

DOI:10.11784/tdxbz202311007

活动强度、服装、温湿度参数影响下的 能量代谢率实验研究

张欢¹, 刘宪泽¹, 张安¹, 叶天震¹, 那艳玲²

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300300)

摘要: 能量代谢率作为影响人体热舒适的重要参数, 其自身与许多因素相关. 本研究以活动强度和服装两个人体行为因素以及温度和湿度两个外界环境因素为变量开展实验, 并进一步讨论了它们对能量代谢率的影响. 实验结果表明, 活动强度在由静坐增加至 2 km/h 静走以及后续步行速度每次增加 2 km/h 后, 人体的能量代谢率并不立即突变, 而是会经历一个上升期, 后在 5 min 之内趋于稳定, 稳定后的能量代谢率数值随活动强度的增加而显著上升 ($p < 0.001$). 温度对人体能量代谢率影响存在差异, 这与活动强度相关, 当人体处于较低活动强度时, 冷或偏凉环境下温度的变化更能影响到能量代谢率, 而在偏暖或热环境下温度的变化对其没有显著影响; 恰恰相反的是, 当人体处于较高活动强度时, 偏暖或热环境下温度的变化更容易对能量代谢率产生影响, 而在冷或偏凉环境下温度的变化则不容易对其产生影响. 对于在寒冷环境下以较低活动强度运动的受试者, 穿着更厚的服装可以起到保暖作用, 降低了其能量代谢率. 然而不同环境湿度下受试者的能量代谢率几乎没有差异 ($p > 0.050$), 对于静坐和 2 km/h、4 km/h 和 6 km/h 的静走活动, 50%和 60%湿度工况代谢率分别平均相差 0.8%、1.6%、2.5%和 1.8%; 60%和 80%湿度工况代谢率分别平均相差 4.5%、1.4%、1.7%和 1.5%; 50%和 80%湿度工况代谢率分别平均相差 5.2%、2.3%、2.2%和 1.5%, 即环境湿度对人体的能量代谢率的影响很小. 研究结果对阐明能量代谢率与行为因素和热环境之间的关系具有重要意义.

关键词: 能量代谢率; 活动强度; 服装热阻; 环境温度; 环境湿度

中图分类号: TU83 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2024)12-1280-09

Experimental Study on the Metabolic Rate Influenced by Activity Intensity, Clothing, Temperature, and Humidity

Zhang Huan¹, Liu Xianze¹, Zhang An¹, Ye Tianzhen¹, Na Yanling²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. China Railway Design Corporation, Tianjin 300300, China)

Abstract: The metabolic rate, a key factor in determining thermal comfort, is influenced by many factors. In this study, the impacts of four variables on metabolic rate were examined: two human behavioral factors (activity intensity and clothing) and two external environmental factors (temperature and humidity). Results revealed that the metabolic rate did not vary immediately following an increase in activity intensity, such as transitioning from sitting to walking at 2 km/h or increasing walking speed (2 km/h each time). Instead, it took approximately 5 min for the metabolic rate to stabilize. Once steady, an increase in activity intensity led to a corresponding rise in metabolic rate, a correlation that is statistically significant ($p < 0.001$). The effect of ambient temperature on the metabolic rate was tied to the level of activity. For instance, while at lower activity intensities, changes in temperature in cold or cool environments could affect the metabolic rate. However, in warm or hot environments, temperature changes did not significantly affect it. This was dynamically flipped when the body was engaged in higher-intensity activities; in

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-01-19.

作者简介: 张欢 (1960—), 女, 博士, 教授.

通信作者: 张欢, zhuan@tju.edu.cn.

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划资助项目 (L2021G011).

Supported by the Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co., Ltd. (No. L2021G011).

these cases, temperature changes in warm or hot environments could affect the metabolic rate, but those in cold or cool environments do not. Moreover, individuals exercising at low activity intensities in cold environments could reduce their metabolic rate by wearing thicker clothing, thereby providing additional warmth. By contrast, variations in ambient humidity did not significantly impact the metabolic rate ($p > 0.050$). To illustrate, for sitting and 2-, 4-, and 6-km/h walking activities, the mean differences in the metabolic rate between 50% and 60% humidity conditions were 0.8%, 1.6%, 2.5%, and 1.8%, respectively. The mean differences between 60% and 80% humidity conditions were 4.5%, 1.4%, 1.7%, and 1.5%, respectively. The mean differences between 50% and 80% humidity conditions were 5.2%, 2.3%, 2.2%, and 1.5%, respectively. This suggests that the influence of humidity on metabolic rate is relatively insignificant. In conclusion, these results provide valuable insights into the complex interplay between thermal environment, behavioral factors, and metabolic rate.

Keywords: metabolic rate; activity intensity; clothing insulation; ambient temperature; ambient humidity

能量是驱动生命活动的动力,在物质代谢过程中伴随着能量的释放、转移、贮存和利用称为能量代谢^[1].体内各种能源物质氧化释放能量,50%以上迅速转化为热能,以维持体温,其余以高能磷酸键的形式贮存于三磷酸腺苷中.机体利用这部分能量完成各种生理活动,除骨骼肌运动完成的机械外功以外,最终都转变为了热能.因此,ASHRAE Standard 55-2020^[2]将能量代谢率定义为生物体内新陈代谢将化学能转化为热能和机械外功的速率.

