

用标准有效温度和不舒适指标 研究哈尔滨热舒适状况

陈 莉^{1,2} 李 帅³ 周永吉⁴ 张洪梅¹

(1. 黑龙江省哈尔滨市气象局, 150080; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院;
3. 黑龙江省气象局; 4. 黑龙江省气象信息中心)

提 要: 为探讨哈尔滨市非采暖期自然热舒适状况, 采用标准有效温度这一从人体生理角度得到的热舒适指标来进行研究。考虑到舒适感因人而异, 在大多数实际环境条件下, 即使对某一个人来说也并非尽善尽美, 同时采用热不舒适指标来评价不舒适程度。以哈尔滨市2005年非采暖期(4月下旬至10月中旬)的逐时气温、相对湿度以及风速资料为基础, 计算了该市春、秋季非采暖期(4月下旬至5月下旬、9月上旬至10月中旬)逐旬、夏季(6—8月)逐月每3小时的气温、相对湿度、风速平均值。假设夏季人们穿着的服装热阻为0.6clo(典型服装为长裤、短袖衬衫或裤、长袖衬衫), 春、秋非采暖期服装热阻为0.9clo(典型服装为长裤, 长袖衬衫, 夹克衫), 当人们活动量为1.0met时(如室内伏案工作), 根据计算得到各气象要素平均值, 对比热舒适图得到逐旬(月)的每3小时标准有效温度和不舒适指标。对比发现哈尔滨市非采暖期没有能够使80%的人感到满意的时间区域, 大致只有5月下旬至9月上旬的10:00—18:00期间, 能够达到70%的人感到满意。从4月下旬到5月上旬, 平均来看一天中75%的时间感觉很冷, 不舒适; 而9月下旬至10月上旬, 一天中有一半时间感觉很冷, 不舒适。由这两个指标所得到的哈尔滨非采暖期热舒适状况比较符合实际, 可以采用这两种指标作为人体舒适度研究的参考。

关键词: 标准有效温度 SET 热不舒适指标 DISC 非采暖期 自然热舒适状况

Analysis of the Thermal Status by Using the Standard Effective Temperature and Discomfort Index in Harbin

Chen Li^{1,2} Li Shuai³ Zhou Yongji⁴ Zhang Hongmei¹

(1. Harbin Meteorological Office, 150080; 2. School of Geography Remote and Sensing Science, Beijing Normal University;
3. Heilongjiang Meteorological Bureau; 4. Meteorological Information Center of Heilongjiang Province)

资助项目: 本文由中国气象局气候变化专项项目(CCSF2007-43)资助

收稿日期: 2007年10月14日; 修定稿日期: 2007年11月15日

Abstract: Standard Effective Temperature (SET) is the best thermal comfort index induced from human heat balance model so far. SET is used to analyze the thermal comfort in non-heating period in Harbin. In actual environment, one person may feel too cold or too hot when he/she wears different clothes and takes different activity. For lots of people, the environment can't make all of them feel comfort because every individual has different feeling about the environment and has different standard of comfort. So, discomfort index (DISC) is adopted in this paper to analyze the degree of discomfort in Harbin. Based on data of hourly temperature, hourly relative humidity and hourly wind speed in non-heating period (from 20 April to 20 October) in 2005 in Harbin, average three-hour temperature, relative humidity and wind speed of every period of ten days from 20 April to 30 May and from 1 September to 20 October are calculated. Average three-hour temperature, relative humidity and wind speed of every month from June to October are calculated too. And based on the thermal comfort figures in the book "Architecture. Climate. Energy", the method of interpolation is applied to obtain the SET and DISC values of every-three-hour of every period of ten days. Some conclusions are: If people in Harbin wear clothes for which clothing thermal resistance is 0.6, such as trousers, semi-sleeve shirt or long-sleeve shirt, from June to August and people wear clothes for which clothing thermal resistance is 0.9, such as trousers, long-sleeve shirt, and jacket in other periods, there are no period to make eighty percent of people feel thermal comfort when people work at a table in a room. From 10:00 to 18:00 in a day of the-last-ten-day of May to the-first-ten-day of September, seventy percent of people feel comfort. People can feel cold in 75 percent of a day during the period from the-last-ten-day of April to the-first-ten-day of May. People can feel very cold in half a day during the period from the-last-ten-day of September to the-first-ten-day of October. So, in non-heating period in Harbin, people may wear warmer clothes to offset the discomfort.

