

# 室外热环境评价指标湿球黑球温度简化计算方法

张磊, 孟庆林, 赵立华, 张宇峰

(华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**针对室外热环境评价指标湿球黑球温度在实测和数值计算中都比较难获得的问题,在湿热地区广州夏季收集了空气干球温度、湿球温度、黑球温度、相对湿度、风速、太阳辐射和湿球黑球温度等数据,对收集的数据进行相关性分析和回归分析,相关性分析结果表明:空气温度、相对湿度、太阳辐射与湿球黑球温度具有一定的线性相关度,可以采用上述三个气象因子作为湿球黑球温度的简化计算参数;回归分析结果表明:回归的关联式与实测湿球黑球温度的相关性较高,并且满足多元线性回归的各项检验,认为该回归方程具有较高的可信度,可以在城市热环境的实测评价和数值预测过程中,作为湿球黑球温度的简化计算方法应用。

**关键词:**室外热环境;湿球黑球温度;多元线性回归

中图分类号: TU119 文献表示码: A 文章编号: 1006-7329(2008)05-0108-04

## A Simplified Method to Calculate the Wet Bulb Globe Temperature

ZHANG Lei, MENG Qing-lin, ZHAO Li-hua, ZHANG Yu-feng

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

**Abstract:** The wet bulb globe temperature (WBGT) is difficult to measure and calculate in field observation and numerical simulation. To solve this problem, the air dry bulb temperature, wet bulb temperature, globe temperature, relative humidity, mean air velocity, solar radiation and wet bulb globe temperature in Guangzhou, P. R. China, first were collected during the summer (July). Next, correlation and regression analyses were used to derive a simplified model for calculating WBGT. The results show that dry bulb temperature, relative humidity, solar radiation, mean air velocity and WBGT were interrelated to some extent. These four parameters with high linear correlation can be used to predict WBGT in a simplified model with high precision. The simplified WBGT model can be used in field observation and simulation research regarding urban thermal environments.

**Key words:** outdoor thermal environment; wet bulb globe temperature; multivariate linear regression

### 1 概述

在室外热环境的研究中,国内外部分学者认为对于复杂多变的室外热环境,理想实用的热指标应将物理变量与个人变量分开,指标仅描述环境的“冷热”程度,而不包含进个人因素的影响。湿球黑球温度WBGT(Wet-Bulb Globe Temperature)是纯物理的简单的热应力指标,不涉及个人变量,符合这一要求<sup>[1]</sup>。

WBGT 指标的计算式为:

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

式中:  $T_a$ ——空气干球温度, °C;  $T_s$ ——空气自然湿球温度, °C;  $T_g$ ——黑球温度, °C。

WBGT 指标在应用中已经积累了丰富的经验而被美国职业安全与健康研究所选作评估炎热环境安全性的指标<sup>[2]</sup>。在国际上, WBGT 指标已被 ISO7243 标准体系认证<sup>[3]</sup>;

在我国,已经有相关的评价体系和标准将 WBGT 作为室外热安全的评价指标,例如,在文献<sup>[4]</sup>中,采用 WBGT 作为评估奥运园区夏季室外热环境的安全性指标。因此, WBGT 指标在衡量环境热安全方面值得

\* 收稿日期: 2008-02-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50538040)

作者简介: 张磊(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事城市热环境方面的研究。(E-mail) arzhanglei@163.com

孟庆林(联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) mengqinglin@163.net

信赖<sup>[5]</sup>。

华南理工大学孟庆林、金玲等人在 2004 年夏季进行的广州地区庭院热环境研究中,通过测试庭院 WBGT 指标并与人员热感觉投票进行回归分析,得到了以 WBGT 为评价指标的夏季室外热环境舒适域上限值约为 27.2 °C。选择 WBGT 作为室外热环境的评价指标,一方面,可以反映人员在该环境中活动的安全性,另一方面,也可以反映该环境设计的舒适水平<sup>[6]</sup>。

但是, WBGT 指标在实际应用中有以下不足:

在室外热环境的 WBGT 指标现场实测中,自然湿球温度和黑球温度相对比较难测得,黑球温度计放置于环境中后需要 10~20 min 达到热平衡状态,然后才能进行连续的记录;此外,自然湿球温度和黑球温度的测量都需要特殊的仪器,限制了 WBGT 指标在室外热环境多点测试中的应用<sup>[7]</sup>。如果能采用常规气象观测仪器记录的数据直接计算 WBGT 指标,无疑将会大大的方便室外热环境的多点现场观测工作。

