

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.07.015

湿球黑球温度(WBGT)评价高温环境热压力方法优化

许孟楠,李百战,杨心诚,刘 猛

(重庆大学 a.三峡库区生态环境教育部重点实验室;b.城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘 要:为了提高和改善高温环境热压力对人体影响程度评价方法的准确性,在人工气候室中营造高温热环境,湿球黑球温度(WBGT)分别为 30,28,26 °C 时,研究受试者体力活动时心率的变化规律,提出利用心率作为作业现场快速评价高温热压力水平的方法。研究表明,在中国现行热压力评价标准 GB/T 17244-1998 规定的指数限值内,心率与人员活动强度具有线性关系($R^2 = 0.780, p < 0.01$),利用心率能够较好地预测实际活动强度,提高高温环境热压力安全评价的有效性。研究提出了不同 WBGT 指数下允许的最大心率水平,并认为现行评价标准中规定的 WBGT 指数限值能够保证劳动者健康。

关键词:高温环境;热压力;WBGT 指数;心率;活动强度;劳动安全

中图分类号:R136.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)07-110-05

An optimized method to evaluate heat stress with WBGT-index

XU Mengnan, LI Baizhan, YANG Xincheng, LIU Meng

(a.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education;b.School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,Chongqing 400045,China)

Abstract: The purpose of this study is to improve the influence evaluation method of heat stress on human body in high temperature environment. High temperature environment (WBGT=30,28,26 °C) is created in climatic chamber to research manual labor's heart rate variation in different metabolic rates, and to achieve an optimized heat stress evaluation method based on WBGT-index and heart rate. The result shows that in the range of Chinese current standard, the relationship between heart rate and metabolic rate is linear ($R^2 = 0.780, p < 0.01$). Heart rate can predict the metabolic rate well and improve the efficiency of heat stress evaluation. Maximum heart rates under different WBGT-indexes are presented, and it's showed the limitations of the national heat stress standard can well protect manual labor's health.

Key words: high temperature environment; heat stress; WBGT-index; heart rate; metabolic rate; labor safety

近年来,国内各地夏季气温屡创新高^[1],环卫工人、建筑工人、快递员等需要从事户外作业的从业者在夏季长时间暴露在高温环境中。过高的环境温度和高强度的体力活动极易使人体产生各类热疾病,严重时甚至危及生命安全^[2]。随着中国人口结构呈现老龄化趋势,从事体力工作人员的平均年龄不断增加^[3],在高温劳动过程中,随着年龄的增长,中年劳动者较青年劳动者发生热疾病的概率显著增加^[4]。因此,现阶段如何更好地在高温环境下保护劳动者的安全和健康是十分值得关注的。

收稿日期:2014-02-15

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50838009)

作者简介:许孟楠(1984-),男,重庆大学博士生,主要从事建筑热环境与人体热应激研究。

李百战(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)baizhanli@cqu.edu.cn。

在高温环境热压力评价方面,国内目前主要采用的标准为《GB/T 17244—1998 热环境—根据 WBGT 指数(湿球黑球温度)对作业人员热负荷的评价》,该标准利用 WBGT 指数对高温作业环境热压力进行评价,规定了不同活动强度时, WBGT 指数限值。不同职业的活动强度水平主要通过具有实践经验的专业人员对劳动过程进行观察评定。研究表明,由于不同评价人员的主观差异,结果最大误差可达 20%^[6]。较大的评价误差容易错误估计实际活动强度,导致高温劳动安全事故的发生。因此,如何准确评价高温热压力对体力劳动者的生理影响是亟待解决的问题。

基于上述问题,笔者选择便于作业现场快速测量的生理指标——心率用于高温热压力对人体作用影响的评价,研究心率与活动强度的相关性,寻求对中国现有高温热压力水平评价方法的优化和改善。

1 研究方法

实验地点为重庆大学城环实验楼人工气候室,气候室房间尺寸 4 m(长)×3 m(宽)×3 m(高),气候室干球温度控制范围为-5~45 °C,控制精度±0.3 °C;相对湿度控制范围为 10%~90%,控制精度为±5%。风速变频器可调,调控范围为 0.1~2 m/s。

基于中国现行的高温环境热压力评价标准 GB/T 17244—1998 中对于高温作业人员活动强度限值的规定^[7],在人工气候室中营造相对湿度为 30%, WBGT 指数为 30.0、28.0、26.0 °C 的三种环境工况,安排受试者在运动跑台上进行规定速度和时间的运动,模拟实际高温作业中的相应强度和时间的体力劳动,跑台坡度为 10%。实验工况见表 1,实验现场见图 1。

