

蔡子颖, 韩素芹, 张长春, 等. 室外热环境指标的简化计算和应用研究[J]. 气象, 2011, 37(6): 701-706.

室外热环境指标的简化计算和应用研究^{*}

蔡子颖 韩素芹 张长春 姚 青 黄 鹤

天津市气象科学研究所, 天津 300074

提 要: 利用天津市边界层观测站 2008 年 5—9 月、2009 年 5—7 月温度、湿度、风速、湿球黑球温度(WBGT)和太阳辐射资料作相关性分析, 结果表明: 干球温度、相对湿度、太阳辐射、风速与湿球黑球温度具有一定的线性相关度。结合 Rayman 模型计算平均辐射温度, 建立了以云、大气温度、相对湿度、风作为预报因子的湿球黑球温度统计方程。利用气象预报因子和 WBGT 统计方程, 并结合 GB/T 17244-1998 和 ISO 7243 标准体系, 给出未来 6 小时劳动休息时间安排建议。结果表明 WBGT 计算方法实用可行, 其预报产品可以减轻高温室外劳动对人体的伤害, 对未来短时间内劳动日程的安排, 有较好的指导作用。

关键词: 湿球黑球温度, 平均辐射温度, 劳动时间, Rayman 模型, 预报因子

Simplified Method to Calculate Outer Thermal Environment Index and Its Application

CAI Ziyang HAN Suqin ZHANG Changchun YAO Qing HUANG He

Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074

Abstract: By using temperature, humidity, wind speed, wet bulb globe temperature (WBGT), and solar radiation data during May to September 2008 and May to July 2009 obtained from Tianjin boundary layer observation stations, through correlation analysis and multiple regression, a WBGT simplified calculation method is established. At the same time, by using Rayman model, based on the cloud cover the average radiation temperature is calculated, achieving the weather forecasting factors, combining with GB/T 17244-1998 and ISO 7243 standard systems, further using WBGT forecast products and giving a proposal about labor time arrangements in the next 6 hours, so as to reduce the injury from high temperature outdoor working. The results show that, the WBGT is highly related with dry-bulb temperature and solar radiation. Based on conventional meteorological data and average radiation temperature, the WBGT simplified calculation methods are practical and feasible. If the WBGT prediction products are applied to the future work schedule arrangements, there will be a better guide effect.

Key words: wet bulb globe temperature (WBGT), average radiation temperature, labor time, Rayman model, forecasting factor

引 言

室外热环境是指作用在建筑外围护结构上的一切热物理量总称, 在相同气温下, 人们感觉到的舒适程度千差万别^[1-2]。随着生活水平的提高, 人们开始

关注未来天气条件下人体舒适度、人体从事劳动的适宜强度以及注意事项^[3-9]。在室外的热环境研究中, 湿球黑球温度(T_{WBGT})作为一种纯物理的简单热应力指标, 积累了丰富的经验, 并且作为美国职业安全与健康的选定指标, 在国际上被选入 ISO7243 标准体系认证, 其相比一般的舒适度指标, 不仅与干球