影响能量代谢率的因素有很多,一类是个体差异,另一类是动态变化^[3].个体差异指的是由种族^[4]、性别^[5-7]和年龄^[8-12]等个人因素所造成的差异;动态变化主要是指由于人体行为因素和外界环境因素影响的改变造成的差异.活动强度对能量代谢率的影响最为显著,人体在劳动或运动时,机体的耗氧量增多,能量代谢率显著增加.环境因素包含空气温度、湿度、平均辐射温度、风速等,这些参数对能量代谢率的影响研究^[13-18]也成为了近些年来研究热点.Yang等^[13]对身着0.6 clo服装的40名大学生在14~34℃的环境下静坐时的能量代谢率进行了测量,发现环境温度对其产生了显著影响,在24℃、26℃时,其能量代谢率达到最低值.Anand等^[14]在16℃、26℃、36℃的环境下对24名受试者处于不同活动强度的能量代谢率进行了测量,研究发现环境温度对静坐、站立能量代谢率没有影响,而对2 km/h、4 km/h运动的能量代谢率产生了显著影响,36℃时最高,16℃时最低;此外,Anand等^[14]还在24℃下对比了处于40%、60%相对湿度环境下受试者的能量代谢率的数值,发现湿度对2 km/h、4 km/h运动的能量代谢率产生了显著影响,更高的湿度会提高人的能量代谢率.Luo等^[15]也做了类似的研究,发现处于16℃受试者的能量代谢率较26℃环境高出15.8%.Sun等^[16]发现在30~40℃范围内,能量代谢率随环境温度的上升而增加.然而,在先前的大多数

研究中,即使环境温度的变化范围达到20℃,受试者也不被允许改变自身的服装热阻,而服装调节是人的一个自适应的过程,人们在不同的热环境下,很善于调整自身的服装^[19-20].因此,在研究环境因素对人体能量代谢率影响时,需要对人的服装调节加以考虑.

综上,以往的有关动态变化对能量代谢率影响的研究都低估了服装热阻的作用,进而很少有研究关注到活动强度、服装热阻这两个人体行为因素以及环境温度、环境湿度这两个外界环境因素耦合下的能量代谢率的影响研究.因此,本研究在4个活动强度水平、4个服装热阻水平、3个环境湿度水平和10个环境温度水平下开展实验研究,讨论了它们对能量代谢率的影响.研究结果对阐明能量代谢率与热环境的关系具有重要的意义.

1 方法

1.1 实验原理

图1展示了人体中能量的去路,能量代谢率是生物体内新陈代谢将化学能转化为热能和机械外功的速率,在机体不对外做功时,能量均以热量的形式释放到外界环境之中去.人体通过对流、辐射以及质交换等形式源源不断地向外界释放热量,一些行为因素(如活动强度、服装热阻)和一些环境参数(如环境温度、湿度)均与人的能量代谢率有着一定的联系.因此,本研究以实验的方式讨论它们对能量代谢率的影响.

1.2 受试者

为了减少个体差异对能量代谢率的影响,本研究招募的10名受试者均来自天津大学的男大学生,所有受试者都没有心血管疾病,也没有抽烟的习惯,并且每次参加实验都会支付一定的酬劳.实验开始之前,对他们的身高、体重和年龄等基本信息进行了收集(身高:(1.74 ± 0.05) m,体重:(68.0 ± 7.7) kg,年

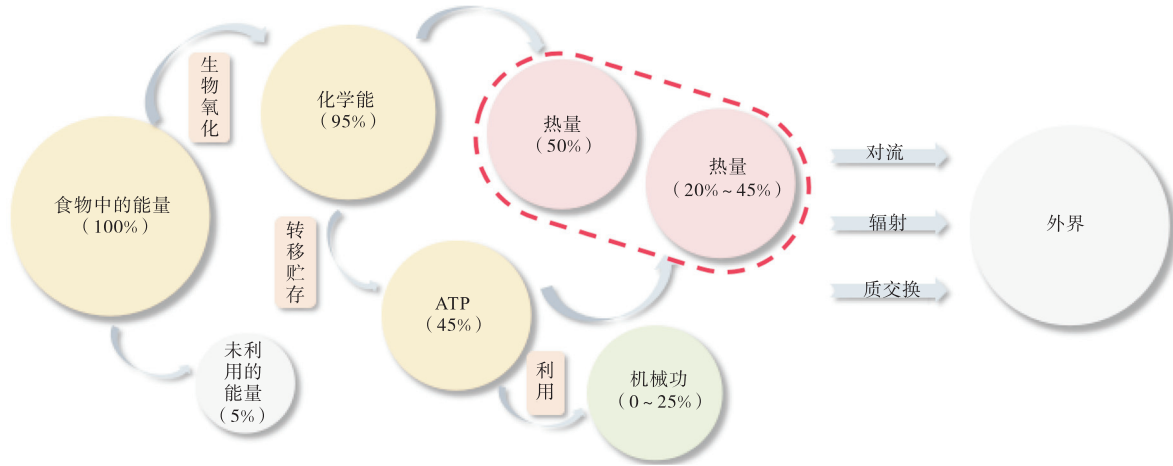


图 1 人体中能量去路

Fig.1 Energy pathways in the human body

龄: 22.9 ± 1.2 , 体表面积: $(1.82 \pm 0.12) \text{ m}^2$). 其中, 体表面积是由 Dubois 公式^[21]估算得到的, 即

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

式中: A 为体表面积; W 为受试者质量; H 为受试者身高.