在数值模拟预测 WBGT 指标时,自然湿球温度和黑球温度不是直接模拟得到结果,当然,通过复杂的自定义函数,也可以得到上述参数,但这样无疑使数值模拟过程更加复杂,但空气温度、相对湿度、风速、太阳辐射是可以直接模拟得到的参数。

得到采用常规室外气象参数(例如,空气温度、相对湿度、风速和太阳辐射)表示的 WBGT 指标关联式对于室外热环境的实测研究和数值模拟研究以及今后的相关工作开展都有重要的意义。

国内外的学者均对 WBGT 指标的关联式进行过研究。以色列学者 Moran 等人在以色列进行了 WBGT 的数据采集工作,回归了如式 2 所示的关联式<sup>[7]</sup>:

$$ESI = 0.63Ta - 0.03RH + 0.002SR + 0.0054(Ta * RH) - 0.073(0.1 + SR)^{-1} \quad (2)$$

国内的学者董靛(1991)和林波荣(2004)等人分别针对 WBGT 计算公式中的黑球温度、自然湿球温度建立了热平衡方程式,通过求解热平衡方程,分别得到了采用温度、湿度、太阳辐射、平均辐射温度和风速为参

数的 WBGT 指标的关联式:

董靛回归的关联式如式 3 所示<sup>[2]</sup>,林波荣回归的关联式如式 4 所示<sup>[5]</sup>。式中,  $T_a$ ——空气干球温度, °C;  $RH$ ——相对湿度;  $SR$ ——总太阳辐射照度,  $w/m^2$ ;  $T_{mr}$ ——长波平均辐射温度, °C;  $V$ ——风速,  $m/s$ 。

$$WBGT = (0.828 8T_a + 0.061 3T_{mr} + 7.377 1 \times 10^{-3} SR + 13.829 7RH - 8.728 4)V^{-0.0551} \quad (3)$$

$$WBGT = -4.871 + 0.814T_a + 12.305RH - 1.071V + 0.049 8T_{mr} + 6.85 \times 10^{-3} SR \quad (4)$$

在 Moran 等人的观测数据中,作为湿热地区代表城市是以色列城市特拉维夫,该城市位于北纬 32°05', 东经 34°46', 与广州的地理位置差别较大,并且回归该方程所使用的数据是在 5~6 月采集的,该方程是否适用于我国湿热地区的夏季还需要验证。

文献[2]的关系式中,当风速接近 0 时,将会得到不合理的结果,文献[5]提出的 WBGT 指标关联式中包括室外环境的长波辐射温度。在室外现场测量中,长波辐射温度也是一个较难测得的参数,在数值模拟中,长波辐射温度也需要建立自定义程序进行计算。

本文以广州为典型代表城市,在收集的大量样本的基础上,采用回归分析的方法,得到基于室外常规气象参数上的 WBGT 指标关联式。

## 2 测试方法和仪器

由于 WBGT 指标主要用于评价室外环境的热安全和热舒适,因此,以广州 2007 年夏季 7 月采集的数据作为相关性分析和回归分析的样本。在此期间,收集不同下垫面、不同室外环境和不同天气情况下的空气干球温度、相对湿度、太阳辐射、风速和 WBGT 数据,将这些数据进行相关性分析和回归分析,得到采用室外常规气象因子计算的 WBGT 关联式。

在数据观测过程中,各类气象参数的观测探头和精度,如表 1 所示。

表 1 探头种类和精度

	干球温度	相对湿度	自然湿球温度	风速	黑球温度	太阳辐射
探头类型	Pt100	湿敏电容	Pt100	热线	标准黑球温度探头	——
测量范围	-50~80 °C	0~100%	0~80 °C	0~45 m/s	-40~80 °C	——
精度	±0.15 °C	±5%	±0.15 °C	±0.1 m/s	±0.15 °C	——
采集间隔	5 min	5 min	5 min	1 min	5 min	1 min
说明	加装防辐射装置	加装防辐射装置	加装防辐射装置	热线风速探头	直径 150 mm, 满足 ISO 7726、7243 等标准	广州气象卫星地面站提供数据

### 3 相关性分析<sup>[9,10]</sup>

采用上述仪器在广州的夏季进行了样本采集工作,在雷雨天等特殊情况下停止样本采集,共采集有效样本 1 487 组,样本的平均值、标准差和分布范围如表 2 所示。

在进行多元回归分析之前,先绘制 WBGT 与干球温度、相对湿度、太阳辐射和风速之间关系的散点图,以判断 WBGT 指标与上述 4 个参量是否存在线性关系。散点图如图 1~4 所示:

表 2 观测样本的平均值、标准差和分布范围

	干球温度 ℃	相对湿度 %	太阳辐射 W/m <sup>2</sup>	风速 m/s	WBGT ℃
平均值	33.04	65.82	302.77	0.93	29.93
标准差	3.60	12.46	331.82	0.81	2.89
范围	26.5~41	39~88	0~1 059	0~6.56	24.94~37.5

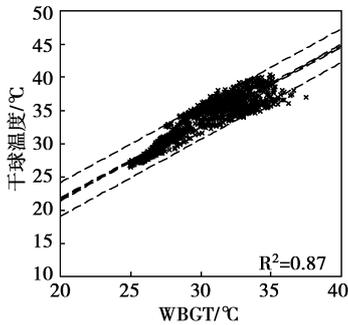


图 1 WBGT 与干球温度散点图

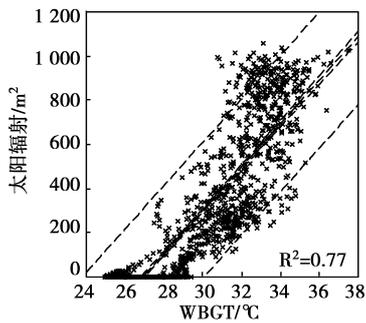


图 2 WBGT 与太阳辐射散点图

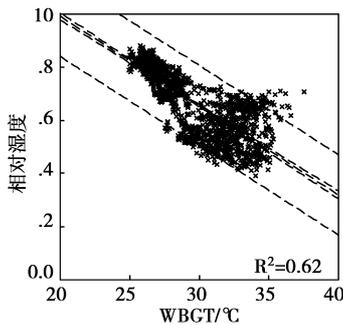


图 3 WBGT 与相对湿度散点图

在图 1~4 中,中心的虚线是回归线,回归线两侧

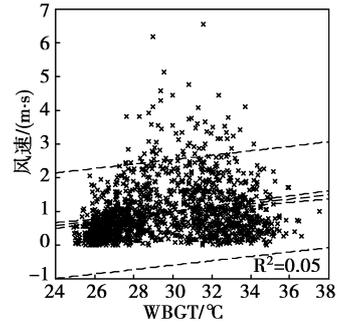


图 4 WBGT 与风速散点图

是总体均数的 95% 的可信区间,最外面的两条虚线是个体预测值的 95% 的可信区间,右下角给出了该曲线的决定系数 R<sup>2</sup>。从图 1~4 可以看出, WBGT 与干球温度的线性趋势最好,并成正相关关系,相对湿度其次,成负相关趋势, WBGT 与太阳辐射之间有曲线趋势,为了简化模型,仍然采用线性回归模型, WBGT 与风速之间的相关性较差,但在初步建模时还是把风速包含在内。用最小二乘法做 WBGT 与干球温度、相对湿度、太阳辐射和风速的多元线性回归,得到回归方程,如式 5 所示:

$$WBGT = 1.159T_a + 17.496RH + 2.404 \times 10^{-3}SR + 1.713 \times 10^{-2}V - 20.661 \quad (5)$$

标准化回归方程为:

$$WBGT = 1.439T_a^* + 0.75RH^* + 0.27SR^* + 0.005V^* \quad (6)$$

回归模型的统计信息和假设检验结果如表 3~4 所示。

表 3 回归模型的统计信息

复相关系数	决定系数	校正的决定系数	剩余标准差
.995	.991	.991	.275 1

表 4 回归系数及其假设检验

	非标准化系数		标准化系数		t	Sig.
	系数	标准误	Beta			
常数项	-20.661	.374			-55.270	.000
干球温度	1.159	.008	1.439		149.214	.000
太阳辐射	2.404E-03	.000	.270		67.179	.000
相对湿度	17.496	.195	.750		89.708	.000
风速	1.713E-02	.009	.005		1.843	.066

该回归方程的决定系数(R<sup>2</sup>)为 0.991, F 检验高度显著(F=40 567.83, P<0.001),说明回归方程整体拟合效果不错。在回归系数显著性检验中,除风速外各参数 t 检验的预测值均小于 0.05,风速的预测值为 0.066,不能通过 t 检验,此外,在标准化回归方程 6 中,风速变化 1%,对 WBGT 的影响只有 0.005%,这

表示风速对 WBGT 的影响非常小,可以忽略。

由于实际的室外环境是非稳定状态,风速变化情况非常复杂,同时空气温度、湿度、太阳辐射等气候要素也分秒变化,黑球温度和湿球温度探头表面处于动态热平衡状态,气候要素对黑球温度和自然湿球温度的影响远比稳定工况复杂的多,通过建立稳态热平衡方程来求解黑球温度和自然湿球温度进而得到 WBGT 的关联式并不合适。因此,本文侧重于通过室外实验直接观测的方法获得室外 WBGT 指标与温度、太阳辐射、相对湿度和风速的相关关系,并且测试的数据表明,在室外不稳定工况下,风速与自然湿球温度和黑球温度没有明显的相关性,由此本文提出的 WBGT 简化计算模型,不包含风速参数。

