

文章编号: 1000-2022(2001) 03-0384-07

人体热量平衡模型及其在人体舒适度预报中的应用

谈建国, 邵德民, 马雷鸣, 顾建锋

(上海市气象科学研究所, 上海 200030)

摘要: 人对外界冷热的调节和舒适感, 不能根据气温或其他单一的气象要素来评价。要真正全面表述环境对人体的影响必须运用人体热量平衡模型, 人体热量平衡模型全面考虑了所有相关的气象要素、行为参数(活动和服装)和人体参数。运用上海有限域数值天气预报和热量平衡模型计算了体感温度, 以衡量人体在环境中的热舒适状况。

关键词: 热量平衡模型, 舒适度, 体感温度

中图分类号: P463.3 **文献标识码:** A

几十年来, 人类生物气象学的主要目标之一就是评价热环境对人体舒适状况的影响。在初始阶段, 评价人体舒适状况一般都运用经验公式, 其中最典型也是使用最普遍的是 Yaglou 提出的实感温度 ET (Effective Temperature)^[1-3]。然而经验公式的缺点在于没有考虑所有相关的气象参数、活动、衣着以及个人参数如身高、体重、年龄、性别等, 而克服以上缺陷的途径就是估算人体热量平衡。最早提出利用模型计算人体热量平衡的是 Buttner (1935), 当时已经具备了量化人体与环境间热量流的物理基础, 但因热量平衡模型的计算非常复杂, 所以缺少计算机成为该模型应用的最大障碍。60 年代末期, 随着计算机的应用, 丹麦学者 Fanger 提出的热舒适方程, 开创了热量平衡模型在人类生物气象学应用的先河, 随后有大量学者应用了人体热量平衡模型^[3-6]。由于计算能力不再是限制因子, 而且有可能考虑更加复杂的热生理反馈过程^[7-11], 因此, 相对于经验指数, 热量平衡模型具有更重要的意义, 它已经被广泛应用在人体舒适度、室内气候适宜性评价、环境温度控制、城市规划等许多方面。近年来, 我国各地人体舒适度研究和预报也在逐步兴起, 但仍多为经验公式^[12]。本文旨在介绍热量平衡模型及其在人体舒适度预报中的应用。

1 人体与环境的热物理和热生理过程

在自然界, 任何物体之间总是相互不断地进行着能量的传递和交换。人作为有机生命体, 与其他物体或周围环境的能量交换比较复杂。人摄入食物经氧化转化为能量, 一部分用于人体各器官的运动和对外作功, 另一部分转化为维持一定体温所需的热量, 如果有多余的热量还要

收稿日期: 2000-02-19; 改回日期: 2001-04-16

基金项目: WMO/WHO 示范项目“上海热浪监测/预警系统”

第一作者简介: 谈建国, 男, 1969年5月生, 硕士, 助理研究员。

释放到周围环境。以下简要介绍人体与环境的热物理和热生理过程。

1.1 人体代谢产热

人体新陈代谢率是热平衡方程式中的主要得热项, 这些能量一方面被用于维持人体各器官的生理活动以及补偿各种情况下所造成的热量损失, 使体温维持恒定, 另一方面被用于完成各种工作。在人体热量平衡模型中仅考虑体内净得热^[1]

$$H = M - W = M \times (1 - \eta)。 \quad (1)$$

式中, H 为体内净得热; M 为代谢率(依不同的活动量而发生变化); W 为人体所作的机械功; η 为机械效能系数(0% ~ 20%)。

1.2 对流热交换

人体表面(皮肤或衣服)与周围环境空气之间存在对流热交换, 当人体表面温度高于环境温度时, 发生对流散热; 反之, 人体通过对流从周围空气获得热量。对流热交换可以定量为

$$C = A_D \times f_{cl} \times h_c \times (T_a - T_s)。 \quad (2)$$

式中, C 为对流热交换; A_D 是人体裸露部分表面积, 可根据身高体重来推算^[2]; f_{cl} 为服装的面积系数(取 1.15)^[1]; h_c 为热量交换系数(与气流速度有关, 取 $4.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[1]; T_a 为环境空气温度; T_s 为皮肤温度。