1.3 实验设备

本研究使用了天津大学的人工环境仓, 这是一个 $4 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的仓室, 仓内空气温度由精密空调控制, 上部出风, 右侧回风, 其控制范围为 $-20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$, 精度为 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$; 相对湿度由加湿器以及转轮除湿装置控制, 其控制范围为 $20\% \sim 80\%$, 精度为 $\pm 10\%$. 在实验开展过程中, 分别在仓内距地面高度为 0.5 m 、 1.0 m 、 1.5 m 与 2.0 m 处布置温湿度记录仪 (UX100-011A) 对空气温度与相对湿度进行实时检测, 其精度分别为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2.5\%$. 使用热线风速仪 (Testo 416) 对仓内风速进行测量, 其精度为 $\pm 0.1 \text{ m/s}$. 整个实验过程中的舱内风速均小于 0.1 m/s .

使用便携式代谢分析仪对受试者的能量代谢率进行测量. 仪器内部传感器类型、测量范围及精度见表 1, 每次使用设备前需进行气压、 O_2 浓度、 CO_2 浓度以及流量校准. 其工作原理是采用每次呼吸法, 即测量人体每次呼吸的摄氧量以及二氧化碳排出量, 通过经验公式计算得到人体的能量代谢率^[22], 即

$$\text{RQ} = V_{\text{CO}_2} / V_{\text{O}_2} \quad (2)$$

$$\text{EE} = 5.88 \times (0.23\text{RQ} + 0.77) \quad (3)$$

$$\text{MET} = \text{EE} \cdot V_{\text{O}_2} / A \quad (4)$$

式中: V_{O_2} 为摄氧量; V_{CO_2} 为二氧化碳排出量; RQ 为呼吸熵; EE 为能量当量; MET 为能量代谢率.

1.4 工况设置

本研究设置了 4 种典型服装热阻水平, 并根据 ASHRAE Handbook—Fundamentals (2021)^[23]和 ISO 7730 (2010)^[24]中单件服装热阻进行加和, 得到成套衣物的服装热阻, 服装详细信息列于表 2.

表 1 传感器参数

Tab.1 Sensor parameters

传感器名称	类型	测量范围	精度
流量传感器	数字涡轮式	$\leq 20.1 \text{ L/s}$	$\pm 2\%$
氧传感器	电化学传感器	$0 \sim 100\%$	$< 0.1\%$ (体积分数)
二氧化碳传感器	NDIR	$0 \sim 13\%$	$< 0.1\%$ (体积分数)

表 2 服装描述

Tab.2 Clothing description

衣着编号	详细着装	服装热阻总和
A	内裤, 运动短袖, 短裤, 鞋	约 0.3 clo
B	内裤, 长袖运动衬衫, 长裤(薄), 袜, 鞋	约 0.6 clo
C	内裤, 秋裤, 长袖运动衬衫, 夹克, 长裤(薄), 袜, 鞋	约 1.1 clo
D	内裤, 秋裤, 长袖运动衬衫, 羽绒服(薄), 长裤(厚), 袜, 鞋	约 1.5 clo

实验阶段 1 如图 2 所示. 选取 $6 \sim 33 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为温度的变化范围, 每 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为一个温度水平, 共计 10 种温度水平, 相对湿度设置 30% 保持不变, 受试者身着不同服装在不同温度下参加测试, 服装热阻与温度的组合方式如下所示, 每种服装都对应 4 个不同的温度点. 服装 D: $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $9 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15 \text{ }^\circ\text{C}$; 服装 C: $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $21 \text{ }^\circ\text{C}$; 服装 B: $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $27 \text{ }^\circ\text{C}$; 服装 A: $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $33 \text{ }^\circ\text{C}$. 10 名受试

者都参加了该实验, 时间是 2023 年 4—5 月。

实验阶段 2 如图 3 所示. 受试者需要在 12℃ 时穿着服装 D, 在 18℃ 时穿着服装 C, 在 24℃ 时穿着服装 B 以及在 30℃ 时穿着服装 A 参加实验, 此时相对湿度分别被设置为 50%、60% 和 80%. 有 8 位受试者参加了该实验, 时间是 2023 年 8—9 月。

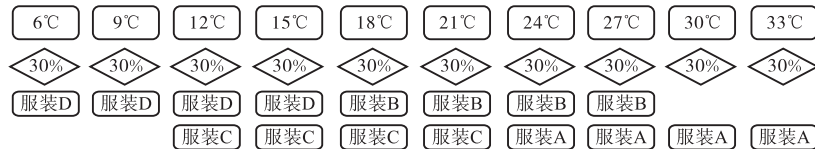


图 2 实验阶段 1

Fig.2 Experimental phase 1

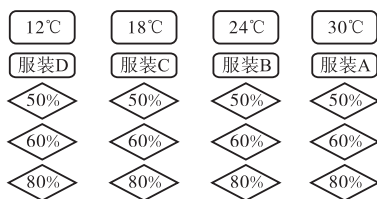


图 3 实验阶段 2

Fig.3 Experimental phase 2



(a) 静坐 (b) 2 km/h 静走 (c) 4 km/h 静走 (d) 6 km/h 静走

图 4 实验实拍

Fig.4 Experimental photographs

1.5 实验流程

为了减少食物对能量代谢率的影响, 每名受试者被要求至少饭后 2 h 参加实验且受试者在参加实验的前一天被禁止摄入酒精和咖啡. 如图 5 所示, 受试者到达实验地点后, 预先穿戴好相应衣物以及便携式代谢分析仪, 后进入调节好的人工环境仓之中. 受试者首先会经历一个 25 min 的静坐以适应环境, 后开启实验仪器对受试者的能量代谢率进行监测, 受试者的活动强度水平被设置为由低到高, 其会经历 1 个 5 min 的静坐期以及 3 个 10 min 的运动期。