采用空气干球温度、相对湿度和太阳辐射三个参数来回归 WBGT 的简化计算模型,如式 7~8 所示。

$$WBGT = 1.157T_a + 17.425RH + 2.407 \times 10^{-3}SR - 20.550 \quad (7)$$

标准化回归方程为:

$$WBGT = 1.437T_a^* + 0.747RH^* + 0.27SR^* \quad (8)$$

该回归方程的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.991,  $F$  检验高度显著 ( $F=54\ 002.07, P<0.001$ ), 总体回归效果与方程 5 一致,但各项因子  $t$  检验的预测值均小于 0.05, 因此,回归方程 7 式的  $t$  检验显著,各自变量的回归系数均不为 0。

绘制标准化残差的直方图,如图 5 所示,标准化残差的分布服从正态分布,绘制 WBGT 实测值与预测值的关系图以及两者的残差分布图,如图 6 和 7 所示, WBGT 的预测值分布与实测值分布非常接近,两者残差绝对值不超过 0.8 °C,并且残差随 WBGT 实测值的变化范围基本保持稳定,说明残差方差齐性。

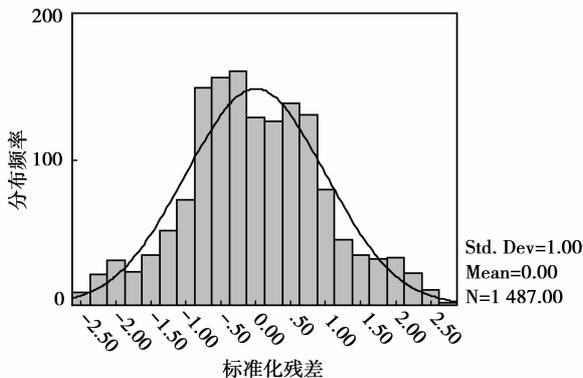


图 5 标准化残差直方图

通过以上检验,可以认为通过回归方法得到的 WBGT 关联式是一个统计学上无误,并且具有实际意义的模型,具有较高的可信度,可以用于室外热环境的

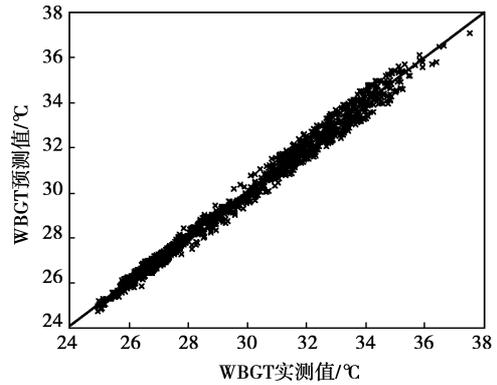


图 6 WBGT 实测值与预测值关系图

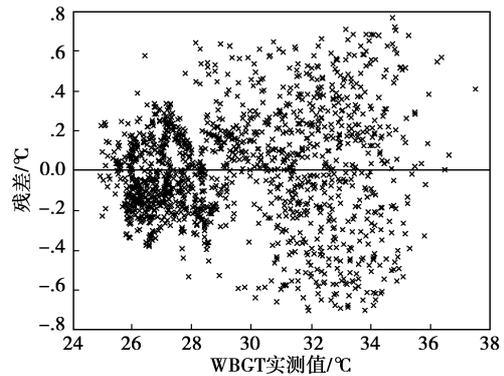


图 7 WBGT 实测值与残差的散点图

WBGT 指标现场观测和模拟预测中。

#### 4 结 论

通过上述 WBGT 与温度、相对湿度、太阳辐射和风速的相关性分析和回归分析,得到 WBGT 指标的简化计算公式,如式 9 所示:

$$WBGT = 1.157T_a + 17.425RH + 2.407 \times 10^{-3}SR - 20.550 \quad (9)$$

式中:  $T_a$ ——空气干球温度, °C;  $RH$ ——相对湿度;  $SR$ ——总太阳辐射照度,  $w/m^2$ , 当观测点位于光照区时,  $SR$  为太阳直射辐射和太阳散射辐射之和, 当观测点位于阴影区时,  $SR$  为太阳散射辐射照度。

