

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.158

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



湿热地区室外动态热环境中二节点模型的 验证及修正

蒋毅^{1,2}, 赵立华², 孟庆林²

(1.长沙理工大学 建筑学院,长沙 410076;2.华南理工大学 建筑学院;亚热带建筑科学国家重点实验室,广州 510641)

摘要:快速城镇化和全球变暖使城市室外环境的热不舒适加剧,热安全风险提高。为了解湿热地区室外动态热环境中人体生理量的变化规律,为快速评价室外热环境提供依据,开展了室外人体热反应观测实验。基于实测数据,对二节点模型进行了模拟精度分析和吻合度检验,研究得到了人体在室外受风速、MRT和自身调节的作用下,皮肤温度和体核温度呈现不同的变化规律及二节点模型修正方法。在室外动态热环境中应用二节点模型,需从皮肤、体核调定温度、人体标准模型、肌体启动体温调节的环境温度值及人体与室外环境的对流换热系数4个方面对人体二节点模型进行修正,相关参数和调节过程应写成可赋值的变量或数学表达式,修正后的二节点模型对室外人体热反应预测具有通用性和适用性。

关键词:室外热环境;皮肤温度;体核温度;二节点模型

中图分类号:TU111.2 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)01-0168-12

Validation and revision of two-node model in outdoor unsteady environment in hot and humid region

Jiang Yi^{1,2}, Zhao Lihua², Meng Qinglin²

(1. School of Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, P. R. China;

2. School of Architecture; State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

Abstract: Rapid urbanization and global warming aggravate the thermal discomfort of urban outdoor environment and increase the risk of thermal security. In order to find out the physiological parameters changes of human body in outdoor thermal environment, provide a basis for rapid urban thermal environment evaluation, an outdoor experiment was carried out to observe the thermal response of human body. Based on the measured data, the simulation precision analysis and coincidence test of the two-node model were carried out. It is found that human skin temperature and body core temperature show different trends under the influence of outdoor wind speed, MRT and self-regulation, in order to ensure the simulation accuracy,

收稿日期:2019-06-28

基金项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0700205);国家自然科学基金(51878288)

作者简介:蒋毅(1983-),男,博士,主要从事城市热环境研究,E-mail:zoroyi@qq.com。

赵立华(通信作者),女,教授,博士生导师,E-mail:lhzhao@mail.scut.edu.cn。

Received:2019-06-28

Foundation items: National Key Research & Development Program During the Thirteenth Five-year Plan Period (No. 2016YFC0700205); National Natural Science Foundation of China (No. 51878288)

Author brief:Jiang Yi (1983-), PhD, main research interest: urban thermal environment, E-mail: zoroyi@qq.com.

Zhao Lihua (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lhzhao@mail.scut.edu.cn.

the two-node model of human body needs to be modified from the following four aspects: skin and core temperature, standard human model, temperature of regulation starting, convective heat transfer coefficient, relevant parameters and calculation process shall be written as assignable variables or mathematical expressions, the revised two-node model is universal and applicable to the prediction of outdoor human thermal response.

Keywords: outdoor thermal environment; skin temperature; core temperature; two-node model

在温室效应和快速城镇化的双重影响下,中国南方湿热地区城市室外热环境日趋严峻,热浪发生率日益增加,引发中暑等与气候紧密相关的热疾病的发生,导致与热有关的死亡率提高^[1-4]。高温对人体产生的危害主要是通过影响肌体正常的生理过程导致新陈代谢和生理功能障碍,使人体体核温度升高和大量排汗,引发脱水和热中暑等疾病。

Gaage等^[5]于1967年开始了室内人体热反应的相关实验研究,于1971年提出了得到广泛使用的人体二节点模型(two-node-model,简称2NM)^[6],该模型用分为内外两个集中层(皮肤层和核心层)的圆柱体来描述人体,并将人体视作受控系统,而控制系统由皮肤层和核心层的传感器组成,输出信号通过传感器可以调节血管中的血流量和皮肤层出汗量,从而调节人体皮肤温度和体核温度。二节点模型基于人体传热和生理热调节原理提出,确立了热环境物理参数变化与人体热反应之间的理论关系,是目前最简单、使用最广泛的人体热反应模型。之后,大量学者的研究都是基于二节点模型或改进的二节点模型开展;如堪萨斯州立大学的Jones^[7]将二节点模型与人体瞬态热湿传递模型相结合,来模拟瞬态环境中不同参数变化条件下人体热感觉的变化;敖顺荣^[8]采用二节点模型,研究了在突变热环境下人体的热感觉变化与生理参数变化的关系;Takada等^[9]在实验基础上对二节点模型进行了修正,并对改进的二节点模型在稳态环境下皮肤温度预测的有效性进行了验证;张军^[10]开展了室内温湿度突变人体热反应实验,改进了人体二节点预测模型,使其在中国湿热地区室内温湿度突变环境中具有适用性。以上研究大部分基于室内理想可控环境,所得研究成果无法直接应用到室外热环境领域;二节点模型基于欧美白人人体特征获得,运用到亚洲人体热反应预测时,实验结果往往出现较大误差,需要对模型进行修正和改进。近年来,室外热环境受到重视,逐渐开展了室外人体热反应实验研究。这些研究尝试将基于室内测试结果得到的人体热反应预测模型应用到室外环境领域,并通过实测数据对室外环境中人体热调节的动力学机理进行分析^[11];对常用室内模型,如Stolwijk模型、人体二节点模型在室外热环境领域的预测精度作出了初步判断^[12-13];对相关模型在室外热环境领域的应用进行了修正^[14]。

中国南方湿热地区高温、高热,夏季漫长,热安

全风险较高,在该地区开展该研究,对提高和改善室外空间的热环境水平,提升该地区城市室外环境的品质和利用率,有一定的价值和指导意义。笔者以研究湿热地区室外动态变化环境对人体热反应影响为目的,通过实验获取该地区人群在室外动态变化环境中的生理变化特点,在二节点模型的基础上,探索建立适用于室外人体生理量变化预测模型。

1 人体热反应观测实验

1.1 实验说明

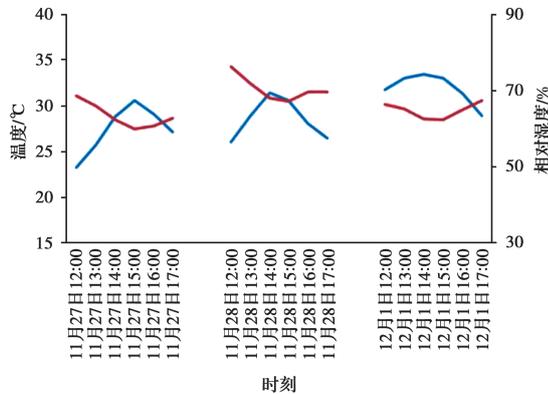
二节点模型通过输出信号来调节皮肤血流量和出汗量,从而调节人体皮肤温度和体核温度,因此,选取皮肤温度和体核温度这两个生理量指标来开展人体热反应模型研究。血压、心率和出汗量3个生理量指标可以反映出受试者的生理调节状态,实验对这3个指标都进行了测定。其中,出汗量的测定方法是采用高精度工业天秤,对受试者在规定时间点进行体重测量,取前后两次体重值之差作为出汗量。然而,在后续分析中发现,室外环境中体重的测定受风速的影响,出汗量的测定值存在很大误差。由于血压、心率和出汗量在二节点模型的系列数学表达式中属于因变量,这3个变量的测试与否不影响皮肤温度和体核温度的计算,因此,实验舍弃了出汗量的相关分析。

