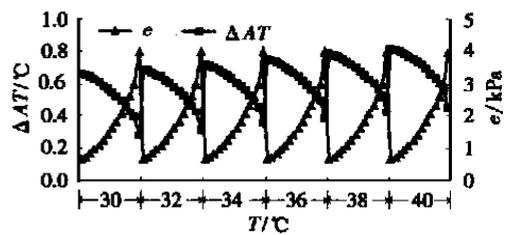


图6 不同水汽压下 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速对 $\Delta AT$ 的影响

Fig. 6 The effect of different vapor pressure on apparent temperature under  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wind speed

### 3.3 辐射的有效性分析

辐射是人体从外界获得能量的唯一来源。人体一昼夜获得的辐射有来自天空的直接辐射、散射辐射和地表辐射。支出部分主要是发向天空的散射辐射。实际上对人体真正起作用的是一天的净辐射( $Q_g$ ),当 $Q_g < 0$ 时辐射具有降温作

表 4 室外不同风速下体感温度的减少量

Table 4 Apparent temperature reduction for different wind speed outside

温度/ °C	风速/ $m \cdot s^{-1}$													
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
26	-0.32	-0.07	0.15	0.33	0.49	0.63	0.76	0.87	0.96	1.05	1.13	1.20	1.26	1.32
28	-0.34	-0.07	0.15	0.35	0.52	0.67	0.80	0.92	1.02	1.11	1.19	1.27	1.33	1.40
30	-0.36	-0.08	0.16	0.37	0.55	0.71	0.85	0.97	1.08	1.18	1.26	1.34	1.41	1.48
32	-0.38	-0.08	0.17	0.39	0.58	0.75	0.90	1.03	1.14	1.25	1.34	1.43	1.50	1.57
34	-0.40	-0.09	0.18	0.41	0.62	0.79	0.95	1.09	1.21	1.32	1.42	1.51	1.59	1.67
36	-0.42	-0.09	0.19	0.44	0.65	0.84	1.00	1.15	1.28	1.40	1.51	1.60	1.69	1.77
38	-0.44	-0.10	0.20	0.46	0.68	0.88	1.06	1.21	1.35	1.48	1.59	1.69	1.78	1.87
40	-0.46	-0.10	0.21	0.48	0.72	0.93	1.11	1.28	1.42	1.56	1.68	1.78	1.88	1.97

用, 降温量为  $Q_g \times R_a$ ; 当  $Q_g > 0$  时辐射具有增温作用, 增温量为  $Q_g \times R_a$ 。本文通过理论计算已得出当  $e = 1.6 \text{ kPa}$  时,  $Q_g$  每增加  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  其体感温度增加  $2.6$  左右, 体感温度的大小随辐射强度的增加而增加, 并且具有极好的正相关关系, 其变化曲线如图 7。另外, 根据辐射一定, 水汽压变化情况下计算的辐射增温数值, 可以推得湿度的增加将削弱辐射对体感温度的影响, 其影响状况如图 8 所示。在同一温度下, 当水汽压从  $0.67 \text{ kPa}$  增加到  $3.98 \text{ kPa}$  时,  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  的辐射强度对体感温度的增加量将从  $8.8$  降低到  $5.5$  左右。这主要是因为当湿度增加时, 空气和体表的比热增大, 吸收相同热量时, 温度变化就较小, 从而出现图 8 所示状况。但这并不说明炎热夏季湿度增加会使人的舒适度提高, 只是从一个侧面说明了它对辐射增温的影响。而就总体而言, 湿度仍将使人感觉更加闷热。

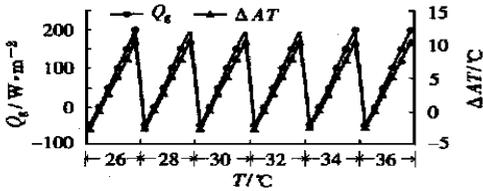
图 7  $e = 1.61 \text{ kPa}$  时辐射对体感温度的影响