Key Words: standard effective temperature (SET) discomfort index (DISC) non-heating period natural status of heat comfort

引 言

人类热舒适是建筑科学领域中最早研究的课题之一,对它的研究,已经历了漫长的历史。1919年美国采暖通风工程师协会(American Society of Heating and Ventilating Engineers, ASHVE)在匹兹堡建造了一个微气候实验室,主要目的就是研究空气温度、空气湿度和空气流速等对人体热感觉和热舒适的影响。1923年,Houghton和Yaglou等人推导出对热舒适研究有深远影响的有效温度指标^[1]。该指标是将空气温度、湿度、气流

速度按照不同的方式进行组合,使相同的有效温度值能给出相同的热感觉。但有效温度指标没有考虑热辐射的作用,鉴于此,1932年,Vernon和Warner^[2]用黑球温度(经过对湿球温度的修正)计算了修正的有效温度,1946年,提出一种同样的方法(但并未对湿球温度加以修正),将该合成的温度称为修正有效温度指标。

1970年,丹麦技术大学的Fanger^[3]以人体热平衡方程为出发点,根据收集到的1396名美国和丹麦受训对象的热感觉表决票,进行回归分析,进而得到了评价室内热环境热舒适指标-预测平均投票数(predicted mean

vote, PMV), 它综合了空气温度、空气湿度、空气流速、平均辐射温度、活动强度和衣着等 6 个影响人体热舒适的因素。即:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.0275)[M(1 - \eta) - 0.3054(5.765 - 0.007H - p_a) - 0.42(H - 58.15) - 0.0173(5.867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9 \times 10^{-8} f_d (T_d^4 - T_{mrt}^4) - f_d h_c (t_d - t_a)] \quad (1)$$

其中, M 为人体新陈代谢率, $W \cdot m^{-2}$; η 为人体机械效率(%); H 为人体净得热 ($W \cdot m^{-2}$); p_a 为环境空气中水蒸汽分压力 (kPa); t_a 为环境空气温度 ($^{\circ}C$); f_d 为服装的面积系数, 即人体着装后的实际表面积与人体裸身表面积之比; t_d 为着装人体服装外表面平均温度, $t_d = T_d - 273.15 (^{\circ}C)$; t_{mrt} 为环境的平均辐射温度, $t_{mrt} = T_{mrt} - 273.15 (^{\circ}C)$; h_c 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。在实际应用中, 热环境的 PMV 值可用热舒适仪直接进行综合温度值的测量。

与 PMV 模型相似的还有 Gagge 教授提出的新有效温度指标和标准有效温度指标 (standard effective temperature, SET)。1971 年美国耶鲁大学 Pierce 研究所的 Gagge 提出了新有效温度指标, 但该指标只适用于着装轻薄、活动量小、风速低的环境^[4]。随后, Gagge 又综合考虑了不同的活动水平和服装热阻的影响, 提出了标准有效温度 (SET) 指标^[5]。SET 是根据生理条件制定的一项合理的热舒适指标, 它被美国暖通空调工程师协会所采用且为大量实验及理论研究验证。

在我国近年来有一些学者进行了有关人体舒适度方面的研究。他们大多以干球温度、湿球温度、相对湿度、风速等为因子, 建立人体舒适度预报方程, 以适应气象专业预报。如山东省^[6]的预报公式为:

$$K = (1.818t_{max} + 18.18)(0.88 +$$

$$0.002RH_{max}) + \frac{t_{max} - 32}{45 - t_{max}} - 3.2\sqrt{v} + 3.2 \quad (2)$$