该公式的决定系数  $R^2 = 0.991$ , 回归模型整体  $F$  检验高度显著 ( $F=40\ 764.78, P<0.001$ ), 模型中各参数均满足  $t$  检验, 各观测间相互独立, 残差分布服从正态分布并且方差齐性。因此, 该回归方程具有统计学的意义。

由于采用空气温度、相对湿度和太阳辐射等常规气象参数计算 WBGT, 与 WBGT 的定义式相比, 简化关联式使用方便, 响应时间快, 所有探头可以集中放置在一个便携的装置中来测量 WBGT; 在模拟预测中, 可以直接使用数值模拟结果回归 WBGT, 而不用进行复杂的编程和后处理工作。

(下转第 117 页)

- Ventilating & Air Conditioning. 2004,34(5):18-24.
- [9] 龙惟定,白玮.我国民用建筑的空调发展前景.[EB/OL](2006-03-01)[2006-07-20] <http://paper.studa.com/2005/11-22/20051122103.html>.
- [10] 国家气象信息中心.[EB/OL](2006-06-22)[2007-08-22]. <http://cdc.cma.gov.cn/publicservice/climate.jsp?STPROVID=广东&station=59287>.
- [11] 任俊.广州地区建筑节能设计外墙及外窗技术要求[J].广州建筑.2002(6):29-31.  
REN Jun. Technical measures of external wall and window for building energy conservation design in guangzhou [J]. Guangzhou Buildings. 2002(6):29-31.
- [12] 陈卫民,朱锦连.广州某广场塔楼幕墙方案节能设计分析[J].广东土木与建筑.2005(5):23-24,17.  
CHEN Wei-min, ZHU Jin-lian. The energy saving design analysis of glass windows of some buildings in guangzhou[J]. Guangdong Architecture Civil Engineer-
- ing. 2005(5), 23-24, 17.
- [13] 陈小雁,李苏泷.商场照明节能潜力及其对空调能耗的影响[J].节能.2005,273(4):11-15.  
CHEN Xiao-yan, LI Su-long. The energy saving potential of the mall ant its influence for the energy consumption of air-conditioners[J]. Energy Conservation. 2005,273(4):11-15.
- [14] 梁珍,赵加宁,郭骏.高层办公建筑能耗调查与节能潜力分析[J].节能技术.2001,19(1):19-21.  
LIANG Zhen, ZHAO Jia-ning, GUO Jun. Investigation on shenzhen high-rise office building energy. Consumption and analysis of energy saving potentialities[J]. Energy Conservation Technology. 2001, 19(1):19-21.

(编辑 陈蓉)

(上接第111页)

## 5 讨论

本文回归的 WBGT 关联式的适用范围是:  $26.5 \leq Ta \leq 41 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $39\% \leq RH \leq 88\%$ ,  $0 \leq SR \leq 1.059 \text{ w/m}^2$ ,  $0 \leq V \leq 6.56 \text{ m/s}$ , 基本能满足夏季计算 WBGT 指标的需要。在湿热地区本文提出的回归公式具有较高的可信度,但是否适用与其他气候区,还需要进一步的研究。

由于室外风速变化对自然湿球温度和黑球温度的影响非常复杂,本文提出的 WBGT 指标简化模型中没有考虑风速因素,但不可否认的是风速是影响人体热感觉和热舒适的重要参数,因此需要对室外动态气象要素对评价指标响应关系进行深入研究。

## 参考文献:

- [1] 董靛,陈启高.户外热环境质量评价[J].环境科学研究.1995,8(6):42-44.  
DONG Liang, CHEN Qi-gao. Evaluation of outdoor thermal environment quality [J]. Research of Environmental Sciences. 1995,8(6):42-44.
- [2] 董靛.街谷夏季热环境研究[D].重庆:重庆建筑大学,1991.
- [3] ISO. International Standard 7243, hot environments- Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) [S].
- [4] 绿色奥运建筑研究课题组.绿色奥运建筑评估体系[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [5] 林波荣.绿化对室外热环境影响的研究[D].北京:清华大学,2004.
- [6] JIN LING, MENG QINGLIN, ZHAO LIHUA. Thermal comfort of a courtyard in Guangzhou in summer. The 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate [C]. Beijing, 2005.
- [7] D. A. 麦金太尔.室内气候[M].龙惟定,等译.上海:上海科学技术出版社,1988.
- [8] D. S. MORAN, K. B. PANDOLF, Y. SHAPIRO, et al. An environment stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT) [J]. Journal of thermal biology. 2001 (26):427-431.
- [9] 张文彤,闫洁. SPSS 统计分析基础教程[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [10] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M].北京:高等教育出版社,2004.

(编辑 陈蓉)