^{*} 天津市科技发展计划项目(09ZCGYSF02400)和天津市气象局科研课题(201003)共同资助

2010 年 5 月 12 日收稿; 2010 年 12 月 20 日收修定稿

第一作者: 蔡子颖, 主要从事环境气象研究. Email: 120078030@163.com

温度和湿度、风有直接关系,还与太阳辐射有密切的联系,更加准确地体现户外人体的热应力情况^[10-12]。同时,作为国际上通行的职业安全健康指标,在长期研究后形成了规范的体系标准,在已知 T_{WBG} 的基础上,可准确给出适合不同行业(室外活动)劳动者的最佳劳动休息比。在目前的研究中, T_{WBG} 被广泛应用于建筑、劳动安全健康、热环境评估等领域,而利用常规气象资料计算 T_{WBG} 的研究,已被国内外学者开展,但将其作为预报产品,指导室外劳动安排的研究却显见报道。Andreas Matzarakis 等 2007 年开发的 Rayman 模型以及平均辐射温度参数化方案^[13]为 T_{WBG} 的预报提供了可能,本文首先通过太阳辐射、大气温度、相对湿度、风、平均辐射温度建立湿球黑球温度简化计算方程,接着通过引入和消化 Rayman 模型、GB/T 17244-1998 和 ISO 7243 标准体系,建立以云、大气温度、相对湿度、风作为预报因子的 T_{WBG} 产品预报和服务流程,最终增强和提高我国环境气象服务能力。

1 资料和方法

1.1 资料说明

选取天津市边界层观测站内 2008 年 5—10 月、2009 年 5—7 月观测资料:包括逐时湿度、风、辐射资料(短波辐射以及短波反射辐射)、每日 3 次的云量, T_{WBG} 资料包括 3 个部分,干球温度、湿球温度、黑球温度,通过公式(1)求解湿球黑球温度^[9]。

$$T_{\text{WBG}} = 0.7T_s + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1)$$

式中 T_s 为湿球温度, T_g 为黑球温度, T_a 为干球温度。

1.2 模式和方法介绍

1.2.1 Rayman 模型

Rayman 模型是 Andreas Matzarakiskai 开发的热环境评估模型,模型以云、风、大气温度、相对湿度、水汽压等为输入因子,通过求解人体热量平衡方程,获取 T_{PE} (人体生理等效温度)、PMV(预计冷热感指标)、 T_{SE} (标准有效温度)等热环境评价因子。模型中平均辐射温度可以基于云量或太阳辐射观测资料进行计算^[14]。

1.2.2 基于太阳辐射计算平均辐射温度

平均辐射温度(T_{mrt})为发射黑体辐射($\epsilon=1$)的环境表面均一温度,该黑体环境与人体的辐射热交

换和真实环境一致,其值取决于环境中长、短波辐射^[15]。实际测量可选择来自东、南、西、北和上、下的长、短波辐射计算,本文采用 Andreas Matzarakis 的参数方案,对其进行求解,具体如下:

当仅有太阳短波总辐射时:

$$T_{\text{mrt}} = \left[\frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n (E_i + a_k \frac{D_i}{\epsilon_p}) F_i \right]^{0.25} \quad (2)$$

式中 a_k 为短波吸收系数; σ 为 Stefan-Boltzman 常数, F_i 为权重系数。 ϵ_p 为人体发射系数, D_i 为散射和反射辐射之和, $E_i = \epsilon_p \sigma T_{\text{si}}^4$ 。

当有直接太阳辐射照射时:

$$T_{\text{mrt}}' = \left[T_{\text{mrt}}^4 + f_p a_k \frac{I^*}{\epsilon_p \sigma} \right]^{0.25} \quad (3)$$

式中 I^* 垂直于入射方向的太阳辐射强度, f_p 为表面反射率(是入射方向和身体姿态的函数)。

1.2.3 基于云量计算平均辐射温度

缺乏辐射资料时可以用云量计算平均辐射温度,误差约在 20% 左右,其中太阳高度角(h_{sl}):(4)~(9)估算:

当 $h_{\text{sl}} \leq 4^\circ$ 时,

$$R_{\text{prim}} = 1.4(1.388 - 0.215h_{\text{sl}})^2(1 - 0.01a_c) \quad (4)$$

当 $h_{\text{sl}} > 4^\circ, N \leq 4\%$ 时,

$$R_{\text{prim}} = 1.4(-100.428 + 73.981 \ln h_{\text{sl}})(1 - 0.01a_c) \quad (5)$$

当 $h_{\text{sl}} > 4^\circ, 20\% < N \leq 50\%$ 时,

$$R_{\text{prim}} = 1.4e^{(5.383 - 16.072/h_{\text{sl}})}(1 - 0.01a_c) \quad (6)$$