其中 K 为人体舒适度指数, t_{max} 为日最高气温, RH_{max} 为日最大相对湿度, v 为日平均风速。

长江三峡库区^[7]的舒适度指数计算公式为:

$$K = \left(\frac{9}{5}t + 32\right) - 0.55(1 - RH)\left(\frac{9}{5}t + 26\right) \quad (3)$$

式中 t 、 RH 分别为环境温度和相对湿度。类似的还有兰州^[8]、南昌^[9]、郑州^[10]、武汉^[11]、合肥^[12]、中山^[13]、广州^[14]等地的人体舒适度研究。可以看出, 我国气象部门所进行的人体舒适度研究, 很多是以 Steadman 的感热温度统计归纳模型^[14-15]为基础, 结合本地实际而得到的经验回归模型。

本文试图选用根据生理条件而研究得出的、迄今为止最为全面的标准有效温度 (SET)^[17] 及不舒适指标 (Discomfort, DISC), 对哈尔滨市的自然热舒适状况加以分析, 希望对热舒适研究指标的选择提供一定参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用资料为哈尔滨市 2005 年逐时气温、相对湿度、风速, 资料来源于黑龙江省气象局。由于哈尔滨市每年从 10 月下旬至次年 4 月中旬为冬季采暖期, 而本文研究的是自然状态下的热舒适状况, 因此, 以 4 月下旬至 10 月中旬为研究时段。

1.2 标准有效温度 (SET)

标准有效温度 (SET) 是根据生理条件制定的一项合理的热舒适指标, 它已经被大量

实验及理论研究所验证。SET 的理论基础是 Gagge 提出的人体温度调节的两节点模型^[5]。该模型是将人体看作两层,即核心层和皮肤层。新陈代谢在核心层产生,产生的一部分热量通过呼吸直接散失在环境中,其余的热量传到皮肤表面。传到皮肤表面的热量一部分由汗液蒸发散失掉,其余的热量通过衣服传到衣服表面,然后通过辐射和对流散失到环境中。传热过程被视为是一维的。核心层和皮肤层的热平衡方程式分别为:

$$M_{cr} c_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M + M_{sh} - W - Q_{re} - (K + m_{bl} c_{p,bl})(T_{cl} - T_{sk}) \quad (4)$$

$$M_{sk} c_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = (K + m_{bl} c_{p,bl})(T_{cl} - T_{sk}) - Q_{dr} - Q_{ev} \quad (5)$$

式中 M_{cr} , M_{sk} 为单位表面的核心层质量和皮肤质量; c_{cr} , c_{sk} 为核心层和皮肤层平均比热容; T_{cr} , T_{sk} 为核心层及皮肤层温度; t 为时间; M 为单位体表面新陈代谢率; M_{sh} 为单位体表面积寒战调节产热量; W 为单位体表面积对外所做的机械功; Q_{re} 为单位体表面积呼吸热损失; Q_{dr} 为单位体表面积与环境间的显热换热量; Q_{ev} 为单位体表面积与环境间的潜热换热量; K 为核心层与皮肤间的导热系数; m_{bl} 为核心层与皮肤层间的血流量; $c_{p,bl}$ 为血液比热容。

虽然温度调节的数学模型很多,但两节点模型是考虑人体温度调节过程的最简单的模型。这类模型的环境参数不随时间改变,而且把人体看作是外界热刺激的被动接受者。一定的热环境参数对人体的作用,是通过两者之间的热湿交换来影响人体的生理参数,进而产生不同的热感觉^[18]。

简单来讲,SET 对于任何环境条件、衣着及活动量均按照均匀的环境条件来表示,这种均匀环境条件即:相对湿度为 50%,气流速度为 $0.125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (即室内“静风”状

态),活动量为 1met (相当于新陈代谢为 $58 \text{ W} \cdot \text{s}^{-2}$,无外部功的伏案工作),内衣热阻为 0.6clo (相当于室内穿的一般薄衣衫)。设在 4 个环境变量(干球气温、黑球温度、风速、湿度)、衣着及活动量的任意组合下,标准有效温度为 5°C ,这就意味着人在这种环境中的热感觉和在均匀环境温度为 5°C 、相对湿度为 50%、在室内“静风”状态下穿便衣坐着时的热感觉是一样的^[4-5]。