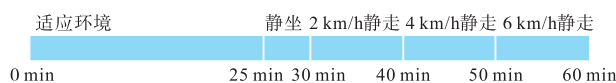


图 5 实验流程

Fig.5 Experimental process

1.6 数据分析

能量代谢率的数据通过了 Shapiro-Wilk 测试, 符

本研究设置了 4 种不同活动强度水平, 分别是静坐和 2 km/h、4 km/h 和 6 km/h 的静走活动, 受试者被要求在各个工况下进行这 4 种活动. 在仓内放置了跑台与座椅, 以实现对人体活动强度的调节. 图 4 展示了处于不同活动强度水平下受试者的实拍图。

合正态分布. 使用 Huynh-Feldt 修正后的重复测量方差分析以及配对样本 *t* 检验的方法进行了统计分析, 显著水平设置为 0.050.

2 结果与讨论

2.1 环境仓环境参数监测值

实验阶段 1 和实验阶段 2 共 28 个工况下的环境仓内环境参数的实际监测值如表 3 所示, 由此可见, 仓内温湿度得到了比较精准的控制。

2.2 能量代谢率随时间的变化

图 6 展示了一名受试者在工况 11 的环境条件下按照实验流程参加一次实验时, 摄氧量、二氧化碳排出量和能量代谢率随时间的变化情况. 由于能量代谢率是由前两者计算得出的, 因此三者随时间的变化情况相似, 受试者的活动强度在由静坐增加至 2 km/h 静走以及后续步行速度每次增加 2 km/h 后, 人体的能量代谢率并不立即突变, 而是会经历一个上升期, 后在 5 min 之内趋于稳定, 稳定后的能量代谢率数值随活动强度的增加而显著上升 ($p < 0.001$), 之前的几项研究也得出了相同的结论^[13-14]. 因此, 本研究取每种活动强度下最后 5 min 能量代谢率的均值作为稳态数据进行统计分析. 在工况 11 的条件下, 静坐活动的能量代谢率为 $(60.3 \pm 8.2) \text{ W/m}^2$, 2 km/h 静走活动增加至 $(115.1 \pm 5.7) \text{ W/m}^2$, 4 km/h 静走活动增加至 $(159.0 \pm 11.0) \text{ W/m}^2$, 6 km/h 静走活动增加至 $(260.5 \pm 31.0) \text{ W/m}^2$.

2.3 环境温度对能量代谢率的影响

图 7 展示了不同环境温度下能量代谢率的数据, 使用了重复测量分析的方法对其进行分析. 当受试者身着服装 D 时, 环境温度的变化对静坐和 2 km/h 静走活动的能量代谢率产生了显著影响 ($p = 0.003$,

表 3 温湿度数据监测值

Tab.3 Monitored values of temperature and humidity

工况	变量	服装	温度/°C	湿度/%
1	温度	服装 D	6.4 ± 0.3	28.9 ± 4.4
2			9.3 ± 0.2	30.5 ± 3.4
3			12.2 ± 0.3	28.4 ± 3.3
4			14.8 ± 0.5	29.2 ± 3.1
5	温度	服装 C	12.3 ± 0.4	30.4 ± 3.9
6			14.9 ± 0.4	29.1 ± 3.3
7			18.0 ± 0.4	29.7 ± 3.0
8			20.9 ± 0.5	35.5 ± 3.3
9	温度	服装 B	17.9 ± 0.5	28.3 ± 2.7
10			20.9 ± 0.4	30.3 ± 3.0
11			23.9 ± 0.4	30.1 ± 2.3
12			27.2 ± 0.5	31.2 ± 2.5
13	温度	服装 A	23.8 ± 0.5	29.9 ± 2.6
14			27.5 ± 0.2	33.0 ± 2.3
15			30.0 ± 0.4	30.2 ± 2.5
16			33.0 ± 0.5	33.1 ± 2.4
17	湿度	服装 D	12.1 ± 0.2	49.4 ± 4.1
18			11.8 ± 0.4	61.8 ± 2.3
19			12.0 ± 0.3	78.8 ± 2.5
20	湿度	服装 C	18.2 ± 0.4	49.7 ± 2.6
21			17.9 ± 0.5	60.0 ± 4.3
22			18.1 ± 0.3	81.1 ± 3.0
23	湿度	服装 B	23.9 ± 0.4	50.2 ± 3.1
24			23.9 ± 0.3	61.3 ± 3.3
25			23.9 ± 0.4	79.8 ± 2.6
26	湿度	服装 A	30.1 ± 0.4	48.5 ± 2.9
27			30.2 ± 0.3	60.8 ± 2.7
28			30.0 ± 0.5	77.6 ± 3.5