引起人体生理量变化的主要环境因素为:风速、太阳辐射、场地的变化以及人体活动状态,针对上述因素,实验设计了站立、行走和环境交替变化3种类型的6个工况,具体如下表1所示。

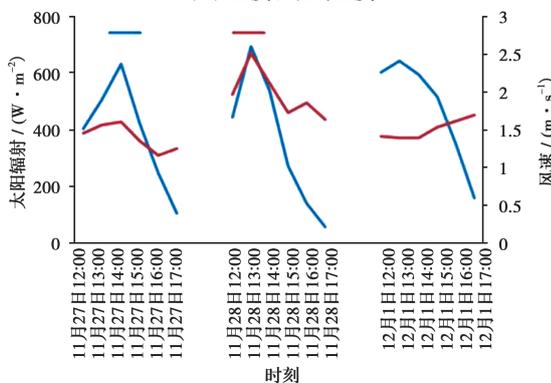
表1 工况设置
Table 1 Case Setting

工况	工况设置	测试因素
站立工况 1	无太阳直射辐射环境站立 30 min	风速、站立
站立工况 2	太阳直射辐射环境站立 30 min	风速、太阳辐射、站立
行走工况 3	无太阳直射辐射环境行走 30 min	风速、行走状态
行走工况 4	太阳直射辐射环境行走 30 min	风速、太阳辐射、行走
场所交替变化工况 5	在太阳直射辐射环境站立 10 min,移动至无太阳直射辐射环境站立 10 min,再移动至太阳直射辐射环境站立 10 min	风速、太阳辐射、场所改变、站立
场所交替变化工况 6	在太阳直射辐射环境行走 10 min,移动至无太阳直射辐射环境站立 10 min,再移动至太阳直射辐射环境站立 10 min	风速、太阳辐射、场所改变、行走

根据文献[15]的研究显示,广州 11 月典型气象日的日最高空气温度为 29.2 °C,日最大太阳辐射量为 978.93 W/m²,考虑到在此环境中无间隔站立行走 30 min 受试者很容易患中暑等热疾病,基于安全考虑及招募受试者也存在一定的难度,选取了 6 名 18~30 岁的健康在校学生,于 2017 年 11 月 27—28 日下午及 12 月 1 日下午开展了人体热反应测试,测试期间的天气状况如图 1 所示。



注: — 温度 — 相对湿度
(a) 温度和相对湿度



注: — 太阳辐射 — 风速
(b) 太阳辐射和风速

图 1 测试时间段天气状况

Fig.1 Value of environmental parameters of measuring period

1.2 受试者

受试者性别为 3 男 3 女,基本信息如表 2 所示,其中,体表面积 A 的计算采用式(1)所示 DuBois 公式^[16]获得。

$$A = 0.202 \times W^{0.425} \times L^{0.725} \quad (1)$$

表 2 受试者基本信息

Table 2 Basic information of subjects

年龄/岁	身高 L/cm	体重 W/kg	BMI	体表面积 A/m ²
23.5±3.5	166.5±8.9	66.5±16.2	22.5±3.9	1.72±0.24

1.3 实验场地和测试仪器

实验场地为华南理工大学五山校区校园内的实际人行空间,场地满足休息室、日照区域和遮荫区域衔接在一起的需求,如图 2、图 3 所示。实验监测的

环境参量和人体生理量如表 3 所示。

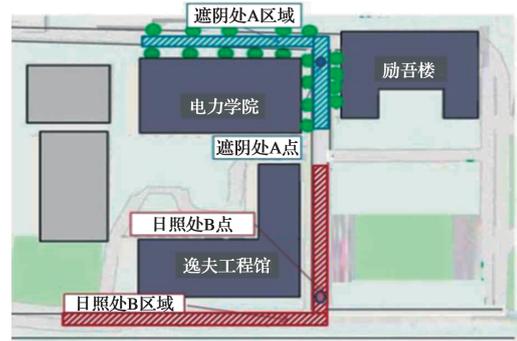


图 2 实验场地布局

Fig.2 Layout of experimental field



图 3 遮荫区域和日照区域

Fig.3 Shading area and sunny area

表 3 测试变量和仪器

Table 3 Measure parameters and instruments

变量	测试仪器
空气温度/相对湿度	BOBO Pro V2 U23 温湿度自记录仪
风速/风向	HD32.3 热指数仪
黑球温度	HD32.3 热指数仪
皮肤温度	iButton 纽扣温度计
血压心率	欧姆龙血压计(HEM-7124)
体核温度	欧姆龙体核温度计(MC-510)

皮肤温度的监测采用文献[17]中的 7 点测试方法,监测额头、手腕、手背、腹部、大腿、小腿和脚背温度的连续变化。动态环境参量的获得方法为:用电动三轮车装载测试仪器,在实验中跟受试者一起保持相同的活动状态,获得与受试者所处环境一致的动态环境参量,实验设备的设置如图 4 所示。



图 4 实验设备设置

Fig.4 Setting of instruments

1.4 实验过程

实验过程中,受试者统一服装,按照图 5 所示流程进行实验。实验开始之前在可控房间静坐 30 min,受控室温度维持在 24 ℃,室内风速为 0 m/s, MRT 值为 24 ℃,所有环境参数维持稳定。实验开始时记录受试者皮肤温度、体核温度、血压、心率等

生理量指标。实验开始后,受试者在实验场地中面朝太阳方向,每隔 5 min 记录一次皮肤温度、体核温度和血压心率等生理量指标。参照标准 ANSI ASHRAE Standard 55—2017,受试者在站立状态时的新陈代谢量取 70 W/m²,行走速度为 1.2 m/s 时的新陈代谢量取 150 W/m²。