表 1 实验工况设置

工况	WBGT 温度/°C	运动速度/ (km·h ⁻¹)
1	30.0	1.8
2	28.0	3.8
3	26.0	4.8



图 1 实验仪器安装与受试者测试

实验时间为 2012 年 7—8 月,受试者共 10 人,均为长期从事户外体力劳动的健康男性,无高血压、心脏病史,无严重热疾病史,实验期间未服用任何药物。实验前,实验方案均详细告知受试者,受试者确认同意后签字,实验期间受试者可自由退出实验。实验中,为避免产生顺序误差,受试者实验顺序随机,但保证相同受试者连续两次实验间隔 3 d 以上。受试者基本信息见表 2。

表 2 受试者基本信息

	均值±标准差	范围
年龄/岁	40.4±3.2	35~48
身高/cm	168±2.3	164~173
体重/kg	59.8±2.3	55.4~65.6
BMI 指数/(kg·m ⁻²)	21.2±0.7	20.1~22.5
静坐心率/bpm	68.3±5.7	59~78

实验前一天,受试者禁止饮酒,保证正常休息并禁止从事过重体力劳动。实验开始前,受试者更换实验标准着装(Icl≈0.4clo),在室温 26 °C 的空调环境中静坐 30 min,测量静坐心率后进入气候室。实验期间,使用 RS800CX 心率表监测受试者实时心率;使用 TMCx-HD 热电偶和便携多通道记录仪监测直肠温度;受试者每隔 10 min 佩戴呼吸面具 3 min,使用湿式流量计测量呼出气体体积、温度,使用氧气浓度计测量收集废

气的氧气浓度。实验期间,每隔 20 min 询问一次受试者主观感受。

参考世界卫生组织关于高温作业对健康不产生危害的建议值^[8],出现下列情况之一时中止试验:1)受试者直肠温度超过 39 ℃;2)当受试者心率连续 3 min 超过 180 bpm;3)受试者有头晕、心慌或主观感觉无法继续坚持实验时。

2 实验结果

2.1 实验基本情况

参与实验的 10 名受试者均顺利完成 3 个工况实验,受试者心率未超过 180 bpm,直肠温度未超过 39 ℃,实验期间也未主动要求终止。基于实验方案设计,气候室中各工况实际环境参数见表 3。

表 3 气候室各工况实际环境参数(均值±标准差)

工况	WBGT 指数/℃	干球温度/℃	黑球温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)
1	29.9±0.2	39.9±0.2	38.7±0.3	30.9±2.3	0.2
2	28.0±0.2	37.5±0.3	37.4±0.1	31.9±3.4	0.2
3	26.1±0.3	35.2±0.2	35.0±0.2	30.7±3.6	0.2

2.2 基于耗氧量的活动强度计算

实验过程中,通过记录受试者呼吸废气中氧气浓度、体积、温度,参照国际标准 ISO8996:2004 中基于耗氧量的活动强度计算方法^[6],按照式(1)计算实际活动强度。

$$M = EE \times \dot{V}_{O_2} \times \frac{1}{A_{D_u}}, \quad (1)$$

式中:EE 为能量代谢数,EE=(0.23RQ+0.77)×5.88, W·h/L;RQ 为呼吸商,正常有氧运动时 RQ≈0.85; \dot{V}_{O_2} 为耗氧率,L/h; A_{D_u} 为身体表面积, $A_{D_u}=0.202 \times W_b^{0.425} \times H_b^{0.725}$;W_b 为受试者体重,kg;H_b 为受试者身高,m。

3 种工况下,计算不同时间基于耗氧率的活动强度如图 2 所示。当受试者由静坐开始实验后,基于耗氧量所得活动强度计算值不断增加,且所设活动强度越高的工况中,达到稳定所需的时间越短,在 20 min 后,受试者活动强度基本达到稳定。3 种工况下,20~120 min 的活动强度平均值分别为 156.9,259.7,315.2 W/m²,符合 GB/T 17244-1998 中规定的中代谢率(轻体力劳动)、重代谢率(中体力劳动)和极重代谢率(重体力劳动)的体力活动强度。