1.3 不舒适指标(DISC)

在大多数实际环境条件下,即使对某一个人来说也并非尽善尽美,对于实际衣着及活动条件,该环境可能属于某种程度的过热或过冷。如果涉及的人数众多,则由于舒适感因人而异,任何条件也难以同时满足每一个人,因此本文还采用 Gagge 等人提出的热不舒适指标 DISC 来评价不舒适的程度^[4]。DISC 为皮肤湿度 ω 的函数:

$$DISC = 5.0(\omega - 0.06) \quad (6)$$

其中, $\omega = [H_{sk} - h'(t_{sk} - t_a)] / (h'_e P_d)$, H_{sk} 是皮肤表面的净热流量,即体内传输到皮肤表面的热流量; h' 和 h'_e 分别为显热传递系数和蒸发热传递系数,它们是与周围空气流速、服装热阻和湿阻有关的函数; t_{sk} 是皮肤温度; t_a 为环境温度; p_d 为皮肤表面与环境之间的压力梯度。通常情况下 ω 的值为 $0.06 \sim 1.0$,开始排汗前, $\omega = 0.06$; 当皮肤表面被汗液完全润湿时, $\omega = 1.0$ 。

DISC 以 0 点为中和点,冷边为负值,热边取正值。此项指标的优点在于:第一,适用的条件范围很广泛而不仅适用于一般的“室内”条件;第二 DISC 指标可表述对于不舒服程度的评价,因而可在冷条件与热条件间找到与一般反应相当的值。DISC 指标中,在 $-0.5 \sim +0.5$ 之间的区域表示 80% 的人能感到满意;在 $-1.0 \sim +1.0$ 之间,为 70% 的人可接受的舒适条件范围。

1.4 衣服热阻

服装热阻 I_{clo} 是指从皮肤表面到服装外表面对显热传热的热阻, 不包括着装人体表面空气层的热阻。常用单位是 clo, $1clo = 0.155m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ 。根据 ASHRAE standard 55-2002^[19] 中典型成套服装的热阻值, 本文选择 0.6clo (长裤, 短袖衬衫或裤, 长袖衬衫) 和 0.9clo (长裤, 长袖衬衫, 夹克衫) 来作为夏季 (6—8 月) 和春、秋季 (4 月下旬至 5 月下旬, 9 月上旬至 10 月中旬) 典型服装。

1.5 研究方法

对哈尔滨市 2005 年 4 月下旬至 10 月中旬逐时气象资料进行处理, 首先计算 3 小时平均值, 如, 0 时气象要素值是 23 时、0 时、1 时这 3 个时次的气象要素平均值…依次类推; 然后计算 4 月下旬、5 月上旬、5 月中旬、5 月下旬、6 月、7 月、8 月、9 月上旬、9 月中旬、9 月下旬、10 月上旬和 10 月中旬该时次的平均值。其中 4—5 月以及 9—10 月为春季和秋季, 气温变化较明显, 所以分旬计算。

文献[4]附录 3B 列出了各种服装热阻、风速、活动量不同组合的热舒适图, 如服装热阻 0.6clo、风速为 $2m \cdot s^{-1}$ 、活动量为 1.0met 的热舒适图 (图 1a) 以及服装热阻 0.9clo、风速为 $0.5m \cdot s^{-1}$ 、活动量为 1.0met 的热舒适图 (图 1b)。热舒适图中的横坐标是空气温度或作用温度, 右侧纵坐标是水蒸汽压力, 从右上方至左下方的曲线是相对湿度线。

为避免测量和计算皮肤湿润度和皮肤温度, 本文设定条件是: 在遮荫的室内 (即不考虑辐射温度), 伏案工作 (活动量为 1met)、夏季服装热阻为 0.6clo, 秋季服装热阻为 0.9clo。在自然通风条件下, 室内风速与室外相同。