当 $h_{\text{sl}} > 4^\circ, 51\% < N \leq 80\%$ 时,

$$R_{\text{prim}} = 1.4e^{(5.012 - 11.805/h_{\text{sl}})}(1 - 0.01a_c) \quad (7)$$

当 $h_{\text{sl}} > 4^\circ, N > 80\%$ 时,

$$R_{\text{prim}} = 0.9506h_{\text{sl}}^{1.039}(1 - 0.01a_c) \quad (8)$$

式中 a_c 为皮肤、服装的反射率,一般取 31%, N 为云量, R_{prim} 为中间量,计算出 R_{prim} 后,可计算平均辐射温度:

$$T_{\text{mrt}}^* = \left[\frac{R_{\text{prim}}}{5.39 \times 10^{-8}} + (273 + t)^4 \right]^{0.25} - 273.15 \quad (9)$$

2 结果分析

2.1 基于常规气象要素 T_{WBG} 的简化算法

图 1 表明干球温度、相对湿度、太阳辐射、风速与 T_{WBG} 指标的相关关系,其中粗线是回归线,回归线两侧的细线是总体均数 90% 的可信区间。图 1

表明: T_{WBG} 与干球温度相关性最好,太阳辐射次之,均呈正相关,相对湿度与 T_{WBG} 呈负相关,做偏相关分析,排除相对湿度和干球温度之间的关系,相对湿度与 T_{WBG} 也呈正相关,而风速与 T_{WBG} 的相关性则较差,呈现弱的正相关性。在了解 4 个参量与 T_{WBG} 指标关系的基础上,运用最小二乘法建立 4 个参量与 T_{WBG} 的多元回归方程,得式(10):

$$T_{\text{WBG}} = 1.0031T_a + 0.021RH - 0.083V + 0.002SR - 2.822$$

(10)

式中 RH 为相对湿度, V 为风速, SR 为太阳短波辐射。

表 1 和表 2 给出公式(10)的统计信息和检验结果,由表显示该方程的决定系数为 0.757, F 值为 4033.755,通过显著性水平检验($P<0.01$),而干球温度、太阳辐射、相对湿度均通过 t 检验,显示回归方程取得不错的拟合效果。在标准化方程中,显示干球温度是 T_{WBG} 变化最主要的原因,而风速对 T_{WBG} 影响较小,风速变化 1%时, T_{WBG} 仅变化 0.013%。