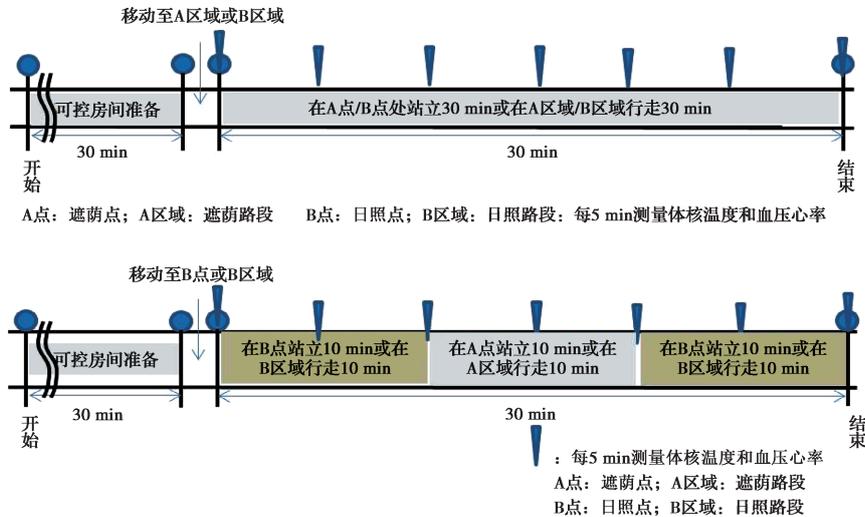


图 5 各工况测试进程

Fig.5 schedule of the cases

1.5 测试结果

各工况中的环境参数与受试者生理量变化如图 6 所示。

工况 1:遮荫处站立。受试者由受控间到遮荫区域站立,平均皮肤温度呈下降趋势,下降幅度为 1 ℃左右;平均体核温度呈曲折上升趋势,变化幅度为 0.4 ℃左右;平均血压和心率都比较平稳,说明此工况下受试者血流变化量小,通过皮肤层散热也小。

工况 2:日照处站立。受试者由受控间来到日照区域站立,平均皮肤温度在前 15 min 呈波动上升趋势,之后稍有回落,变化幅度为 2 ℃左右;平均体核温度同样呈波动上升状态,波动幅度为 0.5 ℃左右。受试者最高血压、最低血压以及心率都高于没有太阳辐射的工况 1,说明在有太阳辐射的情况下,受试者血流速率增大,通过血液的流动将更多的体内产热传到皮肤层散发出去。

工况 3:遮荫处行走。受试者由受控间来到遮荫区域以 1.2 m/s 行走,平均皮肤温度在前 10 min 下降较快,之后趋于平稳,变化幅度接近 2 ℃;平均体核温度同样呈波动上升趋势,波动幅度为 0.3 ℃左右。血压呈现波动上升的状态,说明受试者肌体血流速率增加,加快了将体内产生的热量通过皮肤层散发出去。

工况 4:日照处行走。受试者由受控间来到日

照区域,以 1.2 m/s 行走,平均皮肤温度在前 5 min 上升较快,之后呈波动状态,变化幅度接近 2 ℃;平均体核温度随着时间的增加逐渐上升,波动幅度为 0.4 ℃左右。工况 4 的血压和心率都高于工况 3 的状态,且波动幅度更大,说明此工况下受试者体内积累了更多的热量,身体通过调节增加血流速率和心跳速率,将体内热量从皮肤层散发出去。

工况 5:环境交替变化站立。受试者走出受控间,在日照-遮荫-日照区域交替站立 10 min,皮肤温度随着环境的改变变化明显,在日照区域皮肤温度逐渐升高,在遮荫区域皮肤温度逐渐降低。受试者体核温度值随环境 MRT 的增大而上升,随环境 MRT 的减小而下降,波动幅度较大。受试者血压值呈现与工况 1、工况 2 相同的状态,即在太阳辐射较强区域升高,在太阳辐射较弱区域回落。

工况 6:环境交替变化行走。受试者走出受控间,在日照-遮荫-日照区域交替行走 10 min,皮肤温度变化趋势与工况 5 一致,由于受较大相对风速和较高的出汗量的影响,变化幅度略小于工况 5。受试者的体核温度变化规律与工况 5 基本一致,但体核温度值要高于工况 5。同样,在步行状态下,受试者的血压和心率都比站立状态下要高,在日照区域,血压有升高趋势;在遮荫区域,血压有下降趋势。

