

城市户外热环境指标评价

西安工程大学 于付涛* 狄育慧

摘要 随着人们生活水平的提高,人类对室外热环境的要求也逐步提高。从气候、生理调节和心理调节方面分析了影响人体室外热舒适的因素,分析了室外热环境的各种评价方法和评价指标,并通过一组数据分析计算了对应的 OTCD 指标值。

关键词 热舒适度; 户外热环境; 影响因素; 评价指标; 评价标准

Evaluating of Urban Outdoor Thermal Environment Index

Yu Futao and Di Yuhui

Abstract With the people living standard's enhancement, people also gradually enhances to the outdoor thermal environment's request. This article analyzes the affection factor of the human body outdoor heat comfortable from the climate, the physiological regulation and the psychological adjustment, and analyzes the outdoor thermal environment evaluating method and index. And through a set of data analyze and calculate the corresponding OTCD indexes.

Keywords Thermal comfortable degree; Outdoor thermal environment; Influence factors evaluating index; Evaluation standard

0 引言

随着经济建设的不断提高和社会的不断发展,人们的生活水平不断的提高,人们在追求室内热舒适的同时,对室外环境的要求也越来越高。尤其是在五个工作日的普及之后,这种趋势更加明显。因此,对室外热环境的研究也越来越受到学者们的重视。

1 影响人体热舒适的因素

人体热舒适在ASHRAE标准中的定义为人对热环境表示满意的意识状态。它通过研究人体对热环境的主观热反应,得到人体热舒适的环境参数组合的最佳范围和允许范围以及实现这一条件的控制、调节方法。影响人体热舒适的因素主要有气候因素和人的主观反应。

1.1 气候因素

室外环境受自然条件的影响很大,影响热环

境的主要因素为:空气温度、黑球温度、湿度和风速^[1-6]。

(1) 空气温度

空气温度是影响室外热环境的重要因素。人是一个恒温动物,所以会通过自身的冷热调节来适应空气温度的变化^[7]。当人处于炎热环境时,皮肤表面的汗腺舒张,通过排放大量的汗液来带走身体的热量,从而维持身体温度的恒定。当人处于寒冷环境时,皮肤表面的汗腺收缩,减少汗液的排放,并且通过打“冷颤”,消耗能量,增加体温。

(2) 黑球温度

黑球温度是一个综合温度,主要受到太阳辐射的影响,而且太阳辐射对人体的热感觉有强烈的影响。在炎热的夏季,人在无遮挡和有树阴遮挡的不同环境下,热感觉会有很大的不同。这是因为有树阴遮挡区域的太阳辐射量是无遮挡区域的10%^[3]。在炎热的夏季,人暴露在太阳底下,皮肤在强烈的太阳辐射下,会感觉到有灼热感,所以人们通常会选择在有遮挡的区域乘凉,其中在有树阴遮挡的区域居多。而在寒冷的冬季,人们喜欢在有阳光照射的地方活动,主要是接收太阳的辐射得热,提高人体的热舒适。

* 于付涛,男,1987年1月生,博士,在读研究生
710048 陕西省西安市金花南路西安工程大学 139 信箱
15029753585
E-mail: yufutao0534@126.com
收稿日期: 2011-9-16

(3) 湿度

相对湿度对于人体的热环境没有直接的影响，但是影响到了身体表面排汗的散热效率。比如：在高温高湿的环境条件下，由于相对湿度较高，身体水分的蒸发就会受到限制，形成闷热的感觉。但是在低温的环境下，相对湿度的影响就相对较小。

(4) 风速

表1 PMV与OTCD的相关对比

风速 (m/s)	相当于温 度的降低	舒适感觉
0.1	0	静风，有稍微不舒适感觉
0.5	2	可轻微感觉的风， 且感觉舒适
1	3.5	可感觉的舒适的风
2	5	强烈感觉，在活动量打的情 况下可以接受
2.3	6	空气调节速度上限，干热气 候下自然通风的良好风速
4.5	7	湿热气候下自然通风的良好 风速
10	9	室外活动下可感觉的威风

对表1^[8]分析可看出，室外的自然空气流动，对人体的热感觉也会起到有效的影响。因为，空气的流动能加强人体与空气的对流换热，从而影响着人体的排汗散热效率。另外，在炎热的夏天，适当的风速还能提高精神神经的兴奋性，令人心情愉快。