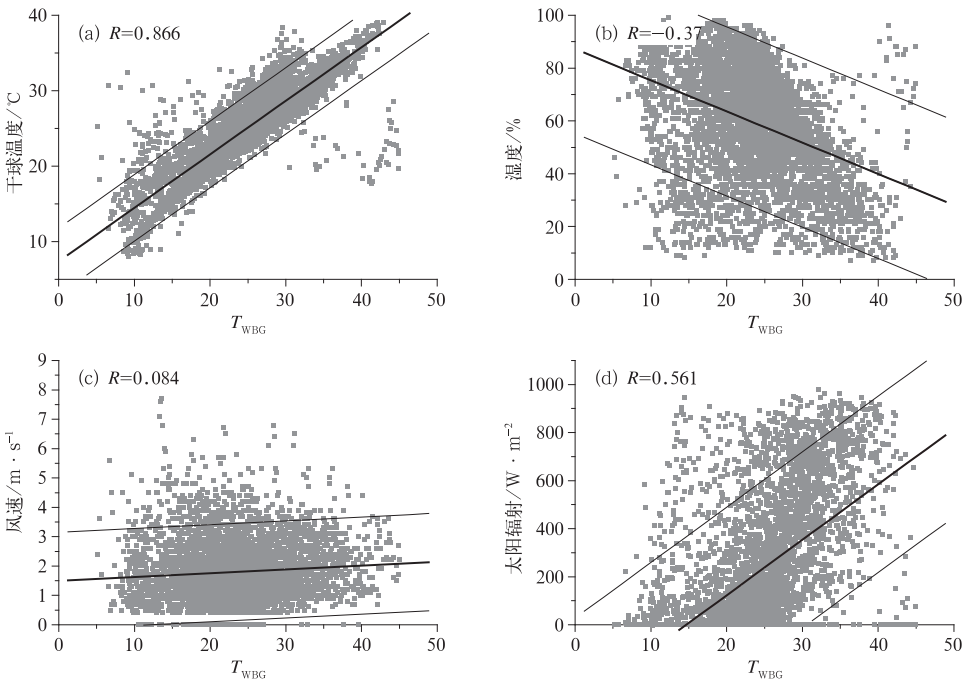


图 1 干球温度(a)、湿球(b)、风速(c)、太阳辐射(d)与 T_{WBG} 的关系
Fig. 1 The relation of (a) dry bulb temperature, (b) wet bulb temperature, (c) wind speed, and (d) solar radiation with T_{WBG}

表 1 基于常规气象要素回归模型的统计信息

Table 1 Regression model of statistical information based on the conventional meteorological elements				
负相关系数	决定系数	校正的决定系数	剩余标准差	F 值
0.870	0.757	0.756	3.233	4033.755

表 2 基于常规气象要素回归系数及其假设检验

	非标准化		标准化系数	t	P
	系数	标准差	β		
常数项	-2.822	0.358		-7.880	0.000
干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	1.031	0.011	0.844	94.412	0.000
太阳辐射/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	0.002	0.000	0.091	9.987	0.000
相对湿度/ $\%$	0.021	0.003	0.066	8.038	0.000
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.083	0.048	-0.013	-1.755	0.079

2.2 基于平均辐射温度的 T_{WBG} 简化算法

在建立常规气要素计算 T_{WBG} 的简化计算方程基

础上,引入平均辐射温度(T_{mrt})建立回归方程如下:

$$T_{\text{WBG}} = 0.987T_a + 0.019RH - 0.077V + 0.044T_{\text{mrt}} - 2.316$$

(11)

式中 RH 为相对湿度, V 为风速, T_{mrt} 为平均辐射温度, T_a 为干球温度。

表 3 和表 4 给出公式(11)的统计信息和检验结果,由表显示该方程的决定系数为 0.756, F 值为 4026.732,通过显著性水平检验 ($P<0.01$),回归方

程取得不错的拟合效果。公式(11)中平均辐射温度由 Rayman 模型[公式(2)、公式(3)]求得,模型的输入参数为太阳短波辐射、大气温度、相对湿度、风速和地面反射率,其中地面反射率(α)根据天津边界层观测站 2009 年的观测结果,设定 $\alpha=0.17$ (如图 2)。

表 3 基于平均辐射温度回归模型的统计信息

Table 3 Statistical information based on regression model of average radiation temperature

负相关系数	决定系数	校正的决定系数	剩余标准差	F 值
0.870	0.756	0.756	3.235	4026.732

表 4 基于平均辐射温度回归系数及其假设检验

Table 4 Regression coefficient and hypothesis testing based on average radiation temperature

	非标准化		标准化系数	t	P
	系数	标准差	β		
常数项	-2.316	0.373		-6.210	0.000
干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.987	0.014	0.808	70.736	0.000
$T_{\text{mrt}}/^{\circ}\text{C}$	0.044	0.005	0.111	9.632	0.000
相对湿度/%	0.019	0.003	0.060	7.341	0.000
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.077	0.048	-0.012	-1.629	0.103