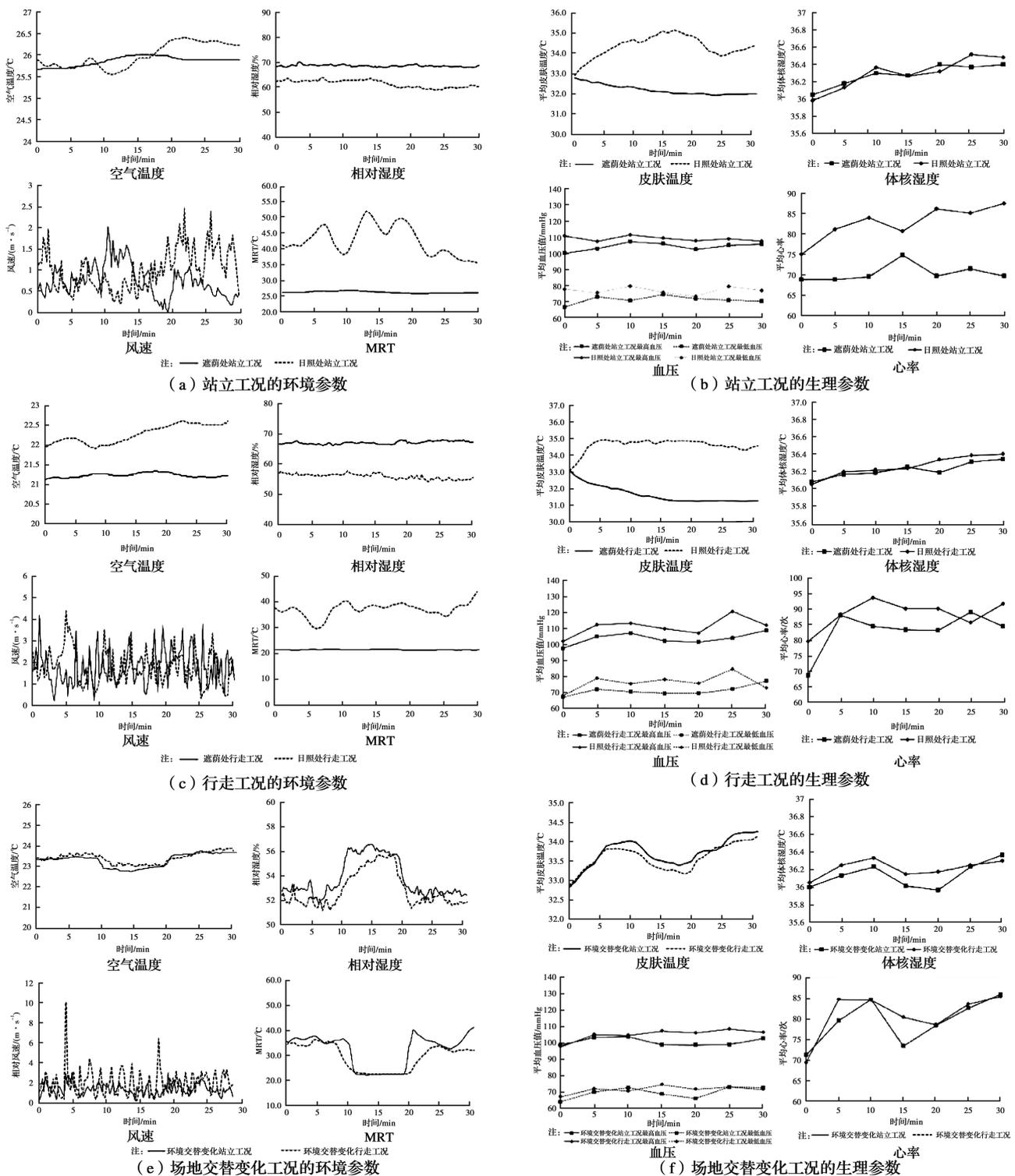


图 6 各工况环境参数和生理参数

Fig.6 Environmental parameters and physiological parameters of the cases

2 二节点模型的适应性验证及修正

2.1 二节点模型模拟精度分析

为验证二节点模型(2NM)在湿热地区室外动态环境中的预测精度,用模型对受试者生理量数据进行预测,将预测值(模拟输出结果)与观测实验实测生理量数据值进行比较,二节点模型的输入为室外热环境的 4 个环境

参量:空气温度、相对湿度、风速、MRT 值和 2 个人体相关参量:服装热阻、人体代谢率,分析过程如图 7 所示。

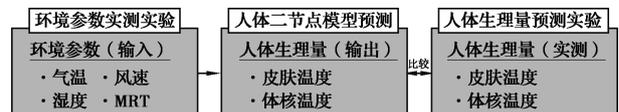


图 7 模型验证流程

Fig.7 schedule of Verification

皮肤温度和体核温度的实测值与二节点模型的模拟值分别如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 可以看出,二节点模型的预测值均高于热反应实验的实测值,这与日本东北大学实测实验结果类似^[12],该实验的 4 个工况条件下,受试者在可控房间内的平均皮肤温度实测值和二节点模型模拟值如表 4 所示。

由表 4 可知,工况 1 中实测值与模拟值之差最小,选择该工况,采用式(2)做 t 检验,分析实测值与模拟值之间是否存在显著性差异。

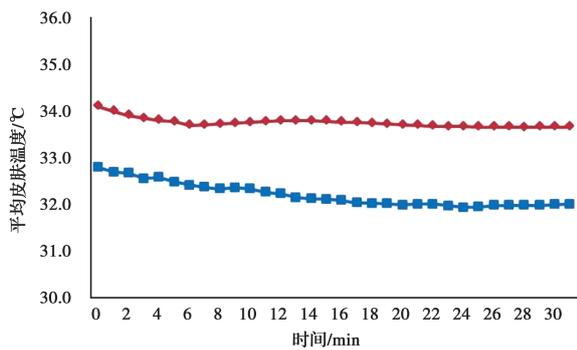
$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为平均样本量; S 为样本的标准偏差值; μ_0 为已知整体平均数,取为预测平均值。

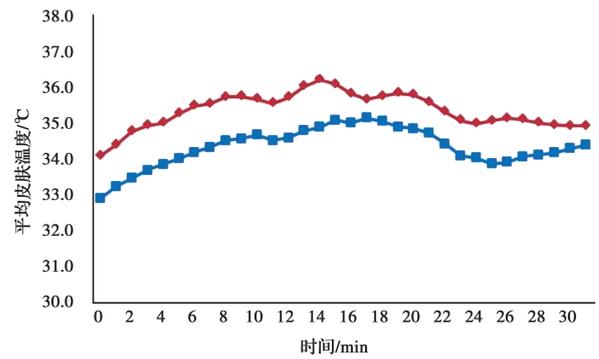
表 4 实测平均皮肤温度值、体核温度值和 2NM 模型预测值对比

Table 4 Comparison of predicted skin temperature and measured values

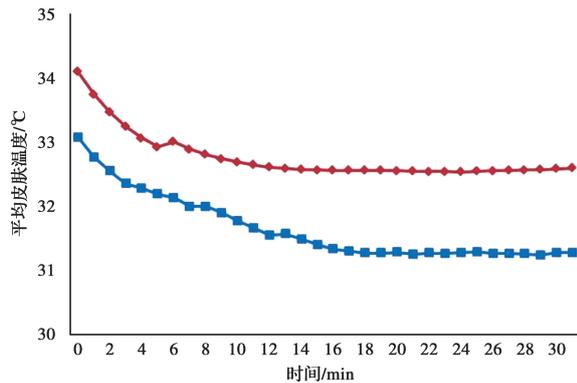
工况	实测平均皮肤温度值/°C	2NM 预测平均皮肤温度值/°C
1	33.49	34.15
2	33.52	34.21
3	32.50	33.79
4	33.61	34.28



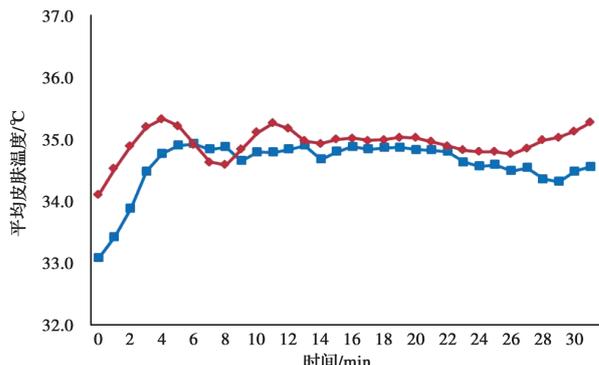
注: — 工况1: 实测值 — 工况1: 2NM模拟值
(a) 工况1 无太阳直射辐射处站立



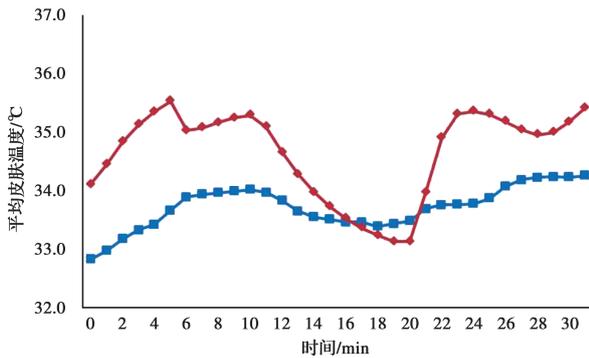
注: — 工况2: 实测值 — 工况2: 2NM模拟值
(b) 工况2 无太阳直射辐射处站立