综上所述，室外热环境的改变可以影响人身体与外界的热量交换和自身的新陈代谢水平，从而影响人体的热舒适。这是一个基本的反应激励过程，Fanger的热舒适方程和尼西、盖奇的二节点模型，都是基于此而建立的人体热舒适模型。

人体的热舒适除了受自然气候条件的直接影响外，还受到其他非自然气候的影响，即人的主观反应。其大体可分为2类：生理因素和心理调节。

1.2 生理因素

人体对热环境的生理适应性主要表现在年龄、性别、种族，体温调节、出汗机能、水盐代谢、心血管系统功能的适应性变化等方面：

(1) 年龄

随着年龄的增长，人自身的新陈代谢也下降。身体表面的汗蒸发率也在下降。因此，年龄对于热适应性的影响较小。

(2) 性别

女性在各阶段的新陈代谢小于同阶段的男性。研究表明，女性的皮肤温度比男性约低0.2℃。通过调查问卷也可总结出，男性较之女性更容易适应不同的热环境状态。

(3) 种族

不同地区的人经过长期的对当地气候的适应，他们的身体特征，文化传统和生活习惯便产生了差异，因此，对热舒适的要求也会不同。一般来说，寒冷地带的人更耐寒一些，而在热带居住的人则通常较其他地区的人更容易耐热。在同一种族之间，个体的差异也会影响对于热舒适的判断。

(4) 体温调节^[9]

在热环境中从事体力劳动，人体热负荷增加，体温升高，体温调定点相应上移，体温调节功能增强。基础和劳动代谢率降低，产热减少，散热能力增强，这是机体热适应后耐受热环境的一个保护性机制，减轻了热应激时体温调节机能的紧张程度。

(5) 出汗机能

随着热适应的进展，机体出汗机能增强，出汗体温降低。热适应者出汗的潜伏期缩短，出汗速度增加，同一体温的出汗率可增加20%~40%以上，并长期维持较高的出汗率。

(6) 水盐代谢

机体热适应后，血容量显著增高，热适应过程中机体饮水增加，主要表现为饮水次数和饮水量的增加。机体热适应后，氯化钠的丢失量可降低到3 g·d⁻¹~5 g·d⁻¹，热适应后期，机体保钾能力提高，防止了低血钾的发生。

(7) 心血管系统

热适应后，从整体上减轻了心脏负荷，最突出的是心血管系统紧张性和适应性的改善，心率下降，心输出量增加，这与体温尤其是皮肤温度的下降，外周静脉收缩维持了心室的充盈和压力有关。

1.3 心理调节适应

当实际热环境状态和人们对热环境所期望的状态相符时人们就会对该环境感到满意。因此，生活在不同环境中的人们的期望热环境也会有所不同。在实测调查中直接显示心理适应对热舒适性的影响是较困难的，但环境可控性的大小同心理上的适应相关联。

ASHRAE RP-884 通过测试自然通风和集中空调建筑的热环境,发现自然通风建筑要比集中空调建筑的可接受温度范围宽出 70% 左右。从而证明,对环境具有高度控制能力的人体对不同温度有更广泛的适应性^[10]。Fishlnan 和 Pimberts 对欧洲一所办公大楼内的 26 名人员进行长期的研究,其中的 7 名在有空调的环境中工作,其余的在自然通风的环境中。调查的样本数目不是很多,但当环境温度在 24℃ 以上时,这两群人的热感觉不同,按照 ASHRAE 七点尺度进行的热感觉投票,在 HVAC 中的要比 NV 中的高。这一点说明, HVAC 中的人对高温环境的忍耐力较弱,更加期望均一、稳定的热环境^[11]。

人体对周围环境的热舒适感觉是一个非常复杂的过程。人体与周围环境不仅存在客观的热量传递过程,而且还存在人的主观意识作用和客观生理调节调整过程。在对人体热舒适环境的研究中,既要体现出环境的客观评价,如对空气温度、黑球温度、湿度和风速等的评价,也应体现人对周围环境的主观评价。将二者相结合,量化才能客观公正的得出人体对环境的要求的结论。但是对于两者之间对热舒适的影响权重还有待深层次的研究。