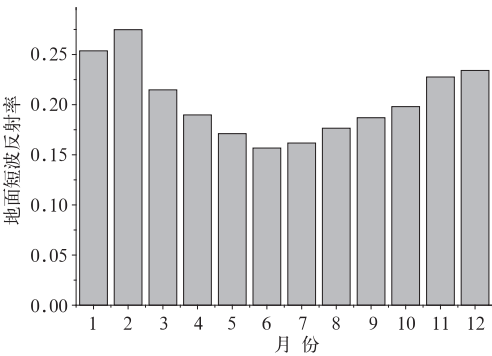


图 2 天津地区 2009 年地面反射率逐月变化

Fig. 2 Monthly variation of ground reflectivity in Tianjin during 2009

为配合预报因子选择的需要,分别基于总云量和地面太阳短波辐射计算平均辐射温度,由图 3 显示,两者的计算结果有较好的一致性($R^2=0.754$),但整体均值基于总云量估算的 T_{mrt}^* 偏高,通过线性方程修正(图 3)

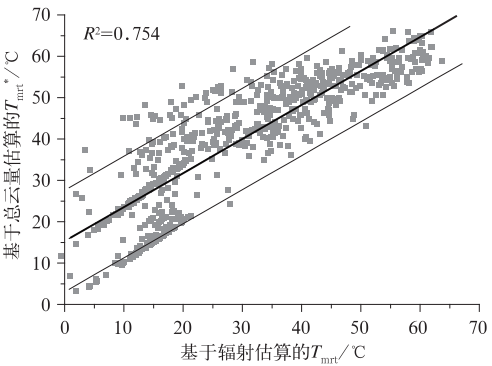


图 3 基于辐射估算 T_{mrt} 与云量估算 T_{mrt}^* 的相互关系

Fig. 3 The relationship between T_{mrt} based on radiation and T_{mrt}^* based on cloud estimation

$$T_{\text{mrt}} = T_{\text{mrt}}^* \quad (\text{夜间}, N \leqslant 5)$$
$$T_{\text{mrt}} = 1.035 T_{\text{mrt}}^* - 13.425 \quad (\text{其他})$$

(12)

式中 T_{mrt}^* 为基于云量观测估算的平均辐射温度, N 为总云量,公式(12)选取 2008 年观测作为样本建立方程,2009 年观测进行检验修正。基于修正方程计算的 T_{mrt} 相对误差由 45%下降到 17.9%,基本满足需要。

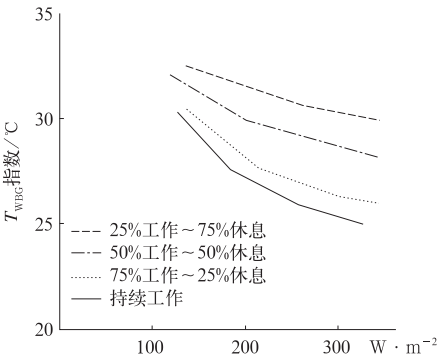


图 4 各种劳动/休息时间的 T_{WBG} 参考曲线

Fig. 4 Reference curves about sorts of labor/rest time T_{WBG}

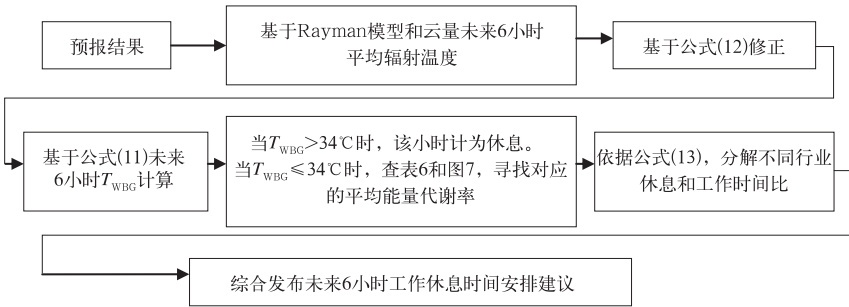


图 5 T_{WBG} 产品预报和运用流程

Fig. 5 T_{WBG} product forecast and operation process

3 讨 论

通过对 T_{WBG} 的预测可以指导未来时段不同行业(室外)劳动强度的安排(图 4,图 5),并将 2009 年 7 月 23 日作为预报个例进行说明。

$$\begin{aligned} \eta \times 60 &= \eta^* t + 32.5(60 - t) \\ p &= t/(60 - t) \end{aligned} \tag{13}$$