3.3 基于心率的体力活动强度预测

实验期间,不同工况下,受试者平均心率如图 3 所示。实验开始后,受试者心率显著增加,在 10 min 后,基本保持稳定。3 种工况 10~120 min 期间,平均心率分别为 101.5,123.7,127.9 bpm。

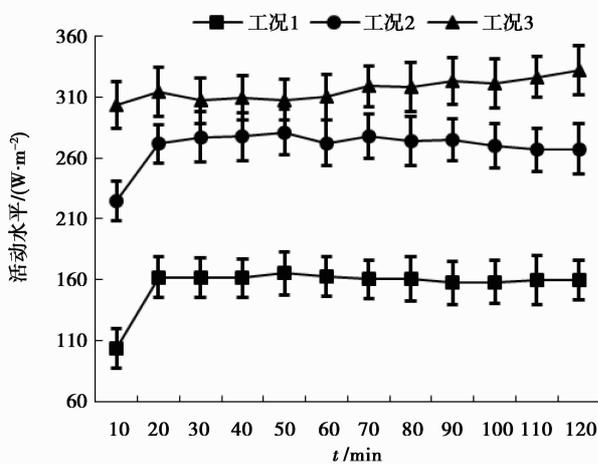


图 2 基于耗氧量的体力运动强度

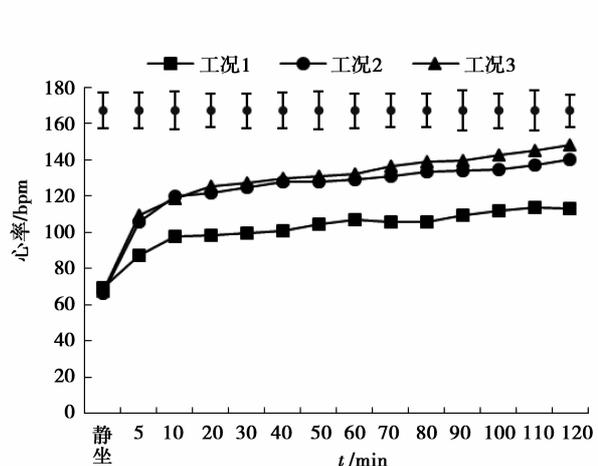


图 3 不同实验工况受试者心率变化

计算不同受试者在同一工况下 20~120 min 期间的心率水平和实际活动强度(基于耗氧量)的平均值,对各受试者不同工况下的心率和实际活动强度平均值进行线性回归分析,样本量 $n=30$,线性拟合公式见式(2),各参数信息见表 4。

$$M = 4.062 \times \text{HR} - 250.82, \quad (2)$$

式中, M 为活动强度, W/m^2 ; HR 为心率, bpm 。

表 4 心率与活动强度线性拟合参数信息

	参数值	标准误	决定系数	显著性
心率值	4.062	0.270	0.780	$p < 0.01$
常量	-250.82	33.810		

大量文献研究表明了心率的变化与活动活动之间存在相关性。Montoye 和 Leger 等^[9]提出用心率作为测定能量代谢的替代方法,认为中等强度体力活动时,心率与能量代谢存在着相关性。Michael、Zenija 和 Gambler 等^[11]分别在脚踏车功量计和运动跑台上的实验结果证明心率与活动强度具有直线关系,但相关线不同。Maughan 等^[14]的研究认为心率可用于推算活动活动,并证明推算结果同实测误差不大于 5%。通过本文研究发现,利用心率预测活动活动时,相关系数为 0.780, $p < 0.01$,在高温体力活动中,利用心率能够较好的预测实际活动活动。

3.4 GB/T 17244—1998 安全性评价

中国在高温劳动的相关标准主要利用 WBGT 指数对环境进行评价。对于不同活动强度下 WBGT 指数的限定值主要参考国际标准 ISO7243:1989,并在其基础上,将热环境评价标准分为 4 级,即好、中、差、很差。以 ISO7243:1989 中^[15]对定的 WBGT 指数限值为“好”级,指数温度每增加 1℃,降低一级,但标准中并未指明中、差和很差等级对人体的作用影响程度。通过本文研究发现,不同 WBGT 指数下(相对湿度 30%),不同 WBGT 指数限值下连续从事规定强度体力运动 120min 期间,心率和直肠温度均为超过健康要求限值。因此,作业时间在 120 min 以内,GB/T 17244—1998 中,等级为“差”的 WBGT 指数限值仍能够保证劳动者身体健康。根据 GB/T 17244—1998 中体力活动强度分级,利用公式(1),计算不同体力活动强度的允许心率最大值。获得不同心率区间的环境 WBGT 指数安全限值,如表 5 所示,该表可用现场测定心率值快速评价工作环境热压力水平是否超出标准要求。