2 户外热环境热舒适的评价方法

对室外热舒适问题研究的方法大致有三种:

一是:从人与环境的热量交换与平衡出发,研究人与环境之间的热交换情况,如丹麦 Fanger 教授的热舒适方程以及美国 Gagge 教授的“两节点模型”。

二是:利用计算机模拟软件模拟,研究不同边界条件下的热舒适状况,然后与实测相结合,验证模拟结果,如国内钱炜、唐鸣放的户外热舒适度模型 OTCD (Outdoor Thermal Comfortable Degree),森川明夫等(1986)认为户外热环境的综合热指标宜采用湿球黑球温度指标 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)^[12],董靓选择湿球黑球温度 WBGT 作为城市街谷热环境的综合指标。

三是:采用主观问卷和测试的方法,直接获取人们对不同环境主观热感觉反应,然后用数学的综合统计分析,建立经验回归方程。

当然这三种方法并不是孤立的,并且都有各自的特点,所以很多学者在研究中都综合了不同的方法。

2.1 热环境评价标准

评价热环境的标准一般可分为三类,即:安全标准、舒适标准和工效标准。

(1) 安全标准:不影响人的身体健康;人的热调节系统不失调;人体生理机制不损失或死亡。

(2) 舒适标准:冷热适度,热感觉舒适。在此区域内,人体调节机能的应变最小。

(3) 工效标准:环境热状况影响人的敏感度从而影响人从事体力劳动和脑力劳动的效率。

三类标准不一定同心,如舒适标准与工效标准不一定一致,但在任何情况下其他标准均应在安全标准范围内,即符合安全优先原则。有些学者曾用 WBGT 作为评价户外热环境的综合指标。但是 WBGT 指标是当初美军户外军事训练中为防止热损伤事故而提出的,因此它是一种安全性指标。人们的户外活动有不同的目的,活动时间也有长短,因此仅有安全性指标是不够的,更多的时候人们需要的是热舒适性指标。

2.2 热环境评价指标

(1) 户外热环境的安全性评价指标

安全指标,即热应力指标,其是确保人体在高热环境下不受到热损伤的一种安全技术指标,最著名的是湿黑球温度 WBGT,据 ISO 7243, WBGT 的定义为:

① $WBGT = 0.7T_{nwb} + 0.2T_g + 0.1T_a$ (有直接日射)。

② $WBGT = 0.7T_{nwb} + 0.3T_g$ (无直接日射)。
式中: T_{nwb} 为自然湿球温度 (°C); T_g 为黑球温度 (°C); T_a 为空气温度 (°C)。

自然湿球温度和黑球温度是复合环境参数,为了使用方便, WBGT 也能用空气温度、湿度、气流速度以及环境热辐射的关联式表示如下:

$$WBGT = (0.8288T_a + 0.0613T_r + 7.3771 \times 10^{-3}G + 13.8297 \Phi - 8.7284) V^{-0.0551}$$

式中: T_a 为空气温度, °C; T_r 为平均辐射温度, °C; G 为太阳辐射强度, W/m^2 。在室内 $G=0$; Φ 为空气相对湿度, %; V 为风速, m/s 。

WBGT 是纯环境因素指标,它与个人主观因素的关系已经建立,即假设人体身着夏装在不同的活动状态推荐有不同的 WBGT 安全极限值。例如在休闲状态,人体的新陈代谢率 $M < 117$,此时对人

表2 ISO7243 推荐的 WBGT 阈值 (Reference values of WBGT from ISO 7243)

新陈代谢水平	新陈代谢率 M/W·m ²	WBGT 阈值/℃			
		热适应性好的人		热适应性差的人	
0	M<117	33		32.4	
1	117<M<234	30		29	
2	234<M<360	28		26	
		感觉不到 空气流动	感觉到 空气流动	感觉不到 空气流动	感觉到 空气流动
3	360<M<468	25	26	22	23
4	M>468	23	25	18	20