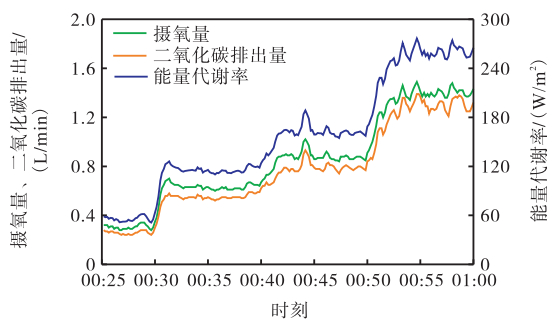
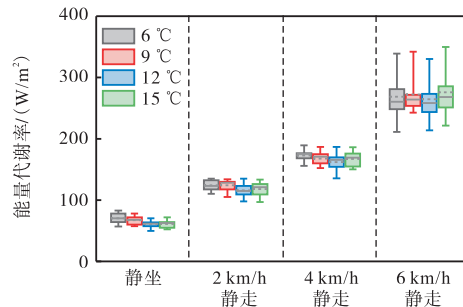


图 6 摄氧量、二氧化碳排出量和能量代谢率随时间的变化

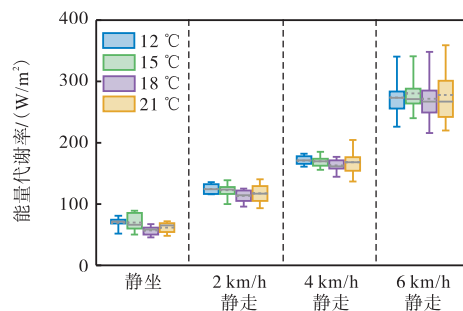
Fig.6 Variations in V_{O_2} , V_{CO_2} , and the metabolic rate over time

$p = 0.031$) ; 而环境温度的变化对 4 km/h 静走和 6 km/h 静走活动的能量代谢率没有显著影响 ($p = 0.105, p = 0.308$) . 当受试者身着服装 C 时, 环境温度的变化对静坐和 2 km/h 静走活动的能量代谢率产生了显著影响 ($p = 0.004, p = 0.044$) ; 而环境温度的变化对 4 km/h 静走和 6 km/h 静走活动的能量代谢率没有显著影响 ($p = 0.298, p = 0.578$) . 当受试者身着服

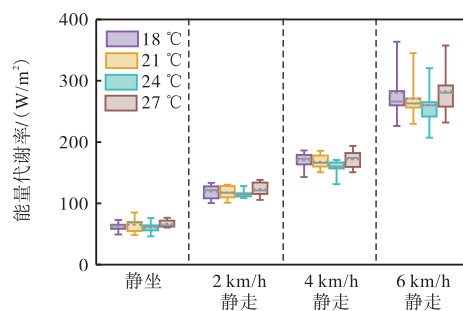
装 B 时, 环境温度的变化对静坐和 2 km/h 静走活动的能量代谢率没有显著影响 ($p = 0.306, p = 0.143$) ; 而环境温度的变化对 4 km/h 静走和 6 km/h 静走活动的能量代谢率产生了显著影响 ($p = 0.041, p = 0.003$) . 当受试者身着服装 A 时, 环境温度的变化对静坐和 2 km/h 静走活动的能量代谢率没有显著影响 ($p = 0.287, p = 0.080$) ; 而环境温度的变化对 4 km/h 静走和 6 km/h 静走活动的能量代谢率产生了显著影响 ($p = 0.044, p = 0.030$) .



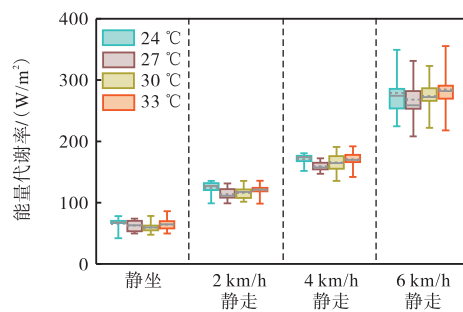
(a) 受试者身着服装 D



(b) 受试者身着服装 C



(c) 受试者身着服装 B



(d) 受试者身着服装 A

图 7 温度对能量代谢率的影响

Fig.7 Effect of temperature on the metabolic rate

结果表明, 温度对人体能量代谢率影响存在差异, 这与活动强度相关, 当人体处于较低活动强度(静坐和 2 km/h 静走)时, 冷或偏凉环境下温度的变化更能影响到能量代谢率, 而在偏暖或热环境下温度的变化对其没有显著影响. 对于静坐活动, 受试者在身着服装 D 时, 15 °C 时的能量代谢率较 6 °C 低 15.6%; 受试者在身着服装 C 时, 18 °C 时的能量代谢率较 12 °C 和 15 °C 分别低 21.8% 和 22.7%. 对于 2 km/h 静走活动, 受试者在身着服装 D 时, 12 °C 时的能量代谢率较 6 °C 和 9 °C 分别低 7.4% 和 7.1%; 受试者在身着服装 C 时, 18 °C 时的能量代谢率较 12 °C 和 15 °C 分别低 9.9% 和 7.9%. 恰恰相反的是, 当人体处于较高活动强度(4 km/h 和 6 km/h 静走)时, 偏暖或热环境下温度的变化更容易对能量代谢率产生影响, 而在冷或偏凉环境下温度的变化则不容易对其产生影响. 对于 4 km/h 静走活动, 受试者在身着服装 B 时, 24 °C 时的能量代谢率较 27 °C 低 8.2%; 受试者在身着服装 A 时, 27 °C 时的能量代谢率较 24 和 33 °C 分别低 7.1% 和 7.1%. 对于 6 km/h 静走活动, 受试者在身着服装 B 时, 24 °C 时的能量代谢率较 18 °C 和 27 °C 分别低 7.6% 和 8.6%; 受试者在身着服装 A 时, 27 °C 时的能量代谢率较 33 °C 低 6.2%. 本研究与之前研究^[13-14]的结论并不一致, 可能是因为本研究获取了更低环境温度下能量代谢率的数值且考虑了服装因素.