1.3 辐射热交换

辐射热交换描述了人体和环境之间的辐射热量交换, 当人体表面温度高于环境壁面(如墙面、地面、天花板等)温度时, 热量会以辐射能的形式传给环境, 人体失热; 反之, 则人体得热。辐射热交换由斯蒂芬-波尔兹曼定律可量化为

$$R = A_D \times f_{cl} \times f_{\text{eff}} \times \epsilon_p \times \sigma \times (T_{\text{mrt}}^4 - T_s^4)。 \quad (3)$$

式中, R 为辐射热交换; f_{eff} 为有效辐射表面系数, 与人的性别、体重、身高、体型关系不大, 对于坐态的人 f_{eff} 约为 0.696^[1]; ϵ_p 为人体辐射率(取皮肤和服装的辐射系数的平均值 0.97^[1]); σ 为斯波常数; T_{mrt} 为环境的平均辐射温度(取决于环境中的长波和短波辐射量)。

1.4 人体蒸发热损失

通过水分蒸发散热是人体调节体温的有效手段, 总的蒸发热损失分成两部分: 一部分是呼吸造成的热损失; 另一部分则是皮肤造成的蒸发热损失。

一般地, 从呼吸道表面(粘膜)到呼出气体, 呼出气体比吸入空气具有较高的温度和湿度。呼吸造成的潜热损失可以表示为

$$E_{\text{Rd}} = V \times r \times (p_{\text{va}} - p_{\text{svTsk}}) / p \quad (4)$$

式中, E_{Rd} 为呼吸潜热损失; V 为呼出的气体量(为人体代谢率 M 的函数^[1]); r 为水的汽化热; p_{va} 为环境水汽压; p_{svTsk} 为呼吸温度时的饱和水汽压; p 为大气压。

呼吸从人体带走水分, 造成潜热损失, 同时由于环境空气的温度与人体温度不一致, 吸入的空气经过呼吸道被加热, 也会造成显热损失, 这项热损失可以计算为

$$E_{\text{Res}} = V \times c_p \times (T_a - T_{\text{ex}})。 \quad (5)$$

式中, E_{Res} 为呼吸显热损失; c_p 为空气的定压比热; T_{ex} 为人体呼出的气体温度(通常取 34)。

皮肤蒸发也是热量散失的重要方面, 人体通过出汗, 并使汗液在皮肤表面完全蒸发可以带走汽化潜热。事实上, 汗液的蒸发可以分成以下几种情况。

(1) 人体皮肤表面看上去是干燥的, 没有汗液造成的湿润情况, 但事实上人体的一部分水份仍然通过皮肤表层直接蒸发到周围空气中, 称为“隐汗”。可以量化为

$$E_D = m \times r \times (p_{\text{va}} - p_{\text{svsk}})。 \quad (6)$$

式中, E_D 为隐汗热损失; m 为皮肤表面水蒸汽的渗透系数(在舒适条件下约为 1.271×10^{-6}); p^{svsk} 为皮肤表面的饱和水汽压。简化为^[1]

$$E_D = 3.054(0.256 \times T_s - 3.37 - p)。$$

(2) 当人体处于热的环境条件或者高的新陈代谢率(如重体力劳动)引起的热紧张状态时,出汗是最有效的热调节过程,在许多模型中开始出汗由平均体温的函数来参数化^[3]。出汗率的方程为

$$SW = 8.47 \times 10^{-5} \times [(0.1 \times T_s + 0.9 \times T_c) - 36.6]。 \quad (7)$$

式中, SW 为出汗率; T_c 为体内温度。

因此,在计算汗液蒸发 E_{sw} 时,有两种情况必须分开,一是产生的汗液少于人体表面可以蒸发的量,也就是说所产生汗液都将被蒸发,即

$$E_{sw} = SW \times r。 \quad (8)$$

二是身体的潜在蒸发小于产生的汗液量,这说明有部分汗滴落下来,对带走体内人体热量没有贡献。这时潜在蒸发的热量损失 E_{sw} 可量化为^[3]

$$E_{sw} = (A^D \times r \times h_c \times 0.622/p) \times (p^{va} - p^{svtk})。 \quad (9)$$