式中 η 为该小时 T_{WBG} 所对应热应力感觉的平均代谢率(表 5), η^* 为从事行业的平均能量代谢率, t 为劳动时间,单位为分钟, p 为劳动休息时间比。

根据短时预报结果(表 6),表 7 给出 T_{WBG} 预报结果及运用,针对不同用户,可以设定不同的劳动强度和代谢水平,根据公式(13)以及表 5 和图 6 进行计算,给出未来 6 小时室外工作安排建议,合理安排

工作时间和工作量,避免高温条件下,室外工作给人体带来的伤害。

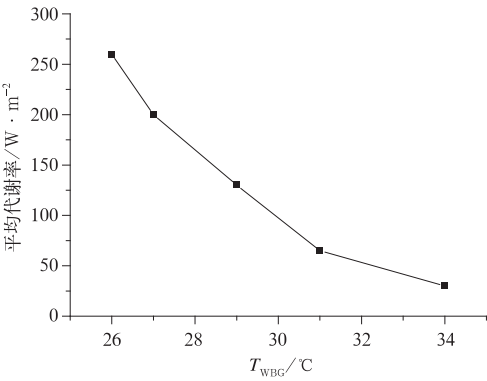


图 6 T_{WBG} 和平均代谢率关系图
 T_{WBG} 评价指标选择中

Fig. 6 The relation of T_{WBG} and average metabolism rate

表 5 能量代谢率分级^[17]

Table 5 The classification of energy metabolism rate

级别	平均能量代谢率 $M/W \cdot m^{-2}$		示例
	范围	均值	
0 休息	$M \leq 65$	32.5	休息
1 低代谢率	$65 < M \leq 130$	97.5	坐姿:轻手工作业(书写、打字、绘画、缝纫。簿记、记帐)手和臂的劳动(小修理工具、材料的检验、组装或分类),臂和腿的劳动(正常情况下,驾驶车辆脚踏开关或踏脚) 立姿:钻孔(小型),碾磨机(小件),绕线圈,小功率工具加工,闲步(速度为 $3.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下)
2 中代谢率	$130 < M \leq 200$	165	手和臂持续动作(敲钉子或填充),臂和腿的工作(卡车、拖拉机或建筑设备等非运输操作),臂和躯干的工作(风动工具操作,拖拉机装配、粉刷、间断搬运中等重物、除草、锄田,摘水果和蔬菜):推或拉轻型独轮或双轮小车,以 $3.5 \sim 5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度行走,锻造
3 高代谢率	$200 < M \leq 260$	230	臂和躯干负荷工作,搬重物、铲、锤锻、锯刨或凿硬木,割草、挖掘、以 $5.5 \sim 7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度行走,推或拉重型独轮或双轮车,清砂、安装混凝土板块
4 极高代谢率	$M > 260$	记 280	快到极限节律的极强活动,劈砍工作,大强度的挖掘,爬梯、小步急行、奔跑、行走速度超过 $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

表 6 天津市区 2009 年 7 月 23 日短时预报结果
Table 6 Short-term forecasting results inTianjin on July 23 2009

时间	发报时间	开始时间	结束时间	最低温度/℃	最高温度/℃	相对湿度/%	云量	风速
7 月 23 日	08	08	11	23	26	70	晴间多云	2~3 级
7 月 23 日	08	11	14	25	29	50	晴间多云	2~3 级
7 月 23 日	11	11	14	30	33	60	晴	2~3 级
7 月 23 日	11	14	17	33	35	50	晴	2~3 级

表 7 2009 年 7 月 23 日 T_{WBG} 部分预报结果和建议
Table 7 The forecast results and suggestions for the 23 July 2009 case