由于人体的冷感受器比热感受器多, 因此人体对冷刺激更为敏感^[25]. 人体在较低活动强度运动时, 对于冷或偏凉环境下温度的变化更为敏感, 人体调节系统会增加产热来抵御这种冷刺激, 导致其能量代谢率产生了显著变化; 而人体对于偏暖或热环境下温度的变化不敏感, 则能量代谢率不会产生显著变化. 但是, 在较高活动强度时, 人体的核心温度显著增加^[2], 人体的产热也处于很高的水平, 从而减弱了冷或偏凉环境下温度的变化对人体带来的冷刺激; 偏暖或热环境下温度的变化则加剧了这种热刺激, 从而对能量代谢率产生显著影响.

2.4 服装热阻对能量代谢率的影响

图 8 展示了受试者穿着不同服装时能量代谢率的数据, 使用了配对 t 检验的方法对其进行分析. 对于静坐活动, 穿着更厚的服装可以降低 12 °C 和 15 °C 环境下的能量代谢率 ($p = 0.023$, $p = 0.043$), 其数值分别降低了 13.2% 和 14.4%. 对于 2 km/h 静走活动, 穿着更厚的服装可以降低 12 °C 和 24 °C 环境下的能量代谢率 ($p = 0.049$, $p = 0.034$), 其数值分别降低了

8.0% 和 7.6%. 对于 4 km/h 静走活动, 穿着更厚的服装可以降低 24 °C 环境下的能量代谢率 ($p = 0.001$), 其数值由 170.8 W/m² 降至 159.0 W/m², 而在 27 °C 环境下, 穿着更厚的服装则会提高能量代谢率 ($p = 0.031$), 其数值由 159.5 W/m² 升至 172.0 W/m². 对于 6 km/h 静走活动, 穿着更厚的服装可以降低 24 °C 环境下的能量代谢率 ($p = 0.005$), 其数值由 278.9 W/m² 降至 260.5 W/m², 而在 27 °C 环境下, 穿着更厚的服

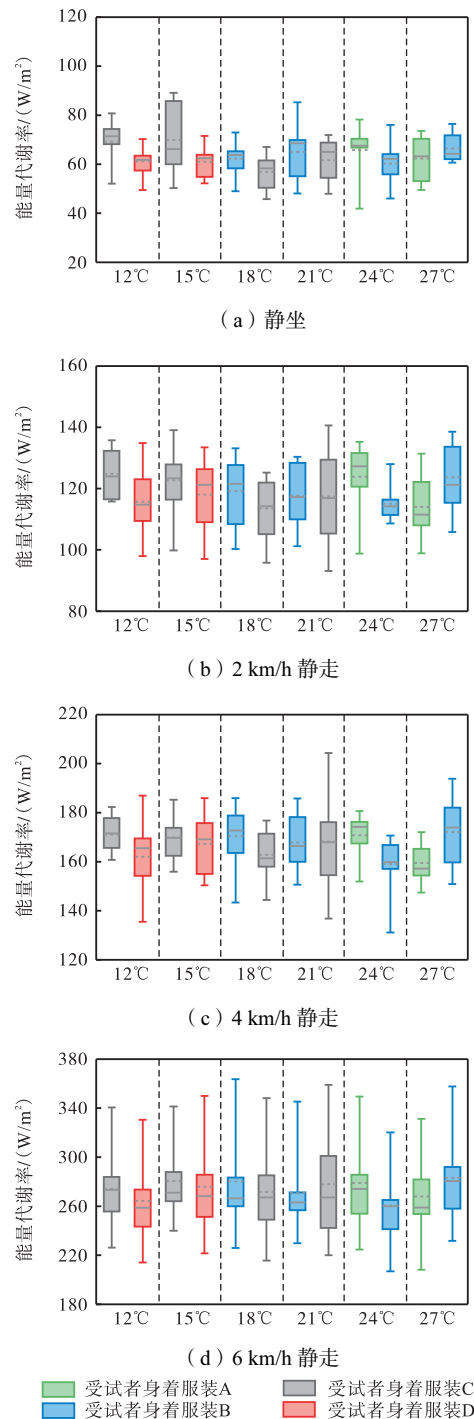


图 8 服装对能量代谢率的影响

Fig.8 Effect of clothing on the metabolic rate

装同样会提高能量代谢率 ($p = 0.024$), 其数值由 268.0 W/m^2 升至 283.0 W/m^2 .

总的来说, 对于寒冷环境下的受试者, 在较低活动强度时穿着更厚的服装可以起到保暖作用, 降低了人体的能量代谢率, 而对于处于较高活动水平下的受试者来说, 在较高的环境温度下穿着更厚的服装可能会使人感受到了更强的热刺激, 其能量代谢率有所上升.