体安全的最高值 WBGT 为 32℃~33℃，当环境的 WBGT 值较长时间的超过该值，应当采取安全保护措施避免人体受到热损伤。WBGT 阈值见表 2。

(2) 基于 PMV 的户外热舒适指标

由于 WBGT 指标不能完全用于评价室外热环境的舒适度，因此有学者^[13]提出以 PMV 为基础的户外热环境舒适性评价指标。

把室内热舒适指标 PMV 拓展到户外就可建立户外热环境的舒适指标，在 PMV 中增加太阳辐射的影响。为了便于参数测量，选择空气温度 T_a 、湿度 ϕ 、风速 v 、黑球温度 T_g 作为环境因素，并从夏季人体舒适的角度考虑，取人们典型的衣着 $I_{clo}=0.5$ (clo) 和休闲状态 $M = 80 \text{ W/m}^2$ 。向 PMV 回归，得出下面的舒适当量温度 OTCD (Outdoor Thermal Comfort Degree)：

当 $V>1$ 时：

$$\begin{aligned} \text{OTCD} = & [T_g + 1.45 (\Phi - 0.3) - 0.075 (T_a - 25)] \\ & [1 + 0.00065 (T_a - 25)] V^{0.227} + 26.76 \\ & - 26.79 V^{0.249} + (0.6 - 0.08 V^{1.496}) \\ & \times (T_a - 25) / 5 - (0.1 V^{1.088} - 0.4) \\ & \times (\Phi - 0.3) / 0.7 + (1.93 \Phi^{1.97} - 0.5) \times (T_a - 25) / 15 \end{aligned}$$

当 $0.3 \leq V \leq 1$ 时：

$$\begin{aligned} \text{OTCD} = & 0.768 [1.393 V^{0.22} (T_a / 100)^{0.0557} \\ & (T_g + 2.45 \Phi - 0.735) - 34.53 V^{0.253} \\ & + 0.061 T_a - 0.13 T_a \Phi + 3.55 V \\ & - 4.629 \Phi - \Phi V + 0.2 \Phi T_a] + 25.61 \end{aligned}$$

当 $0 < V < 0.3$ 时：

$$\begin{aligned} \text{OTCD} = & 0.720 [T_g + 2.6 (\Phi - 0.3)] \\ & (T_a / 10)^{-0.0617} (10 V)^{0.12} - 24.24 V^{0.17} \\ & + 0.26 \Phi^{0.476} (T_a - 25) + 26.714 \end{aligned}$$

式中 T_g ：25℃~60℃； T_a ：25℃~40℃； Φ ：0.3~1.0； V ：0.1~4.9 m/s。

取一组数据对 OTCD 进行验证。(其中：相对湿度取定值：64%，由于黑球温度一般比空气温度高 0℃~3℃，所以本文取 1.5℃)。对照表见表 3。

表3 OTCD 与 PMV 的舒适度范围对照表

指标	感觉舒适	感觉稍热	感觉热	感觉太热
PMV	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0
OTCD	26.8~28.4	28.4~30.0	30.0~33.0	33.0~36.0

上式中的 OTCD 与 PMV，在 PMV 为 0.0~3.0 的范围内，两者总相关系数 $R=0.9997$ 。

不同环境下的 OTCD 值见图 1 和表 4。

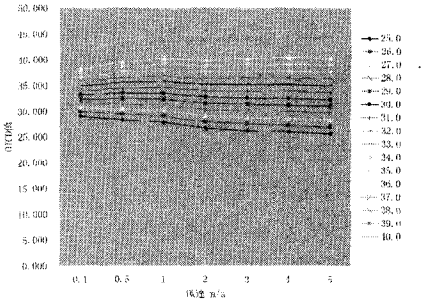


图1 不同环境条件下的 OTCD 值

从图 1 可以看出：

当 $25.0^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 29.0^{\circ}\text{C}$ 时，OTCD 值随着风速的增加而降低，并且在风速为 1 m/s ~2 m/s，降得较为明显。说明风速在 1 m/s~2 m/s 时对户外热舒适的影响较为显著。

当 $29.0^{\circ}\text{C} < T_a \leq 36.0^{\circ}\text{C}$ 时，OTCD 值随着风速的增加先增加后降低，最后趋向于平稳，说明在这个温度范围内，提高风速，对户外热环境舒适性影响不大。

当 $36.0^{\circ}\text{C} < T_a \leq 40.0^{\circ}\text{C}$ 时，OTCD 值随着风速的增加而逐渐增加。说明温度很高时，即超过了人体的温度，吹风只能增加大气对身体的加热，而不是身体向环境散热。