首先由假设条件设服装热阻分别为 0.6clo 和 0.9clo, 活动量为 1.0met, 结合实际

风速确定所需参照的文献 4 附录 3B 中的热舒适图, 再根据各时次温度和相对湿度从所参照的热舒适图中利用内插方法得到相应的 SET 和 DISC 值。

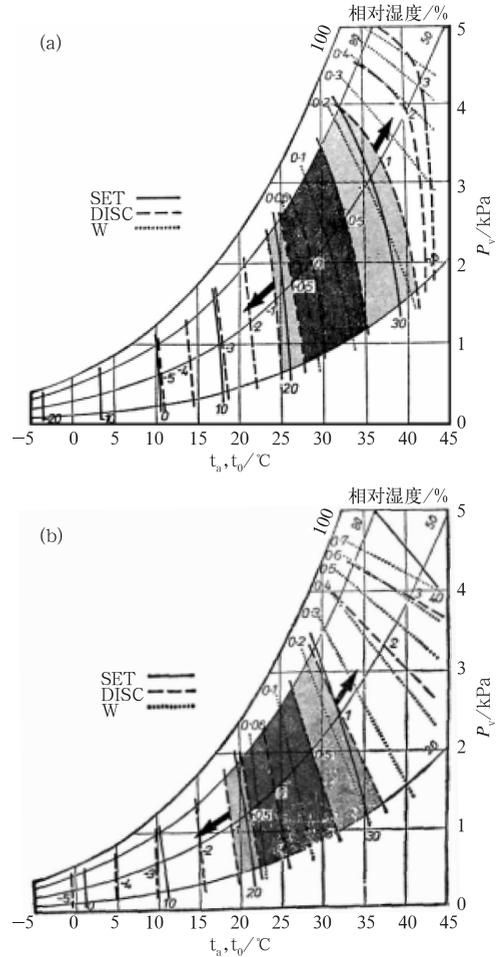


图 1 不同服装热阻、气流速度、活动量组合下的热舒适示意图

(a) 服装热阻: 0.6clo, 气流速度: $2.0m \cdot s^{-1}$, 活动量: 1.0met; (b) 服装热阻: 0.9clo, 气流速度: $0.5m \cdot s^{-1}$, 活动量: 1.0met (黑色阴影为 80% 满意区域, 灰色阴影为 70% 满意区域)

2 结果分析

2.1 热舒适性分析

哈尔滨市 2005 年 4 月下旬至 10 月中旬逐时的热舒适指标 SET 的等值线如图 2 所

示。从图中可以看到,哈尔滨市在 5 月中旬至 9 月中旬有很大一部分时间 SET 在 15℃ 以上,其中 5 月中旬的 13:00—16:30、5 月下旬的 9:00—19:30、6 月的 8:00—22:00、7 月的 6:00—次日 1:00、8 月的 7:00—24:00、9 月上旬的 8:00—20:00 和 9 月中旬的 10:15—17:30。在此期间,6 月开始出现 SET 值大于 20℃ 的时次;而 7 月平均来看,一天中 SET 值大于 20℃ 的时间最长,为 11:00—16:30;8 月较 7 月则稍短一些。

表 1 是人对于标准有效温度的热反应。对比表 1 可以知道,哈尔滨市 6—8 月的中午至傍晚感觉稍凉爽,舒适;而 5 月中至下旬和 9 月上至中旬期间,上段所列的 SET 值大于 15℃ 的时次感觉凉爽,稍不舒适;从 4 月下旬到 5 月上旬,平均来看一天中 75% 的时间感觉很冷,不舒适;而 9 月下旬至 10 月上旬,一