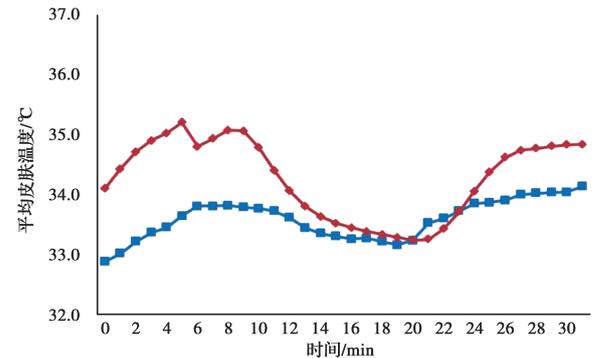
注: — 工况3: 实测值 — 工况3: 2NM模拟值
(c) 工况3 无太阳直射辐射处行走



注: — 工况4: 实测值 — 工况4: 2NM模拟值
(d) 工况4 太阳直射辐射处行走



注: — 工况5: 实测值 — 工况5: 2NM模拟值
(e) 工况5 交替变化场地中站立



注: — 工况6: 实测值 — 工况6: 2NM模拟值
(f) 工况6 交替变化场地中行走

图 8 修正前各工况皮肤温度模拟值与实测值比较

Fig.8 Comparison of predicted skin temperature and measured values before revised

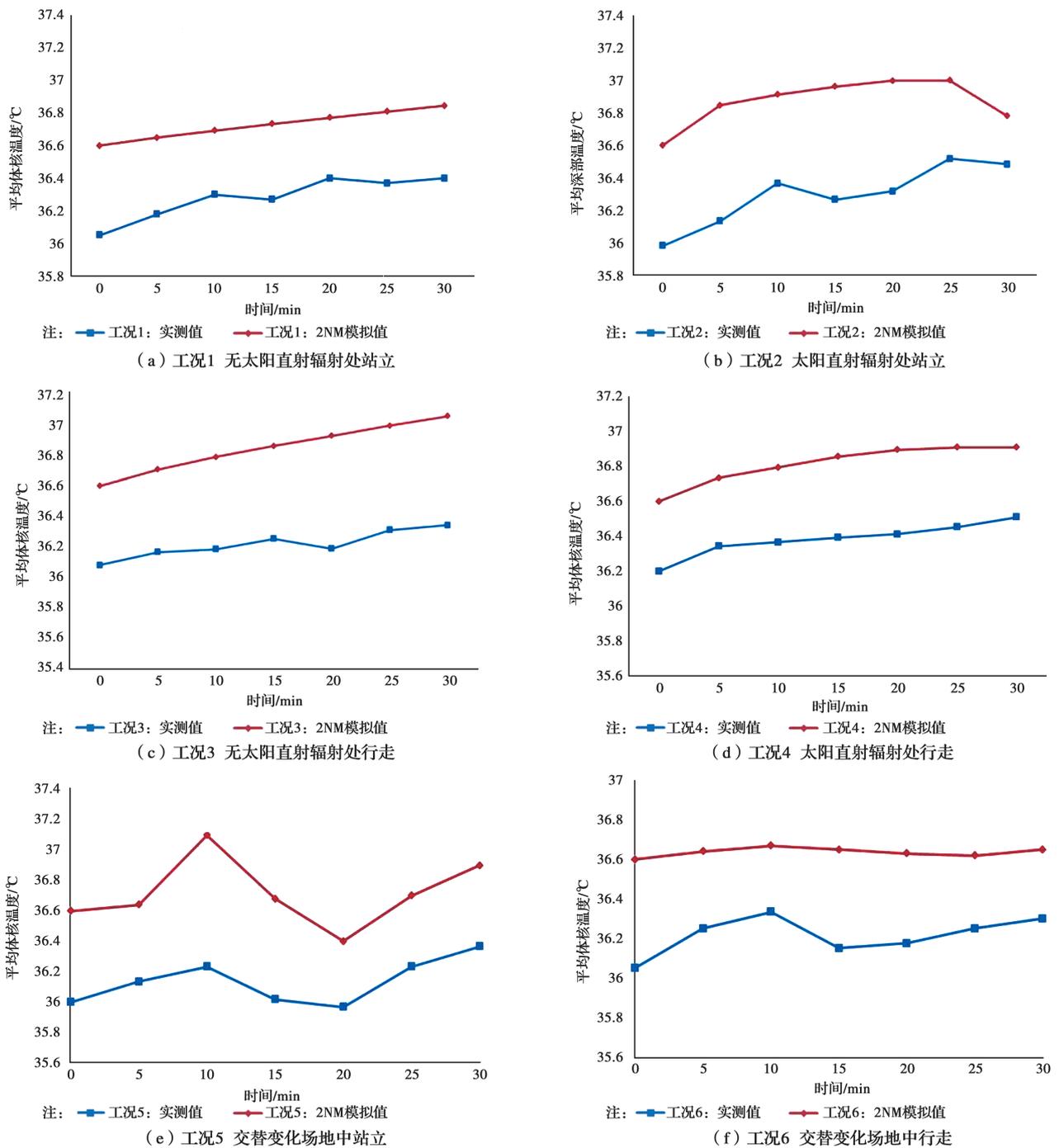


图 9 修正前各工况体核温度模拟值与实测值比较

Fig.9 Comparison of predicted core temperature and measured values before revised

通过对工况 1 受试者平均皮肤温度实测值和二节点模型的预测值做 t 检验, 根据结果查表, 得出检验概率 $P < 0.05$, 存在显著性差异。由于工况 1 中实测值与模拟值之差最小, 因此, 可得出所有工况均存在显著性差异。

2.2 二节点模型的吻合度检验

亚洲人作为受试者的人体热反应存在二节点模型预测值高于实测值的现象。Gagge^[6]的附件中给出了二节点模型的 FORTRAN 程序代码, 由代码可得其热反应实验于室内稳态环境中进行, 人体模型

采用的是欧美白种人人体标准模型。为验证此模型应用到室外动态环境的人体热反应实验, 且受试者为黄种人时, 模型是否需要修正, 基于实验数据对亚洲受试者二节点模型生理量预测值和实测值做了吻合度检验。

吻合度评价价值 C 的计算式如式(3)。

$$C = \sqrt{\frac{\sum_i (Y_i - y_i)^2}{\sum_i \sigma_i^2}} \quad (3)$$

式中: Y_i 为 i 时刻二节点模型的预测值; y_i 为 i 时刻

热反应实验的实测值; \sum_i 为 i 时刻热反应实验实测值标准偏差。

对 C 值进行计算,当 $C > 1.2$ 时,表示二节点模型预测值和热反应实验实测值不相吻合;当 $0.8 \leq C \leq 1.2$ 时,表示二节点模型预测值和热反应实验实测值在标准偏差范围内吻合;当 $C < 0.8$ 时,表示二节点模型预测值和热反应实验实测值之间吻合度高。如果二节点模型预测值和热反应实验实测值之间的吻合度较低或者不相吻合,则需对二节点模型进行修正,以提高适用性。