表 4 不同环境条件下的 OTCD 值

Ta	Tg	V						
		0.1	0.5	1	2	3	4	5
25.0	26.5	28.958	28.269	27.805	26.607	26.213	25.876	25.576
26.0	27.5	29.802	29.285	28.924	27.806	27.481	27.181	26.897
27.0	28.5	30.645	30.303	30.045	29.006	28.750	28.488	28.220
28.0	29.5	31.486	31.323	31.168	30.207	30.021	29.796	29.545
29.0	30.5	32.326	32.344	32.294	31.410	31.293	31.105	30.872
30.0	31.5	33.165	33.367	33.421	32.615	32.567	32.417	32.200
31.0	32.5	34.003	34.391	34.549	33.821	33.842	33.730	33.530
32.0	33.5	34.839	35.417	35.680	35.028	35.119	35.044	34.862
33.0	34.5	35.675	36.445	36.812	36.237	36.397	36.360	36.196
34.0	35.5	36.509	37.474	37.946	37.447	37.677	37.678	37.531
35.0	36.5	37.342	38.504	39.082	38.658	38.959	38.998	38.868
36.0	37.5	38.175	39.536	40.219	39.871	40.242	40.319	40.207
37.0	38.5	39.006	40.569	41.358	41.085	41.526	41.642	41.547
38.0	39.5	39.836	41.603	42.498	42.301	42.812	42.967	42.889
39.0	40.5	40.666	42.639	43.640	43.518	44.100	44.293	44.233
40.0	41.5	41.494	43.676	44.783	44.737	45.389	45.620	45.579

注：表中斜体字部分表示舒适区域。

OTCD是把PMV理论扩展到室外而得到的,在假设人的着装和活动水平相同下,计算夏季的热舒适的经验值区间。但在进行室外热舒适评价时,采用与PMV一一对应的方法是值得商榷的,这是因为不少现场实验研究均已发现在许多PMV远远超出+3.0的环境条件下,室外环境的舒适度依然可以接受,而且此时不完全是心理作用或对环境的期望导致的结果。再者,PMV指标是基于在有采暖和空调设备的人工调节房间内坐着工作的状态下而得到的,但在高新陈代谢率和服装热阻值较大时,其结果不能完全说明问题。

3 总结

分析了城市户外热环境的影响因素,提出人对环境的客观和主观评价对热舒适的影响以及有待深入的研究的问题。分析了室外热舒适的评价指标,并指出了各种评价指标的特点和不足,为户外热舒适指标的建立提供了参考。

参考文献

[1] Jan Rotmans, Marjolein van Asselt, pier Vellinga. An Integrated planning Tool for sustainable cities[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000

[2] Marialena Nikolopoulou, Koen Steemers. Thermal comfort

and Psychological adaptation as a guide for design urban spaces[J]. Buildings and Energy, 2003

[3] Ingegard eliasson. The use of climate knowledge in urban planning[J]. Landscape and Urban planning,2000

[4] Khandaker Shabbir Ahmed. Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments[J]. Energy and Buildings, 2003

[5] Max Sherman. A Simplified Model of Thermal Comfort[J]. Energy and Buildings, 1985

[6] Elke Mertens. Bioclimate and city planning-open space planning[J]. Atmospheric Environment, 1999

[7] 唐鸣放, 钱炜. 太阳辐射影响下的城市户外热环境评价指标[J]. 太阳能学报, 2003

[8] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安建筑科技大学博士学位论文, 2003

[9] [日]黑岛晨讯. 环境生理学[M]. 北京: 海洋出版社, 1986

[10] Jitkhajornwanich.K. Thermal comfort in transitional spaces in the cool season of Bangkok[J].ASHRAE Trans, 1998

[11] Fishman.D.S. The thermal environment in offices[J].Energy and Buildings,1982,Vol.5,No 2

[12] 森川明夫,石井昭夫,片山忠久.建筑外部空间热环境形成,相关调查研究[R].日本建筑学会九州支部研究报告,1986

[13] 钱炜,唐鸣放.城市户外环境热舒适度评价模型[J].西安建筑科技大学学报, 2001