DOI：10.3724/zrht.1674-5825.2025070

基于心率和CO_2预测密闭服装内人体代谢率试验研究

李金林[1,2]，潘存欣[1]，胡金宇[1]，刘梦楠[1]，郑 鹏[1]
（1. 中国航天员科研训练中心，北京 100094；2. 人因工程全国重点实验室，北京 100094）

摘 要：研究密闭服装内人体代谢率与心率和CO_2分压之间的关系，为实时预测服内人体代谢率提供依据。服装置于气候模拟舱内，尽可能减小其与环境的对流换热效应，完成了8名男性志愿者在不同工况下的人体代谢试验。试验中服装内风机和泵同时工作，为服内环境提供气体净化和温湿度控制。试验结果表明：随着人体运动负荷增加，服内人体心率和口鼻区CO_2分压、代谢率增加，人体代谢率变化与心率和CO_2分压呈正相关关系。通过回归计算可获得不同志愿者人体代谢率与心率和口鼻区CO_2分压之间的线性计算公式，研究表明：利用心率和CO_2预测密闭服装内的人体代谢率是可行的。

关键词：心率；CO_2；人体代谢率；密闭服装
中图分类号：V445.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-5825(2026)01-0033-06

Experimental Study on Predicting Human Metabolism Rate in Sealed Suit Based on Heart Rate and CO_2

LI Jinlin[1,2], PAN Cunxin[1], HU Jinyu[1], LIU Mengnan[1], ZHENG Peng[1]
(1. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;
2. National State Key Lab of Human Factors Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: This study investigates the relationship among human metabolism rate, heart rate, and CO_2 concentration in a sealed suit and provides a basis for real-time prediction of human metabolism rate in the suit. The suit is placed in a climate simulation chamber to minimize the effect of convective heat transfer with the environment as much as possible, the human metabolism experiment is performed in eight adult males under different conditions. The fan and pump operate during the experiment to provide gas purification and temperature and humidity control for the internal environment of the suit. The experimental results show that as the exercise load increases, the heart rate and CO_2 concentration in the mouth and nose area increase and the metabolism rate increases. The changes in the metabolism rate are positively correlated with the heart rate and CO_2 concentration. The linear calculation formulas of the volunteers between the human metabolism rate and heart rate as well as CO_2 in the mouth and nose area are obtained through regression calculation. The study shows the prediction of human metabolism rate in a sealed suit is feasible using heart rate and CO_2.
Key words: heart rate; CO_2; human metabolism rate; sealed suit

1 引言

在许多特殊环境作业时，操作人员需穿着特种防护服保护自身安全，如防化服、消防服、航空服、航天服等。为防止外环境影响，一些特种防护服装与

收稿日期：2025-05-19；修回日期：2025-12-22
基金项目：人因工程全国重点实验室稳定支持科研项目(HFNKL2023WN05)
第一作者：李金林，男，硕士，副研究员，研究方向为航天服工程。E-mail：liveinthu@163.com
引用格式：李金林，潘存欣，胡金宇，等. 基于心率和CO_2预测密闭服装内人体代谢率试验研究[J]. 载人航天，2026，32(1)：33-38. Li J L，Pan C X，Hu J Y，et al. Experimental study on predicting human metabolism rate in sealed suit based on heart rate and CO_2[J]. Manned Spaceflight，2026，32(1)：33-38.

外环境相互隔离形成密闭空间，如空间环境使用的密闭航天服等(简称密闭服装)。为支持服内人员长时间作业并保障其安全性和热舒适性，服内设计了内循环通风净化系统和循环制冷系统[1]。人体呼吸所需的氧气由密闭服装自行携带，人体呼吸产生的CO_2由服内通风回路中的净化器全部吸收，由此产生的压降通过精准压力调控组件供给等体积氧气，为服内人员补充呼吸耗氧；循环制冷系统通过风冷和液冷的形式为服内人员排除代谢产热[2]，维持人体表面温度和服内气体温度，保证服内环境温湿度及人员热舒适性。