计算得到的 6 个工况条件下皮肤和体核温度的二节点模型预测值及热反应实验实测值之间的吻合度 C 值如表 5 所示。

由表 5 中吻合度判断可知,在室外动态环境中应用二节点模型时,需要对其进行修正。

表 5 未修正模型吻合度检验

Table 5 Match test before revised

类型	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
皮肤温度吻合度	6.18	2.87	2.20	1.11	3.19	2.56
皮肤温度吻合度判定	×	×	×	□	×	×
体核温度吻合度	3.76	3.38	7.59	4.84	2.31	4.14
体核温度吻合度判定	×	×	×	×	×	×

注:□表示在标准偏差范围内吻合 ($0.8 \leq C \leq 1.2$); × 表示不相吻合 ($C > 1.2$)

2.3 二节点模型的修正过程

将二节点模型 FORTRAN 程序代码^[6]的算法过程、相关数学表达式的生理量取值与实验相应过程及相关生理量实测值进行比对分析,发现模型算法的预测流程与本实验在以下方面存在差异,具体为:受试者皮肤和体核调定温度、人体标准模型取值、肌体启动体温调节时的环境温度值、人体与环境之间的对流换热系数取值。因此,需要对此 4 个方面取值进行修正,修正过程如下:

1) 6 个实验工况受试者初始皮肤温度平均值为 $32.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始体核温度平均值为 $36.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,二节点模型相应取值为初始体核温度值 $34.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、初始体核温度值 $36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明亚洲黄种人皮肤、体核温度的调定点与欧美白种人之间存在差异,需对模型相应取值进行修正,分别为 32.9 、 $36.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 目前缺乏中国人标准人体模型数据。实验中,受试者平均体重为 63.8 kg ,平均身高为 1.66 m ,平均人体表面积为 1.8 m^2 。二节点模型中相应取值采用了白种人标准人体模型数据,即体重 81.7 kg ,

身高 1.77 m ,人体表面积 2.0 m^2 。由黄种人和白种人之间的差异性可知,需对相应取值进行修正,采用实验受试者平均值。

3) 二节点模型基于室内可控环境开发,没有受到太阳辐射的影响,当空气温度达到一定高度时,受试者肌体就会自动启动体温调节功能。热反应实验选取的场所为有太阳辐射影响的室外动态环境,在辐射影响下,人体启动调节的驱动温度值应考虑太阳辐射影响,因此,对二节点模型进行修正,将受试者肌体自动启动体温调节功能的驱动温度值由空气温度 T_a 改为受试者所处环境的平均辐射温度 MRT。

4) 二节点模型基于室内可控环境开发,不用考虑风速的影响,人体与环境之间的对流换热系数 h_c 取值为查表获得的常量,以步行状态为例其取值为 $10.00\text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。实验场地为室外动态环境,风速时刻变化,受试者与环境之间的对流换热系数跟瞬时相对风速密切相关,因此,需对对流换热系数的取值方法进行修正,修正方法按式(4)^[17]进行。

$$h_c = 4.0 V_a + 0.35 V_a \cdot \beta - 0.00080(V_a \cdot \beta)^2 + 3.4 \quad (4)$$

式中: V_a 为场地内各节点风速, m/s ; β 为场地内乱流度,由式(5)计算得到。

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (V_p - V_i)^2}{n-1}}}{V_p} \quad (5)$$

式中: V_p 为场地内风速平均值, m/s ; V_i 为场地内各节点风速值, m/s 。

2.4 修正后二节点模型的吻合度检验

将二节点模型(简称为 Re2NM)进行修正后,对修正后模型的预测精度进行吻合度检验。实测值与 Re2NM 对人体皮肤、体核温度的预测值比较如图 10、图 11 所示。

修正之后的二节点模型皮肤温度和体核温度模拟值吻合度检验见表 6。

表 6 修正后吻合度检验

Table 6 Match test after revised

类型	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
皮肤温度吻合度	0.79	0.78	0.44	0.48	0.58	0.41
皮肤温度吻合度判定	√	√	√	√	√	√
体核温度吻合度	0.07	0.51	0.67	0.35	0.16	0.59
体核温度吻合度判定	√	√	√	√	√	√

注:√表示吻合度高 ($C < 0.8$)