表 5 WBGT 指数限值下最大活动强度和心率

WBGT 指数/℃	活动强度/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	心率/bpm
≤ 32	≤ 130	≤ 94
≤ 30	≤ 200	≤ 111
≤ 28	≤ 260	≤ 125
≤ 27	> 260	\leq 最大心率*

注:* 根据世界卫生组织建议^[8],长期可持续工作最大心率值不宜超过 $185 - 0.65 \times$ 年龄。

3 结 论

通过本研究发现,在高温环境下,心率与实际活动具有良好的线性关系,可利用心率预测劳动者的活动限值用于评价高温环境热压力影响水平,提出了不同心率区间的 WBGT 指数限值。我国现行热环境评价标准 GB/T 17244—1998 中的 WBGT 指数限值能够基本保证劳动者的健康。

参考文献:

- [1] 贺山峰,戴尔阜,葛全胜,等.中国高温致灾危险性时空格局预估[J].自然灾害学报,2010,2(2):91-97.
HE Shanfeng, DAI Erfu, GE Quansheng, et al. Pre-estimation of spatio-temporal pattern of extreme heat hazard in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 02(2): 91-97.
- [2] Larsen T, Kumar S, Grimmer K, et al. A systematic review of guidelines for the prevention of heat illness in community-based sports participants and officials[J]. Journal of Science and Medicine in Sport/Sports Medicine Australia, 2007, 10(1):

- 11-26.
- [3] 柳君,于清,唐伟,等.北京建筑农民工生活工作状况对建筑安全的影响[J].重庆建筑大学学报,2006,28(4):101-105.
LIU Jun,YU Qing,TANG Wei,et al.The living & working conditions of construction laborers from rural areas and their effect on construction safety:a case study in Beijing[J].Journal of Chongqing Jianzhu University,2006,28(4):101-105.
- [4] Miller V S,Bates G P.The thermal work limit is a simple reliable heat index for the protection of workers in thermally stressful environments[J].The Annals of Occupational Hygiene,2007,51(6):553-561.
- [5] Sung T I,Wu P C,Lung S C,et al.Relationship between heat index and mortality of 6 major cities in Taiwan[J].Science of The Total Environment,2013,442(1):275-281.
- [6] International Organization for Standardization.ISO 8996-2004 Determination of metabolic rate[S].Geneva:International Organization for Standardization,2004.
- [7] 于永中,滑东红,李天麟,等.GBT 17244—1998 热环境 根据 WBGT 指数(湿球黑球温度)对作业人员热负荷的评价[S].北京:中国标准出版社,1998.
- [8] WHO Scientific Group on Health Factors Involved in Working under Conditions of Heat Stress.Health factors involved in working under conditions of heat stress-Technical report 412[R].Geneva: World Health Organization, 1969.
- [9] Montoye H J,Taylor H L.Measurement of physical activity in population studies;a review[J].Human Biology,1984,56(2):195-216.
- [10] Leger L,Thivierge M.Heart rate monitors: validity, stability, and functionality[J].Physician and Sports Medicine,1988,16(5):143-151.
- [11] Michael Jr E D,Hutton K E,Horvath S M.Cardiorespiratory response during prolonged exercise[J].Journal of Applied Physiology,1961,16:997-1000.
- [12] Roja Z,Kalkis A,Vain A,et al.Assessment of skeletal muscle fatigue of road maintenance workers based on heart rate monitoring and myotonometry[J].Journal of Occupational Medicine and Toxicology,2006,1:20-28.
- [13] Gamberale F,Holme I.Heart rate and perceived exertion in simulated work with high heat stress[C/OL]// Physical Work and Effort,Proceedings of the First International Symposium Held at the Wenner-Gren Center,Stockholm,December 2-4,1975 [2014-01-10].<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080213736500325>.
- [14] Maughan R J, Shirreffs S M.Development of individual hydration strategies for athletes[J]. International Journal of Sport Nutrition, 2008, 18(5):457.
- [15] ISO 7243-1989,Hot environments-Estimation of the heat stress on working man based on the WBGT-index wet bulb globe temperature[S].Geneva:International Organization for Standardization,1989.

(编辑 郑洁)