Fig. 7 The effect of radiation on apparent temperature under  $e = 1.6 \text{ kPa}$

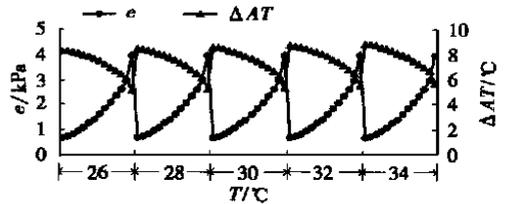
图 8  $Q_g = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时  $\Delta T$  增量随水汽压的变化曲线

Fig. 8 The variation of apparent temperature increment with the vapor pressure under  $Q_g = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

## 4 结论及讨论

(1) 本文较系统的介绍了炎热夏季体感温度模型建立的理论基础, 并经过理论推导求得炎热夏季体感温度的理论计算公式。

(2) 根据我国不同年龄阶段人群基础代谢率, 分别建立了不同的夏季体感温度模型, 用来有效分析同一环境下, 不同人群的舒适情况。

(3) 根据热量平衡的理论计算结果, 分析了湿度, 风, 辐射对体感温度的影响及原因, 为有

效的利用体感温度提供了理论依据。

(4) 通过和其他模型的比较和分析, 证明了体感温度模型的广泛适应性。

(5) 本文是在一定的假设条件下讨论的, 其结果和实际情况可能还存在一定的差距, 特别是人体皮肤潜热阻力的确定, 本文假设为定值, 这一点可能影响体感温度的理论计算结果。

(6) 在确定皮肤显热传输阻力时, 本文没有考虑太阳辐射的影响, 同时利用了  $T_{b, eb}$  的统计模型, 这必然带来系统误差。更加精确的确定体感温度还有待于进一步深入细致的研究。

## 参考文献:

- [1] 夏廉博. 人类生物气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1986. 82 ~ 165
- [2] Steadman R G. Assessment of sultriness, Pt. 1, a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(7): 861 ~ 873
- [3] Steadman R G. Assessment of sultriness, Pt. 2, Effect of wind, extra radiation, and barometric pressure on apparent temperature[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18(7): 874 ~ 885
- [4] Steadman R G. Universal scale of apparent temperature[J]. *Journal of Climate Applied Meteorology*, 1984, 23(12): 1674 ~ 1687
- [5] Steadman R G. Norms of apparent temperature in Australia[J]. *Australia Meteorological Magazine*, 1994, 43(1): 1 ~ 16
- [6] 王远飞, 沈 愈. 上海市夏季温湿效应与人体舒适度[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1998, (3): 60 ~ 66
- [7] 吕伟林. 体感温度及其计算方法[J]. *北京气象*, 1997, (4): 23 ~ 25
- [8] Mc Cutchan J W, Tatlor C L. Respiratory heat exchange with varying temperatures and humidity of inspired air[J]. *J Appl Physiol*, 1951, 4: 121 ~ 135
- [9] 高绍凤, 陈万隆, 朱超群 M]. *应用气候学*. 北京: 气象出版社, 2001. 73

# THE APPARENT TEMPERATURE MODEL BASED ON THERMAL EQUILIBRIUM AND EFFECT OF CLIMATIC ELEMENTS

Liu Mei<sup>1</sup>, Yu Bo<sup>2</sup>, Yao Kemin<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044;

2. Meteorological Observatory of Jiangsu, Nanjing 210008)

**Abstract:** The apparent temperature model is built based on the thermal equilibrium equation, combining with the character of metabolism in different aged people. Through comparing with the comfort model used widely currently, the apparent temperature model on the basis of thermal equilibrium is proved to be more universal. At the same time effects of wind, humidity and radiation on apparent temperature are analyzed. These results will provide theoretical basis for developing comfort service and setting up system of city environment service.

**Key words:** apparent temperature model, thermal equilibrium, comfort of body, climatic elements, analysis of effectiveness