由表中吻合度判定可知,6个工况的 Re2NM 对受试者皮肤温度、体核温度模拟值与实测值具有高吻合度,由此可知,修正后人体二节点模型

对中国湿热地区室外环境中人体变化的生理量预测具有适应性,可用于该地区人体变化生理量的预测。

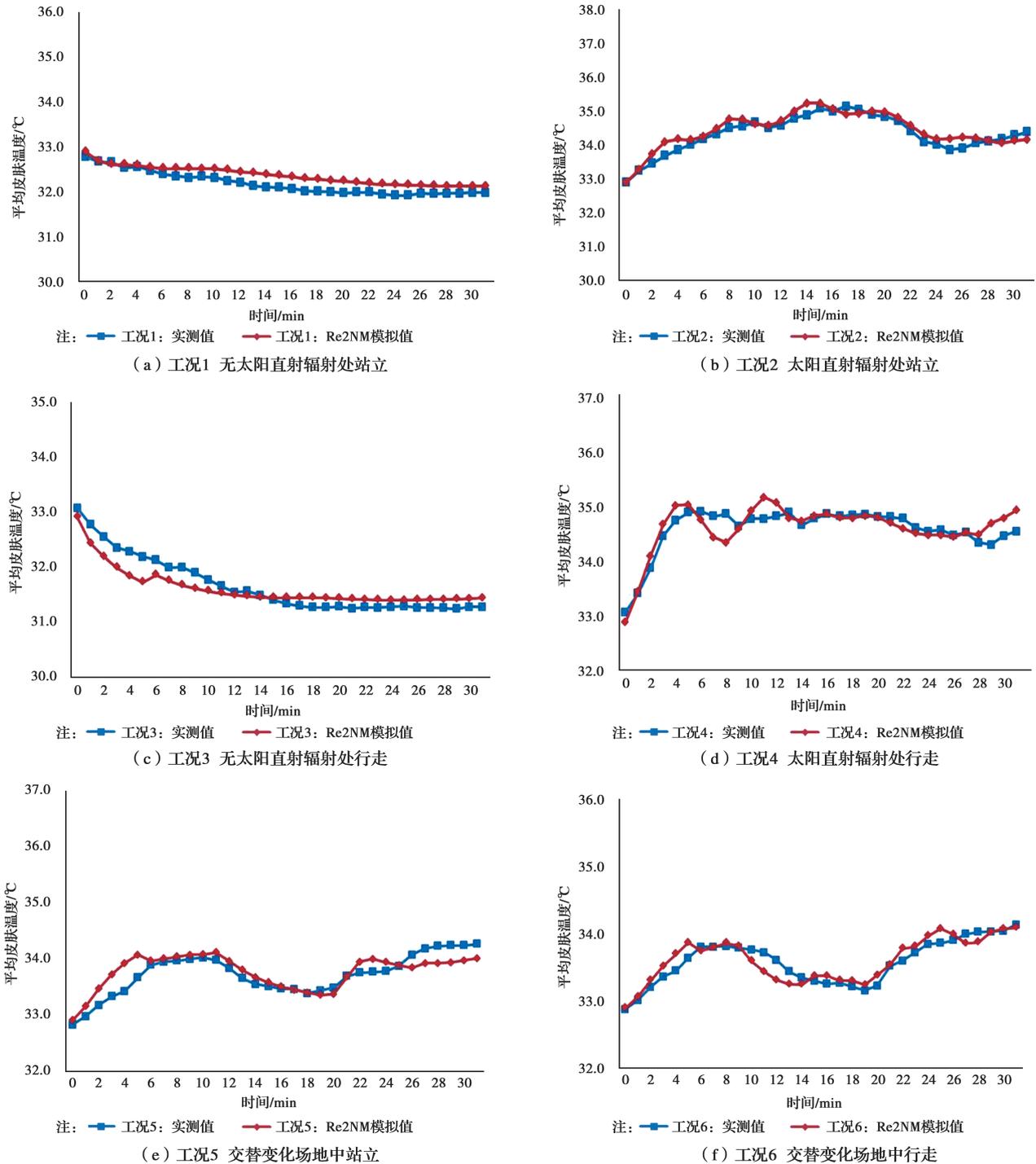


图 10 修正后各工况皮肤温度模拟值与实测值比较

Fig.10 Comparison of predicted skin temperature and measured values after revised

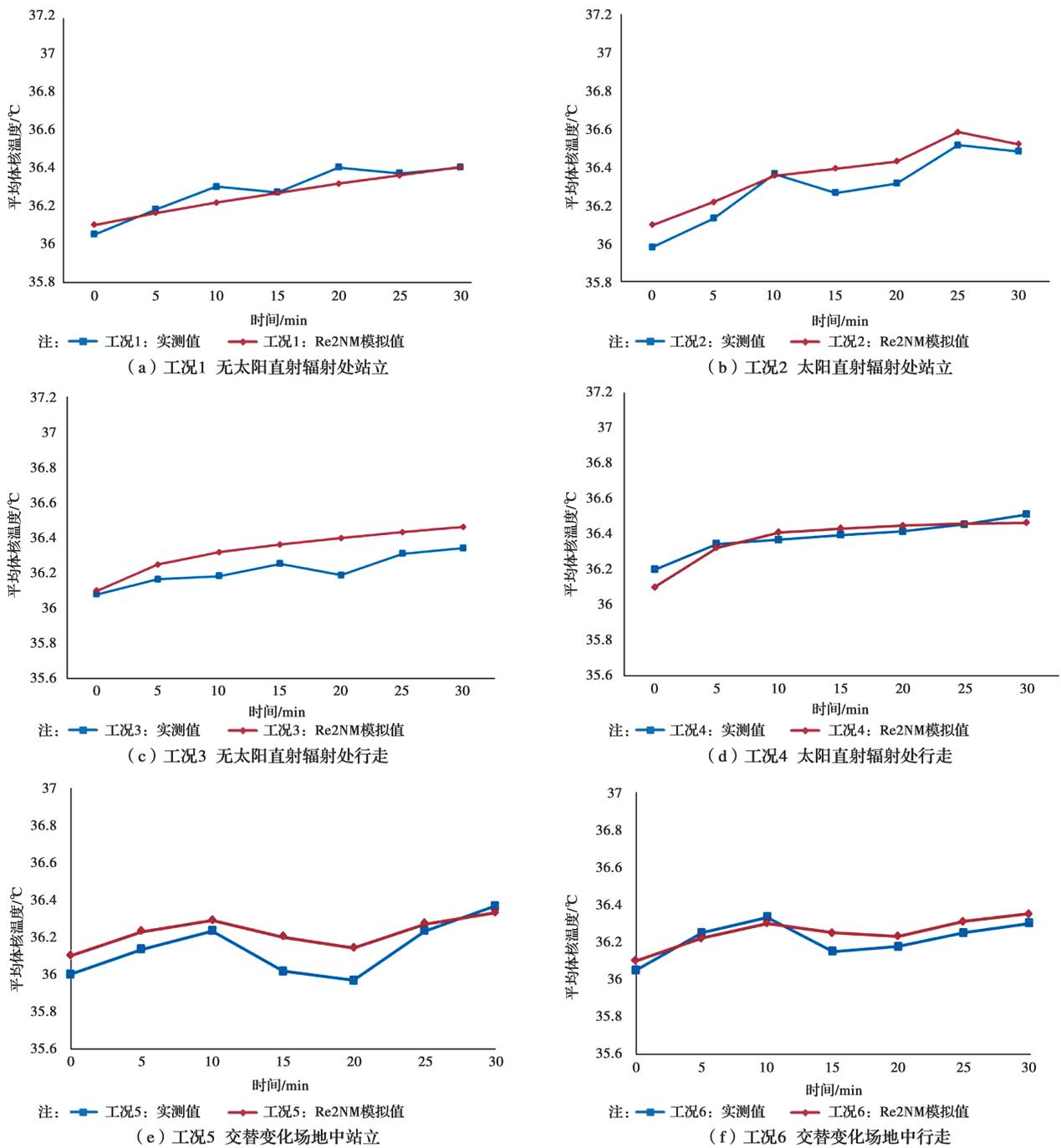


图 11 修正后各工况体核温度模拟值与实测值比较
Fig.11 Comparison of predicted core temperature and measured values after revised

2.5 讨论

二节点模型由 Gagge 基于室内可控稳态环境开发,受试者均为欧美白种人,模型的所有数参量基于欧美白种人人体标准体型确定取得,并写入模型软件的相关数学计算式中。同样,由于试验场地为室内可控环境,人体与环境之间的对流换热系数值为常数,具体取值根据人体的活动状态进行查表获得。因此,在其他不同状态环境中应用 Gagge 的二节点模型,或受试者为其他与欧美白种人存在差异的人种时,为保证实验预测精度,需要对二节点模型的相

关计算过程和取值进行修正。

笔者从受试者皮肤和体核调定温度、人体标准模型身高、体重和体表面积值、引起肌体启动体温调节的环境温度值、人体与所处环境之间的对流换热系数取值等方面,在 Gagge 的原始二节点模型 FORTRAN 语言计算程序基础上进行了修正,同时写成 EXCEL 程序进行验证。修正方法为:

- 1)将原始程序中相关人体常量定义成可赋值变量。
- 2)将人体与所处环境之间的对流换热系数有常

量替换为数学表达式并增补进程序中。

通过上述修正方式,得到的模型实现了模型程序的通用性,消除了样本量不足时预测精度不高的局限性:当热反应实验场地改变或受试者数量改变时,只要按要求输入相应的环境参数和受试者参数,就可以保证预测的精度。

3 结论

1)受试者在零风速的受控室生理特征趋于平稳,之后进入无太阳直射辐射的室外环境,受场地内自然风的影响,人体与环境之间的对流换热系数增加,加快了人体与环境之间的对流换热速度,皮肤表面水份加速蒸发致使皮肤的表面温度下降,之后在人体的体温调节作用下皮肤的表面温度趋于平稳。当人体从无风受控室进入太阳直射辐射区域时,高平均辐射温度(MRT)使皮肤温度上升,之后人体进行体温调节,皮肤温度趋于平稳,当平均辐射温度(MRT)降低时,平均皮肤温度有下降趋势,之后人体进行体温调节,皮肤温度趋于平稳。

2)站立或行走状态下,受试者的体核温度都明显受所处环境平均辐射温度(MRT)影响,在平均辐射温度(MRT)较高环境中上升较快,在平均辐射温度(MRT)较低环境中呈缓慢上升。当受试者所处场地环境改变时,在平均辐射温度(MRT)值较高的区域,皮肤温度、体核温度、血压和心率都呈上升趋势,在平均辐射温度(MRT)值较低的区域呈下降趋势。

3)Gaage 的人体二节点模型应用到黄种人的生理量预测时,模型预测值普遍高于实测值,预测值和模拟值吻合度不高或不相吻合。

4)当受试者为非欧美白种人或实验环境改变时,需对 Gaage 的人体二节点模型进行修正,修正的内容包括:皮肤、体核调定温度、人体标准模型身高、体重和体表面积值、引起肌体启动体温调节的环境温度值、人体与所处环境之间的对流换热系数取值。为保证修正模型的通用性,在模型的计算程序中,相关参数和调节过程不应写成常量,而应写成可赋值的变量或数学表达式。

参考文献:

- [1] 谈建国, 郑有飞. 我国主要城市高温热浪时空分布特征[J]. 气象科技, 2013, 41(2): 347-351.
TAN J G, ZHENG Y F. Temporal and spatial distribution characteristics of high temperature heat waves in major cities of China [J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(2): 347-351. (in Chinese)
- [2] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 上海城市集群化发展显著增强局地高温热浪事件[J]. 气象学报, 2015(6): 1104-1113.
XIE Z Q, DU Y, ZENG Y, et al. The exacerbated intensity and duration of the heat waves events over Shanghai as caused by urban clusters expansion [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015(6): 1104-1113. (in Chinese)
- [3] 罗晓玲, 杜尧东, 郑璟. 广东高温热浪致人体健康风险区划[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(2): 139-146.
LUO X L, DU Y D, ZHENG J. Human health risk zone by high temperature wave in Guangdong [J]. Climate Change Research, 2016, 12(2): 139-146. (in Chinese)
- [4] SAILOR D J. Risks of summertime extreme thermal conditions in buildings as a result of climate change and exacerbation of urban heat islands [J]. Building and Environment, 2014, 78(4): 81-88.
- [5] GAGGE A P, STOLWIJK J A J, HARDY J D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures [J]. Environmental Research, 1967, 1(1): 1-20.
- [6] GAGGE A P, STOLWIJK J, NISHII Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [J]. ASHRAE Transactions, 1971, 77: 247-262.
- [7] JONES B W, OGAWA Y. Transient interaction between the human body and the thermal environment [J]. ASHRAE Transactions, 1992, 98: 189-195.
- [8] 敖顺荣. 瞬变热环境下人体的热反应及预测[D]. 北京: 清华大学, 1995.
AO S R. Thermal response and prediction of human body under transient thermal environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 1995. (in Chinese)
- [9] TAKADA S, SAKIYAMA T, MATSUSHITA T. Validity of the two-node model for predicting steady-state skin temperature [J]. Building & Environment, 2011, 46(3): 597-604.
- [10] 张军. 湿热地区瞬变热环境下人体热反应实验与预测 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
ZHANG J. Human responses to transients thermal environments in hot-humid area of China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] MELNIKOV V, KRZHIZHANOVSKAYA V V, LEES M H, et al. System dynamics of human body thermal regulation in outdoor environments [J]. Building and Environment, 2018, 143: 760-769.
- [12] 長谷川拓真, 石田泰之, 後藤伴延, 等. 暑熱化による健康被害発症リスクに関わる歩行者の生理量予測手法の開発(その1)暑熱環境下における環境条件と生理量の同時測定結果と人体熱生理モデルの精度検証 [C]//日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 日本広島, 2017.
HASEGAWA T, ISHITA Y, GOTO T, et al.

- Prediction method of pedestrian's physiological responses for evaluating the health hazard risk in hot summer conditions (Part 1) Simultaneous measurements of outdoor thermal environment and physiological responses and validation of human thermoregulation models [C]//Conference of Architectural Institute of Japan, Hiroshima, 2017.(in Japanese)
- [13] 新井千秋,長谷川拓真,石田泰之,等.暑熱化による健康被害発症リスクに関わる歩行者の生理量予測手法の開発(その2)人間の歩行を考慮した新たな屋外温熱環境評価手法の開発[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),日本広島,2017.
CHIAKI A, HASEGAWA T, MOCHIDA A, et al. Prediction method of pedestrian's physiological responses for evaluating the health hazard risk in hot summer conditions (Part 2) Development of a new prediction method of outdoor thermal environment of walking pedestrians [C]//Conference of Architectural Institute of Japan, Hiroshima, 2017.(in Japanese)
- [14] 千葉友樹,後藤伴延.人体熱モデルの血流の再現方法による局所加温時の体温予測の違いに関する検討[J].空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2013, 6: 5-8.
- CHABA Y, GOTO T. Study on the impact of blood flow modeling method upon simulated human body temperature under a locally heated condition [J]// Journal of Air- Conditioning and Sanitation Engineering of Japan, 2013, 6: 5-8.(in Japanese)
- [15] 陈卓伦.绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D].广州:华南理工大学,2010.
CHEN Z L. Research of vegetation system's effects on outdoor thermal environment of residential communities in hot humid climate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.(in Chinese)
- [16] HARDY J D, DU BOIS E F, SODERSTROM G F. The technic of measuring radiation and convection[J]. The Journal of Nutrition, 1938, 15(5): 461-475.
- [17] ONO T, MURAKAMI S, OOKA R, et al. Proposal of the formula for mean convective heat transfer coefficient of a human body by means of wind tunnel and CFD analysis [J]. Journal of Environmental Engineering(Transactions of AIJ), 2006 (601): 9-14.

(编辑 胡玥)