时间	发报时间	T_{WBG}	劳动强度	劳动时间占全部 时间比例建议	备注
08—11	08	23~26.5	建筑工人(高代谢率)	100%	
11—14	08	26.5~29.1	建筑工人(高代谢率)	74%	
11—14	11	30.6~33.6	建筑工人(高代谢率)	11%	
14—17	11	32.7~35.35	建筑工人(高代谢率)	1.878%	14—16 时建议不要从事室外劳动
08—11	08	23~26.5	交警(中代谢率)	100%	
11—14	08	26.5~29.1	交警(中代谢率)	91.84%	
11—14	11	30.6~33.6	交警(中代谢率)	16.59%	
14—17	11	32.7~35.35	交警(中代谢率)	2.8%	14—16 时建议不要从事室外劳动
08—11	08	23~26.5	行人(低代谢率)	100%	
11—14	08	26.5~29.1	行人(低代谢率)	100%	
11—14	11	30.6~33.6	行人(低代谢率)	33.8%	
14—17	11	32.7~35.35	行人(低代谢率)	5.7%	14—16 时建议不要从事室外劳动

4 结 语

(1) 通过 T_{WBG} 与温度、相对湿度、太阳辐射、风速、平均辐射温度的相关关系,分别建立基于常规气象要素和基于平均辐射温度的 T_{WBG} 指标简化计算方法。

(2) 通过 Andreas Matzarakis 的方案和 Ray-Man 模型,将云量因子引入 T_{WBG} 回归方程中,实现平均辐射温度的简化计算,建立其与气象预报因子匹配的预报方案。

(3) 根据 GB/T 17244-1998 和 ISO 7243 标准体系,将 T_{WBG} 预报产品运用于环境气象预报,给出未来 6 小时室外工作安排建议,避免高温条件下室外工作给人体带来的伤害。

参考文献

[1] 吴兑.多种人体舒适度预报公式讨论[J].气象科技,2003,12(31):370-372.

[2] 黄海霞,李建龙,黄良美.南京市小气候日变化规律及其对人体舒适度的影响[J].生态学杂志,2008,27(4):601-606.

[3] 谈建国,邵德民,马雷鸣,等.人体热量平衡模型及其在人体舒适度预报中的应用[J].南京气象学院学报,2001,24(3):384-390.

[4] 张书余.城市环境气象预报技术[M].北京:气象出版社,

2006:119-148.

[5] 吴结晶,李瑞光,穆美舒,等.青岛市区夏季暑热指数指数初探[J].气象,2000,(4):33-36.

[6] 陈莉,李帅,周永吉,等.用标准有效温度和不舒适指标研究哈尔滨热舒适状况[J].气象,2008,34(1):73-79.

[7] 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,2004,30(10):7-11.

[8] 李风云,杨玉霞.体感温度预报方法的改进[J].气象,2002,28(4):10-11.

[9] 李兴荣,张小丽,隋高林,等.深圳夏季典型晴天不同小气候区温湿及舒适度特征[J].气象,2010,36(10):62-66.

[10] 张磊,孟庆林,赵立华,等.室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算方法[J].重庆建筑大学学报,2008,30(5):108-117.

[11] 钱炜,唐放鸣.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,2001.33(3):229-232.

[12] 林波荣.绿化对室外热环境影响的研究[M].北京:清华大学出版社,2004:106-127.

[13] Andreas M, Frank R, Helmunt M. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of Ray-man model[J]. Int J Biometeorol,2007,51:323-334.

[14] Andreas M, Frank R. Application of Rayman for tourism and climate investigations[J]. Annalen der Meteorologie, 2007, 41(2):631-636.

[15] 余永江.基于人体与环境热平衡模型的中暑等级预报[D].南京:南京信息工程大学,2008:14-16.

[16] 国家技术监督局热环境.根据 T_{WBG} 指数(湿球黑球温度)对作业人员热负荷的评价 GB/T 17244—1998.