1.5 外围血管舒缩过程

人体热量平衡不仅仅是物理问题,还必须考虑重要的热生理过程。除了出汗外,外围血管的收缩和舒张、颤栗也是人体调节热量平衡的重要手段。根据环境的热状况,人体外围血管舒张或收缩,通过这种热量调节来影响热量散失。当血管舒张,更多的血液从体内流向体表,导致皮肤温度上升,体表和环境的温度梯度增加,因而人体有更多的能量散失。当环境温度高于人体表面温度,血管收缩导致相反的效果,节约人体热量。为了考虑热量平衡中的血管舒张和收缩规律,必须对它们进行参数化。从体内到体表的血液循环流量 v_b 可参数化为^[3]

$$v_b = [6.3 + 75 \times (T_c - 36.6)]/[1 + 0.5 \times (34.0 - T_s)]。 \quad (10)$$

1.6 颤栗产热

在非常冷的环境中,尽管血管收缩体内温度还是下降,当体内温度下降到某一阈值就开始颤栗,颤栗时新陈代谢率可以增加 2~3 倍,这一附加的热量增加过程可以参数化为^[3]

$$M_{shiv} = 19.4 \times (34.0 - T_s) \times (37.0 - T_c)。 \quad (11)$$

其中, M_{shiv} 为颤栗产生热量。如果 M_{shiv} 为负值,则设其为 0。

1.7 热量平衡方程

由以上讨论的热量获取或散失,热量平衡方程可以表示为

$$H + C + R + E_D + E_{Res} + E_{Rd} + E_{sw} = S。 \quad (12)$$

式中, S 为人体蓄热。当人体产热和散热相等时, $S = 0$; 若产热多于散热, $S > 0$, 可导致体温上升; 散热多于产热时, $S < 0$, 可导致体温下降。

2 热量平衡模型

以热量平衡方程为基础可以推导出很多热量平衡模型,以下介绍几种的热量平衡模型以及相应的衡量舒适状况的指标。

2.1 Fanger 的舒适方程与 PMV 值

在(12)式中假定气象参数、衣着特征和活动已知,仍然有 4 个未知量,即皮肤温度(T_s)、衣服表面温度(T_{cl})、出汗率(SW)和蓄热(S)。Fanger 通过数百人在人工气候室上千次的试验研究发现 T_s 和 SW 可以用舒适状态的平均值代替。为了能够解尚有两项未定量的热量平衡方

程, 还需要一个方程。这一方程表述了从皮肤表面通过皮肤层到达衣服表面的散热量 (F_{sc})^[3-5]

$$F_{sc} = 1/I_{cl} \times (T_s - T_{cl})。 \quad (13)$$

式中, I_{cl} 为衣服的保暖能力。模式将根据气温自动设置, 如气温 15 ~ 25 , I_{cl} 为 1.0 克罗 (clo), 而 F_{sc} 等于对流和辐射散热之和 ($R + C$)。

通过(12)、(13)式, 可以计算出 S 。值得指出的是 S 不是自然环境下人体的真正蓄热量, 因为输入值 T_s 和 S_W 不是真值而是舒适值, 但是 S 提供了离开舒适状态 ($S = 0$) 的偏差这一信息。定义在一定活动量下, 为了保持皮肤平均温度 T_s 和皮肤蒸发散热在舒适范围内时人体内的产热与对环境的散热之差为人体热负荷, 记为 L ^[1]。Fanger 提出并利用经验回归分析计算了一个热舒适环境指标—— PMV 值 (Predicted Mean Vote),

$$PMV = f(L, M) = (0.303e^{-0.036 \times M} + 0.0275) \times L。 \quad (14)$$

由此计算出 PMV 值可衡量热舒适状况。

2.2 MEMI 模型与 T_{PE}

Fanger 的舒适方程是衡量舒适度的理想方程, 但不能计算环境条件下真正的热量流和人体温度。这里介绍另一人体热量平衡模型——MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals)^[6]。在这个模型中, 皮肤温度不是假设的而是模型计算的结果, 出汗率是体内和皮肤温度的函数 ((7) 式), 在这个模型中 T_s 、 T_c 、 T_d 和 S 在计算开始时是未知参数, 除了(12)和(13)式以外还需要另外的方程, 即体内到皮肤的热量 F_{cs} ^[3-5]

$$F_{cs} = v_b \times \rho_b \times c_b \times (T_c - T_s)。 \quad (15)$$

式中, v_b 代表从体内到皮肤的血流量; ρ_b 为血液浓度; c_b 为血液的比热。

如果给定气候条件、活动量、衣着类型, 运用(12)、(13)、(15)式可以计算相关的热量分量和体内温度、出汗率等有关人体热生理的参数。

基于 MEMI 模型, Hoeppe^[4] 定义了新型的人体感觉温度 (T_{PE}), 在某一室内或室外环境中, 人体参加轻体力活动, 其体内温度和皮肤温度达到热量平衡态时相应气温即为 T_{PE} 。