2.5 环境湿度对能量代谢率的影响

两个实验阶段相隔了一段时间, 由于人体对全年气候的热适应性, 为了避免气候变化对能量代谢率产生的影响, 因此该部分内容只对比了实验阶段 2 中 3 种不同环境湿度下的人体能量代谢率.

图 9 展示了不同环境湿度下能量代谢率的数据,

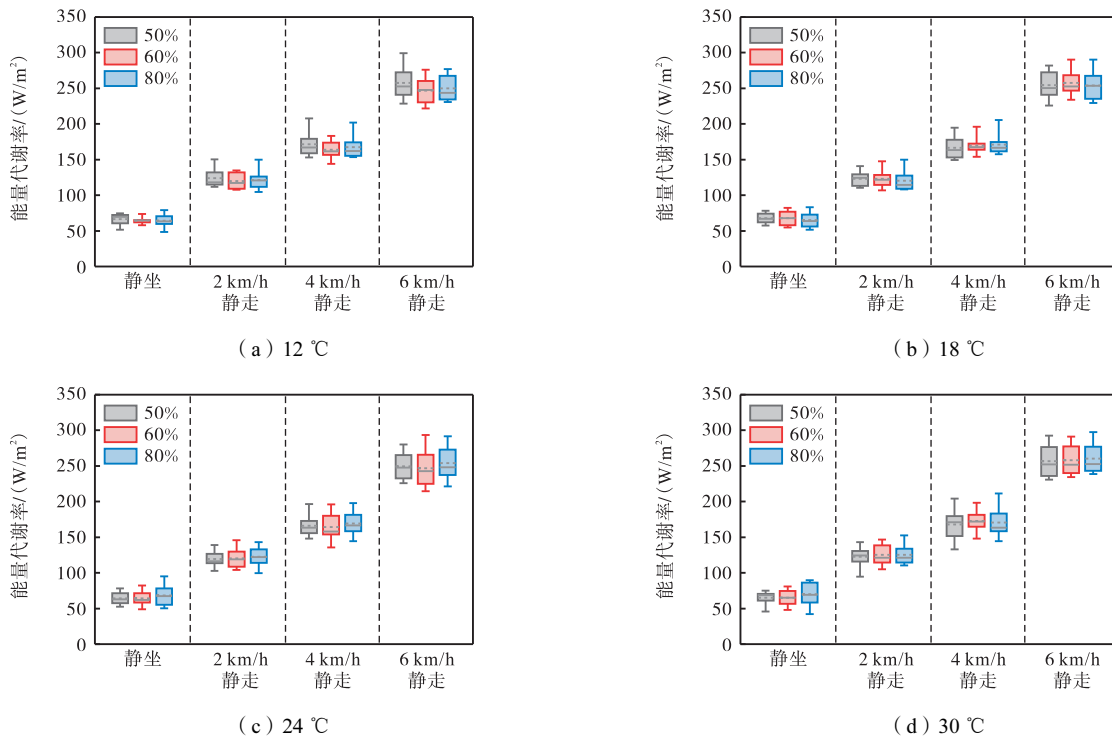


图 9 湿度对能量代谢率的影响
Fig.9 Effect of humidity on the metabolic rate

3 结 论

本研究以活动强度和服装两个人体行为因素以及温度和湿度两个外界环境因素为变量开展实验, 讨论了它们对能量代谢率的影响, 主要结论如下.

(1) 活动强度在由静坐增加至 2 km/h 静走以及后续步行速度每次增加 2 km/h 后, 人体的能量代谢率并不立即突变, 而是会经历一个上升期, 后在 5 min 之内趋于稳定. 稳定后的能量代谢率随活动强度的增加而显著上升 ($p < 0.001$). 在 24 °C、受试者身着服装 B 时, 静坐活动的平均能量代谢率为 $(60.3 \pm$

使用了重复测量分析的方法对其进行分析. 结果表明, 不论在何种环境温度和服装的组合下, 对于 4 种不同活动强度下运动的受试者, 均未发现湿度对其能量代谢率产生显著影响 ($p > 0.050$). 对于静坐和 2 km/h、4 km/h 和 6 km/h 的静走活动, 50%和 60%湿度工况代谢率分别平均相差 0.8%、1.6%、2.5%和 1.8%; 60%和 80%湿度工况代谢率分别平均相差 4.5%、1.4%、1.7%和 1.5%; 50%和 80%湿度工况代谢率分别平均相差 5.2%、2.3%、2.2%和 1.5%. 可见, 环境湿度对静坐和静走人体的能量代谢率的影响很小. 这与 Anand 等^[14]的结论并不一致, 目前尚不清楚不一致的具体原因, 可能是不同人种受试者自身体质差异所造成的.

$8.2) \text{ W/m}^2$, 2 km/h 静走活动增加至 $(115.1 \pm 5.7) \text{ W/m}^2$, 4 km/h 静走活动增加至 $(159.0 \pm 11.0) \text{ W/m}^2$, 6 km/h 静走活动增加至 $(260.5 \pm 31.0) \text{ W/m}^2$.