人体穿着密闭服装作业时，不同作业对象及劳动强度将有不同的代谢产热，为保证服内人员合理的热舒适性，需根据人体实时代谢产热调整制冷状态，制冷不足时将导致服内偏热，反之偏冷，过冷过热的状态都将影响服内人员的舒适性及劳动效率[3]。此类服装传统的调温方式一般为手动调整，该方式调整精度不高容易过冷或过热，同时将会极大分散着服人员注意力、降低操作效率。因此，研究通过服内相关数据预测人体代谢模型，实现服装自动调整服内温度状态，是实现精准热控并极大改善服内热舒适性的有效途径。

人体代谢测定分直接测定和间接测定法。直接测定法根据能量守恒定律直接测定在一定时间段内人体所释放出的热量，测量时要求测试环境及保障设备的管路等附件与外界完全实现热隔离，确保受试者的所有代谢产热全被收集，不能与外界发生能量交换，以保证测试结果的准确性。直接测量法需使用专业的测试场所和设备[4]，设备研制难度大、造价高，所需的仪器设备较为复杂，热隔离要求高，环境条件建立困难，测定时间长，难以大规模推广应用，不适用有实时测定人体代谢需求的密闭类服装。为不影响服内人员穿着的舒适性和作业效果，密闭类服装内人体代谢预测普遍采用间接测量法。

目前，在航天等领域广泛应用的间接测量方法有双标记水法、心率法、氧消耗法和CO_2吸收法[5]等。人体代谢与呼吸耗氧具有强相关性，在密闭服装内利用耗氧量和CO_2产量数据，可通过WEIR公式计算获取人体能量代谢值[6]。因此，早期的人体代谢间接测量方法主要任务在于测量呼吸耗氧量和CO_2呼出量。

双标记水法利用同位素标记技术评估人体能量代谢，试验中志愿者注射含有非放射性的同位素重氧^{18}O和氘^{2}H的水，之后连续收集人体尿液，测定同位素的置换量，计算CO_2生成量，进而计算总能量消耗[7]。双标记水法被行业称为能量消耗测定的金标准。该方法测量精度高，持续时间长，更适合长时间跟踪测量的应用场景，不适合实时测量的应用场合。

心率法是人体在不同运动负荷状态下，随着运动量增加，人体代谢、心率和耗氧量同步增加，呼出的CO_2也随之增加。研究表明，人体代谢与负荷量大小成正比，人体代谢与心率和耗氧量之间也有良好的线性关系，其中心率与人体代谢相关性更好[8]。彭远开等[9]在对人体上、下肢运动条件下心率与能量代谢率线性回归研究中发现，利用心率与能量代谢率的线性回归方程估测能量代谢率是可行的，但心率预测代谢率的准确性需进一步提高。另有研究表明，心率不能对静息等低水平活动状态的能量代谢进行良好的估测[10]。

氧气和CO_2是人体代谢的主要参与要素，其中氧气消耗量直接决定了人体代谢水平，通过人体成分代谢产热公式计算获取数据的方法称为氧消耗法。密闭服装中一般会安装小体积的高压氧气瓶为服内人员供氧，通过氧瓶压力变化可间接计算耗氧量，但在实际使用中由于氧瓶温度波动及压力传感器输出精度等问题，难以精准获取实时耗氧量，更适合长时间的总代谢量计算。

通过呼出CO_2的收集，获取对应时间段内的人体能量消耗称为CO_2吸收法。通过在密闭试验空间内测试，获取人体CO_2生成量[11]，汪雪妮[12]研究发现人均CO_2生成量与活动水平呈正相关关系，在低代谢条件下线性关系较好。在普通应用场景中，该方法在实时性要求较高的场合中无法提供对应CO_2生成量，比较适合长时间监测的场合[13]。对于长时间持续监测的状态，俄罗斯和美国在航天飞行任务都使用过CO_2吸收法估测任务期间的人体能量消耗，通过计算人体排出的CO_2总量，依据呼吸商(Respiratory Quotient，RQ)计算耗氧量和人体代谢。其中，呼吸商按照安静时0.8、舱内活动时0.83~0.86，舱外活动时0.9取值[4]。

针对密闭服装现有技术体系，本文利用人体心率和口鼻区呼出的CO_2分压作为间接预测实时人体代谢率的输入变量，通过肺功能仪准确测量人体代谢[14]。分析不同工况的试验数据，研究输入变量和人体代谢率之间的关系，并通过阶段氧消耗量复核