3 人体热量平衡模型的应用

由以上分析, 可以知道人体热量平衡方程中各热量项主要受气象条件影响: 气温 (C 、 E_{Res}), 湿度 (E_D 、 E_{Rel} 、 E_{SW}), 气流速度 (C 、 E_{sw}), 平均辐射温度 (R)。因此, 如果设定人体热量平衡方程中的有关参数并且给定以上 4 个气象参数就可以进行人体舒适状况的预报。在实际应用中, 设定了以下人体参数: 男性 35 岁, 身高 175 cm, 体重 75 kg, 坐位, 轻体力工作, 做功 80 W。接下来运用上海有限域数值天气预报和 MEMI 模型实现了华东地区人体感觉温度 (T_{PE}) 的计算和预报。表 1 中列举了华东地区省会城市 2000-11-06T 14 的体感温度, 参照国外体感温度和人体感觉等级规定^[6] (表 2), 可以作出人体舒适度预报。人体感觉温度能够衡量人体在气温、辐射温度、水气压和风速等气象条件综合影响后的热舒适感觉。从表 1 可以看出, 济南和南昌相比, 济南温度和平均辐射温度都较低, 且风速较大, 体感温度比气温低, 而南昌则体感温度与气温接近; 杭州和合肥相比, 尽管气温和平均辐射温度接近, 但由于杭州湿度大、风速小, 体感温度比合肥高。

表 1 华东各省会城市体感温度(T_{PE})预报Table 1 T_{PE} forecast in capital cities of each provinces in east China

城市	14 时气温/	平均辐射温度/	水汽压/hPa	风速/ $m \cdot s^{-1}$	体感温度/	人体舒适状况
济南	16.9	22.3	15.4	4.6	12.0	凉
合肥	23.7	27.1	15.4	3.2	20.1	舒适
南京	22.6	28.5	14.5	3.4	19.3	舒适
上海	21.1	27.6	12.1	1.5	19.5	舒适
杭州	23.8	27.6	17.8	0.9	23.2	微暖
南昌	25.2	31.5	16.7	1.4	25.0	微暖
福州	22.7	30.6	26.0	4.9	19.3	舒适

表 2 体感温度及相应人体感觉

Table 2 Thermal perception by human beings and physiological stress on human beings under different grades of T_{PE}

$T_{PE}/$	人体感觉	生理应激水平
< 4	很冷	极端冷应激反应
4 ~ 8	冷	强烈冷应激反应
8 ~ 13	凉	中等冷应激反应
13 ~ 18	微凉	轻微冷应激反应
18 ~ 23	舒适	无热应激反应
23 ~ 29	微暖	轻微热应激反应
29 ~ 35	暖	中等热应激反应
35 ~ 41	热	强烈热应激反应
> 41	很热	极端热应激反应

目前我们正用人体热量平衡模型进行人体舒适度预报的试验运行,为了考察体感温度的逐日变化情况,考察 2001 年 3 月下旬预报情况以及与常规舒适度指数进行对比(表 3)。

由表 3 可以看出:(1)体感温度能够反映出逐日气象要素变化后的人体感觉状况,比常规的舒适度指数具有更高的敏感性;(2)体感温度具有与温度同样的单位($^{\circ}C$),便于公众理解接受,与气温进行比较,能够反映出人体感觉温度与气温的差异(比感觉温度高了,还是低了);如 3 月 30 日,31 日天气晴好,日照充足,风速小,所以感觉温度要比气温高。

表 3 体感温度与舒适度指数对比

Table 3 Comparison between T_{PE} and comfort index

日期	气象特征				体感温度		舒适度	
	气温/ $^{\circ}\text{C}$	日照/h	相对湿度/%	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_{PE}/^{\circ}\text{C}$	人体感觉	指数	人体感觉
3月21日	18.4	9	31	1	16	微凉	54	微凉
3月22日	15.4	4.8	51	1	18	舒适	50	微凉
3月23日	13.3	1.5	59	3	13	微凉	50	微凉
3月24日	14.1	0	90	1	14	微凉	57	微凉
3月25日	13.7	0	69	1	11	凉	47	凉
3月26日	11.4	9.8	46	1	12	凉	47	凉
3月27日	14.2	3.4	66	1	16	微凉	48	凉
3月28日	10.3	7.5	37	2	9	凉	42	凉
3月29日	9.8	9.6	24	1	11	凉	48	凉
3月30日	13.9	10	25	2	15	微凉	49	凉
3月31日	9.8	10.1	33	1	12	凉	45	凉