(2) 温度对人体能量代谢率的影响存在差异, 这与活动强度相关. 当人体处于较低活动强度时, 冷或偏凉环境下温度的变化更能影响到能量代谢率, 而在偏暖或热环境下温度的变化对其没有显著影响. 恰恰相反的是, 当人体处于较高活动强度时, 偏暖或热环境下温度的变化更容易对能量代谢率产生影响, 而在冷或偏凉环境下温度的变化则不容易对其产生

影响。

(3) 对于寒冷环境下的受试者,在较低活动强度时穿着更厚的服装可以起到保暖作用,降低了人体的能量代谢率,而对于处于较高活动水平下的受试者来说,在较高的环境温度下穿着更厚的服装可能会使人感受到更强的热刺激,其能量代谢率有所上升。

(4) 对于4种不同活动强度下运动的受试者,均未发现湿度对其能量代谢率产生显著影响($p > 0.050$)。对于静坐和2 km/h、4 km/h和6 km/h的静走活动,50%和60%湿度工况代谢率分别平均相差0.8%、1.6%、2.5%和1.8%;60%和80%湿度工况代谢率分别平均相差4.5%、1.4%、1.7%和1.5%;50%和80%湿度工况代谢率分别平均相差5.2%、2.3%、2.2%和1.5%。可见,环境湿度对静坐和静走人体的能量代谢率的影响很小。

同大多数有关能量代谢率的研究一样,受试者往往选取的是成年健康大学生,虽然这样可以减小个体差异产生的影响,但可能会将结论的应用限制在青年身上,降低了结论的普适性。因此,未来应对来自不同年龄和地区的人员做更为广泛的调查,以探究更多类型的受试者所带来的能量代谢率的差异。

参考文献:

- [1] Hackney A C. Exercise, Sport, and Bioanalytical Chemistry[M]. USA: Elsevier, 2016.
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE Standard 55-2020 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2020.
- [3] Luo M H, Wang Z, Kevin K, et al. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge[J]. Building and Environment, 2018, 131: 44-52.
- [4] Mirjam P E, Klaas R. Low resting energy expenditure in Asians can be attributed to body composition[J]. Obesity, 2008, 16(10): 2212-2216.
- [5] Lazzer S, Bedogni G, Lafortuna C L, et al. Relationship between basal metabolic rate, gender, age, and body composition in 8 780 white obese subjects[J]. Obesity, 2010, 18(1): 71-78.
- [6] Kingma B, Lichtenbelt W M. Energy consumption in buildings and female thermal demand[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1054-1055.
- [7] Nomoto A, Hisayama R, Yoda S, et al. Indirect calorimetry of metabolic rate in college-age Japanese subjects during various office activities[J]. Building and Environment, 2021, 199: 107909.
- [8] Haddad S, Osmond P, King S. Revisiting thermal comfort models in Iranian classrooms during the warm season[J]. Building Research and Information, 2017, 45(4): 457-473.
- [9] Yang L, Wang X N, Li M H, et al. Carbon dioxide generation rates of different age and gender under various activity levels[J]. Building and Environment, 2020, 186: 107317.
- [10] Gao S R, Yang L, Li Y Y, et al. Metabolic rate in children and adolescents: Tabulate values for common activities and comparisons with standards and adult values[J]. Building and Environment, 2023, 244: 110804.
- [11] Gao S R, Yang L, Li Y Y, et al. Gender and age effects on metabolic rates of office work, housework, and different walking speeds[J]. Energy and Buildings, 2023, 298: 113551.
- [12] Wu Y W, Li Y Y, Gao S R, et al. Carbon dioxide generation rates for children and adolescents[J]. Building and Environment, 2023, 237: 110310.
- [13] Yang L, Zhao S K, Gao S R, et al. Gender differences in metabolic rates and thermal comfort in sedentary young males and females at various temperatures[J]. Energy and Buildings, 2021, 251: 111360.
- [14] Anand V, Sendhil D, Rajasekar E. Estimating the metabolic rate and associated physiological response for Indian subjects through climate chamber experiments[J]. Building and Environment, 2022, 207: 108466.
- [15] Luo M H, Zhou X, Zhu Y X, et al. Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate[J]. Building and Environment, 2016, 118: 152-159.
- [16] Sun Y P, Zhu N. Experimental research on human metabolism in hot environment[J]. Advanced Materials Research, 2012, 599: 241-244.
- [17] Zhai Y C, Elsworth C, Arens E, et al. Using air movement for comfort during moderate exercise[J].

- Building and Environment, 2015, 94: 344-352.
- [18] Zhai Y C, Zhao S K, Gao Y F, et al. Preferred temperatures with and without air movement during moderate exercise[J]. Energy and Buildings, 2020, 207: 109565.
- [19] Feriadi H, Wong N H. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(7): 614-626.
- [20] Liu W W, Deng Q H, Ma W W, et al. Feedback from human adaptive behavior to neutral temperature in naturally ventilated buildings: Physical and psychological paths[J]. Building and Environment, 2013, 67: 240-249.
- [21] Jia X Y, Wang J H, Zhu Y X, et al. Climate chamber study on thermal comfort of walking passengers at different moving speeds[J]. Building and Environment, 2022, 224: 109540.
- [22] Cena K, Clark J A. Studies in Environmental Science[M]. USA: Elsevier, 2016.
- [23] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook — Fundamentals[S]. Atlanta: ASHRAE, 2021.
- [24] International Organization for Standardization. ISO 7730 Ergonomics of the Thermal Environment: Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria[S]. Geneva: ISO, 2010.
- [25] 朱颖心, 张寅平, 李先庭, 等. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Zhu Yingxin, Zhang Yinping, Li Xianting, et al. Built Environment[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015 (in Chinese).

(责任编辑: 田 军)