肺功能仪测得的人体代谢数据准确性。

2　密闭服装工作原理

本文研究所用的密闭服装设计有一套完整的内环境净化、制冷、供氧、CO_2去除、电源、传感器以及用于数据采集处理和传输的计算机系统,其主要组成及物质流循环示意图见图1。

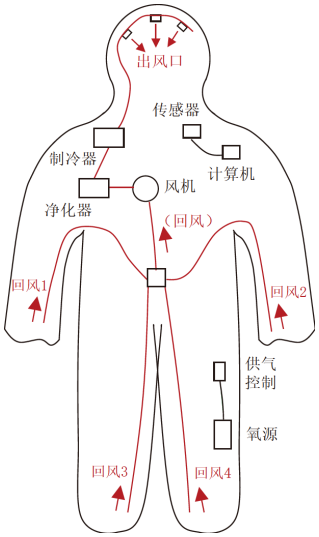


图 1　密闭服装组成及物质流

Fig. 1　Composition and material flow of the sealed suit

密闭服装各组成主要功能如下:

1)通风循环系统。风机工作,通过上下肢末端的回风口将服内气体收集至净化器,净化器可以将经过气体中的CO_2全部吸收,净化后的气体经制冷器形成凉风,最终在头部出风口排向服装内腔,往复循环。

2)数据采集处理系统。传感器系统由CO_2分压、心电、服内气体压力传感器等组成。嵌入式计算机采集处理传感器数据后根据气体压力调节供氧控制器阀门,将服内气体压力保持在(105±0.5) kPa之间;CO_2和心率数据采集后由计算机发送至服外计算机进行显示和存储。

3)供氧控制逻辑。服装内的初始气体为普通大气,为防止服外环境气体侵入,服内气体保持适度正压,该数值设定为约5 kPa,人体呼吸损耗服内氧气呼出CO_2,净化器吸收CO_2后服内气体压力随之下降,计算机根据压力变化开启或关闭供氧控制器阀门,维持服内压力。

根据密闭服装组成,其自身在试验期间可采集到人体呼吸产生的CO_2分压、人体心率。因高压氧瓶压力传感器精度原因及环境温度影响,气瓶压力传感器数据不作为试验输入变量。

3　试验设计

依据人体代谢测量方法研究及分析,结合心率法和CO_2吸收法各自优点和存在的不足,立足密闭服装内狭小空间布局和重量约束,在服装不增加资源利用现有技术状态的条件下,本文采用心率和CO_2同时作为人体代谢预测的输入变量。

3.1　试验方法

试验中心率和CO_2作为自变量,由服装自身采集生成,CO_2分压由服内CO_2分压传感器采集获得,心率由志愿者佩戴生理信号传感器采集获取,数据由服内嵌入式计算机处理后发送至服外测试用计算机,2个参数数据在服装工作期间持续采集输出。

人体代谢作为因变量,使用肺功能仪采集[4,14],通过志愿者的通气量、摄氧量、CO_2排出量、呼吸商等重要参数计算获得。服装为密封式结构,内外环境相互隔离,因此肺功能仪数据收发端之间需使用无线通信模式,本文试验选用MetaMax 3B(Cortex公司,德国)测量。

试验开始前和结束后,在高压氧瓶表面干燥的状态下分别称重,获取试验全程服内人员总耗氧量并计算对应的人体代谢量,与肺功能仪获取的代谢总量进行比对,相互印证数据采集计算的正确性。

3.2　试验条件控制

为保证试验条件的稳定性和有效性,试验环境和控制条件如下:

1)穿着服装测试前,志愿者完成常服摸底测试,通过肺功能仪测量并确定进服装之后的负荷动作。

2)志愿者操作上肢专用设备,调整负载实现不同代谢率,志愿者负荷操作期间,长时间人体代谢率控制在300 W以内。

3)试验期间根据志愿者实际需求,及时调整制冷组件输出温度保障其主观舒适性。

4)试验过程中净化系统正常工作,实时监测净化器后端气体中的CO_2分压,数值不超过0.15 kPa,试验前用标准气体标定CO_2分压传感器确保其精度。

5)试验期间服内通风系统持续工作,通风流量保持恒定。

6)气候模拟舱内温度控制在22~26 ℃之间,试验期间温度保持稳定。

3.3 试验连接关系

试验在气候模拟舱内进行。舱内为常压，气温按照试验条件要求控制并保持稳定。试验中使用舱外地面冷源为服内制冷器制冷，制冷器为服内环境提供二次制冷。气候模拟舱外的设备为服装提供电源和参数监测功能，舱外设备的液冷管路和电缆经穿舱法兰接入并与服装连接，舱内液冷管路使用保温棉包覆，试验设备连接关系见图2。