4 结 论

(1) 人体在环境中所受气候的影响, 是许多气象要素综合作用的结果。虽然人们常用气温来表示环境的冷热, 但是, 人对外界冷热的调节和舒适感, 不能根据气温或其他单一的气象要素来评价。人体和环境之间的热物理和热生理过程, 除了受气温、湿度、风速和辐射的影响外, 还与气压和水汽压有关。本文介绍的人体热量平衡模型, 全面考虑了环境气象条件的影响, 由此提出的体感温度能够衡量人体在环境中的热舒适状况。

(2) 利用数值天气预报技术能够定量预报环境气象要素, 并应用于人体热量平衡模型, 使得体感温度和舒适度预报成为可能。从目前的试验运行来看, 数值预报和人体热量平衡模型结合对于预报人体舒适度结果是令人满意的, 而且具有推广应用的价值。

(3) 舒适度预报的正确与否与数值天气预报的正确与否具有非常密切的关系, 为了做好体感温度的预报, 首先要做好的就是气象要素的预报。

参考文献:

- [1] 魏润柏, 徐文华. 热环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.
- [2] 夏廉博. 人类生物气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1986.
- [3] Hoppe P R. Heat balance modelling[J]. *Experientia*, 1993, 49(12): 741 ~ 746.
- [4] Hoppe P R. The physiological equivalent temperature — a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. *Int J Biometeorol*, 1999, 43(2): 71 ~ 75.
- [5] Matzarakis A, Mayer H, Iziomon M G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature [J]. *Int J Biometeorol*, 1999, 43(2): 76 ~ 84.
- [6] Matzarakis A, Mayer H. Heat stress in Greece[J]. *Int J Biometeorol*, 1997, 41(1): 34 ~ 39.
- [7] Yoshimitsu Inoue, Mikio Nakao, Syozo Okudaira, et al. Seasonal variation in sweating response of older and younger man[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1995, 70(1): 6 ~ 12.
- [8] Anderson G S. Human morphology and temperature regulation[J]. *Int J Biometeorol*, 1999, 43(2): 99 ~ 109.

- [9] Anderson G S, Martin A D. Calculated thermal conductivities and heat flux in man[J]. Undersea & Hyperbaric Medicine, 1994, 21(4): 431 ~ 441.
- [10] Anderson G S, Ward R, Mekjavic I B. Gender differences in physiological reactions to thermal stress[J]. Eur J Appl Physiol, 1995, 71(2): 95 ~ 101.
- [11] Hiroyuki Ueda, Yoshimitsu Inoue, Tsutomu Araki, et al. Clothing microclimate temperatures during thermal comfort in boys, young and older men[J]. Int J Biometeorol, 1996, 39(3): 127 ~ 132.
- [12] 李 源, 袁业畅, 陈云生. 武汉市人体舒适度计算方法及其预报[J]. 湖北气象, 2000, (1): 27 ~ 28.

HUMAN BODY HEAT BALANCE MODEL WITH ITS APPLICATION IN COMFORT INDEX FORECAST

TAN Jianguo, SHAO Demin, MA Leiming, GU Jianfeng

(Institute of Meteorological Science of Shanghai, Shanghai 200030)

Abstract: The influence of climate on human body is a synthetic action of many meteorological elements. As usual, air temperature is used to be an index to indicate the warm and cool of environment, but the thermal regulation and thermal comfort of human body can not be assessed only by air temperature or other single meteorological element. The only way to describe the effects of the thermal environment on human body completely is to do by means of a heat balance model. In such model all relevant meteorological parameters, behavioral characteristics (activity and clothing) and body measurements can be considered. By the use of numerical weather forecast results and the model MEMI, the problems of heat balance and ways of solving them are described, and an new thermal index —— the physiological equivalent temperature of human body has been calculated to assess the thermal comfort.

Key words: heat balance model; thermal comfort; physiological equivalent temperature