天中有一半时间感觉很冷,不舒适。这种不对称结构从一个侧面反映了哈尔滨市春—夏过渡时间要短于夏—秋的过渡时间。

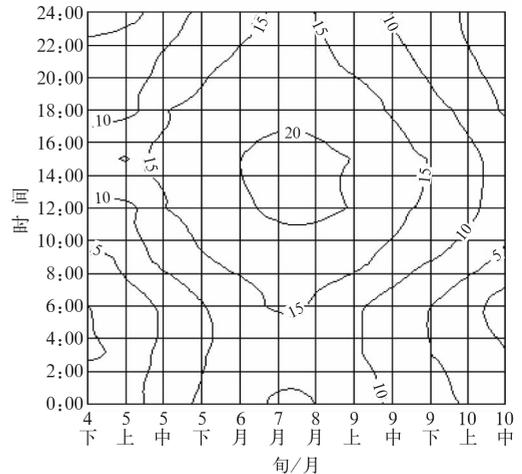


图 2 哈尔滨 4 月下旬至 10 月中旬逐时标准有效温度 SET(℃)等值线图

表 1 人对于标准有效温度(SET)的热反应^[4]

SET/℃	热感觉	不舒适程度	人体的温度调节	健康状态
40	很热	难以忍受	皮肤不能蒸发水分	中暑的危险增加
35	热	很不舒适		
30	暖和	稍不舒适	血管缩张、排汗增加	
25	稍暖和	无明显排汗		
20	中和	舒适	正常健康状态	
15	稍凉爽	稍不舒适	血管收缩	口干干燥
10	凉爽	行为改变		
5	冷	不舒适	开始寒颤	全身循环受到削弱
0	很冷			

2.2 热不舒适性分析

通过对热舒适指标 SET 的分析,发现哈尔滨市有很大一部分时间是处于不舒适的范畴。那么不舒适的程度如何,下面通过对不舒适指标 DISC 的分析来研究。

图 3 就是哈尔滨市 4 月下旬至 10 月中

旬逐时热不舒适指标 DISC 等值线图,从中可以看到,哈尔滨市非采暖期 DISC 均没有小于 0.5 的时间,也就是说,如果在 6—8 月穿着服装热阻为 0.6clo(长裤,短袖衬衫或裤,长袖衬衫)、而在其它时间穿着服装热阻为 0.9clo(长裤,长袖衬衫,夹克衫)的服装,哈尔滨市非采暖期没有能够满足 80% 的人

感到满意的时间区域,大致只有 5 月下旬—9 月上旬的 10:00—18:00 期间,能够达到 70% 的人感到满意。如果要想使 DISC 值达到 $-0.5 \sim +0.5$,在不改变环境温度的情况下,只有增加服装才能达到,如夏季穿着热阻为 0.9 的服装(如(长裤,长袖衬衫,夹克衫),而秋季穿着热阻在 1.5 左右的服装(如一套牛仔装、保暖内衣裤),才能达到 80% 的人满意。

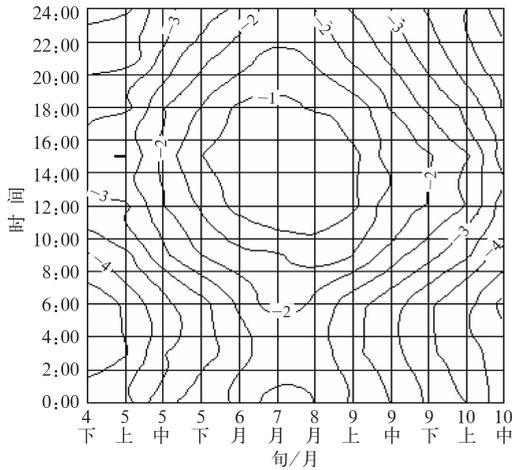


图 3 哈尔滨 4 月下旬至 10 月中旬逐时热不舒适指标 DISC 等值线图

3 结论与讨论

假设 6—8 月穿着夏装(服装热阻为 0.6),而 4 月下旬至 5 月下旬和 9 月上旬至 10 月中旬穿着秋装(服装热阻为 0.9),当人处在室内无外部功的伏案工作状态时,通过对热舒适指标 SET 和热不舒适指标 DISC 的分析,发现哈尔滨市非采暖期没有能够满足 80% 的人感到满意的时间区域,大致只有 5 月下旬至 9 月上旬的 10:00—18:00 期间,能够达到 70% 的人感到满意。哈尔滨市 6 至 8 月的中午至傍晚感觉稍凉爽,舒适;5 月中旬的 13:00—16:30、5 月下旬的 9:00—19:30、9 月上旬的 8:00—20:00 和 9 月中旬

的 10:15—17:30,感觉凉爽,稍不舒适,而旬内其它时间则感觉冷,不舒适;从 4 月下旬到 5 月上旬,平均来看一天中 75% 的时间感觉很冷,不舒适;而 9 月下旬至 10 月上旬,一天中有一半时间感觉很冷,不舒适,10 月中旬则感觉更冷,更加不舒适。

尽管对于人类热舒适问题的研究,已经历了漫长的历史,但在绝大多数情况下,结论是清楚但又远非确切的。研究者大多对其结论作些规定和限制。有时,结论仅适用于某种受到限制的环境条件;有时又只适用于按照年龄、种族、适应性或工作条件区分的一群人。上面研究的哈尔滨市热舒适状况,同样对于环境条件有了一定的限制,如人处在室内无外部功的伏案工作状态、穿着服装热阻为 0.6clo 或 0.9clo、没有考虑平均辐射温度等。因此,有必要根据二节点模型或人体热平衡方程,继续对热舒适问题进行研究,得到包含温度、相对湿度、风速、辐射温度、衣着、活动量等变量的简便易行的热舒适方程。目前,我国气象台站进行人体舒适度研究,大多采用经验回归技术,可以结合标准有效温度(SET)和不舒适指标(DISC)对经验回归结果进行适当订正。同时也要注意,我国地域辽阔,民族众多,对舒适性的要求和当地气候的适应性也不一样,各地区应结合当地气候、生活习惯、身体素质等,对舒适性指标进行各自的修正和改进,得出适合本地区的舒适性指标。

参考文献

- [1] Beford T.. Researches on thermal comfort[J]. Ergonomics, 1961, 4(4): 280-310.
- [2] Vernon H. M., Warner C. G.. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures[J]. Journal of Hygiene, 1932, (32): 431.
- [3] Fanger P O.. Thermal comfort[M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [4] T. A. Max, E. N. Moles 著,陈士口译. 建筑. 气候.

- 能量[M]. 中国建筑工业出版社,1990.
- [5] Gagge A P. A standard predictive index of human response to the thermal environment[J]. ASHRAE Trans,1986,92(2):709-731.
- [6] 杨成芳,薛德强,李长军. 山东省人体舒适度区域特征研究[J]. 气象,30(10):7-11.
- [7] 邹旭恺. 长江三峡库区旅游气候资源评估[J]. 气象,29(11):55-57.
- [8] 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.
- [9] 雷桂莲,喻迎春,刘志萍,等. 南昌市人体舒适度指数预报[J]. 江西气象科技,1999,22(2):40-41.
- [10] 夏立新. 郑州市人体舒适度预报[J]. 河南气象,2000,2:30-31.
- [11] 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.
- [12] 石春娥,王兴荣,陈晓平,等. 人体舒适度预报方法研究[J]. 气象科学,2001,21(3):363-368.
- [13] 黄静. 天气舒适度的分析和应用[J]. 气象,27(11):47-51.
- [14] 陈桂标. 人体舒适度的预报方法[J]. 广东气象,2000,4:29-30.
- [15] Steadman R G. The assessment of sultriness Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science[J]. Journal of Applied Meteorology, 1979,18(7):861-873.
- [16] Steadman R G. The assessment of sultriness. part II: Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature[J]. Journal of Applied Meteorology,1979,18(7):874-885.
- [17] 王昭俊,赵加宁,刘京. 室内空气环境[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [18] 夏一哉,赵荣义,江亿. 北京市住宅环境热舒适研究[J]. 暖通空调,1999,29(2):1-5.
- [19] ASHRAE Standard 55-2002. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.,2002.