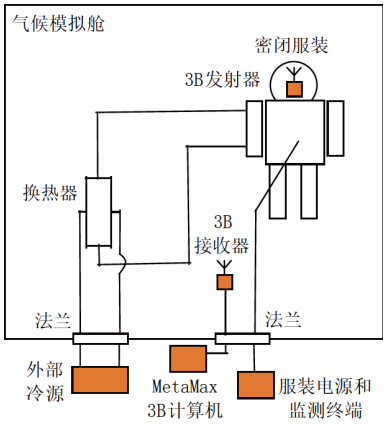


图 2 试验连接关系

Fig. 2 Experimental setup

3.4 志愿者要求

招募志愿者的条件如下：①25~40岁健康男性；②身高165~180 cm，胸围94~110 cm；③无心肺系统疾患，耳气压功能良好(能耐受海拔20 m/s的减压速率)；④无传染性皮肤病。

从咽鼓管主动开张能力检查、常规医监体检、运动心肺功能检查、血常规检查满足要求的志愿者中优选8名人员参加试验。

试验前志愿者均完成服装操作使用培训，运动器材着服操作培训，考核通过。

4 试验结果与分析

8名志愿者均完成了测试内容，志愿者在服内完成了规定的操作动作，以规定频率操作上肢专用设备，按试验要求调整配重块改变人体代谢率。试验期间全程采集了人体心率和CO_2分压数据，同步通过肺功能仪采集、计算并记录了人体代谢参数数据，获取了对应能量代谢率。

4.1 代谢与心率和CO_2变化曲线

试验发现各志愿者基础代谢和心率差异较大，为便于数据变化曲线比对，针对部分基础心率较低的志愿者，数据变化曲线图中将其心率值放大为原来的2倍(数据回归分析时不做此处理)。8名志愿者测试期间的代谢率、心率和CO_2分压数据变化曲线见图3。从图中可以看出，人体代谢率与CO_2分压值相关性较好，曲线变化趋势基本一致；人体代谢率与心率值曲线变化趋势及走向一致，但与CO_2分压值相比，CO_2分压值与代谢率相关性更好。

4.2 代谢率与心率和CO_2线性回归分析

通过数据曲线可以看出，随着代谢率的增加，人体心率和呼出的CO_2分压随之增加。试验中改变上肢运动负荷形成对应变化的人体代谢率，生成并输出该志愿者对应工况下的人体心率和呼出CO_2分压。在实际应用中，人体心率和CO_2分压作为自变量，反向求解预测对应状态下的人体代谢率，即人体代谢率为因变量。从8名志愿者人体代谢与心率和CO_2分压变化曲线看，CO_2分压值和人体代谢率数据之间存在较好的同向性并呈线性关系，心率值也呈现相似规律。人体能量代谢与运动关系中，身体的新陈代谢随运动负荷量增加而增加，心率和呼吸量同步增加，反之降低，研究对象中的自变量与因变量之间存在理论上的因果关系。对志愿者试验数据进行线性回归分析，人体代谢率与CO_2分压、心率单一变量关系式系数均为正数，CO_2分压复相关系数R值在0.971~0.998之间，心率复相关系数R值在0.467~0.807之间，参数之间为正相关关系，人体代谢率与CO_2分压相关性更好。因此，本文研究中，针对每名志愿者，其各自的心率和CO_2分压值与人体代谢率数据之间具备多元线性回归的基本条件，各志愿者线性回归模型[15]为$f(x_1,x_2)=k_0+k_1x_1+k_2x_2$。其中，$x_1$、$x_2$分别为$CO_2$和心率变量，$k_0$、$k_1$、$k_2$为未知常数。利用试验数据求解回归模型可获取$k_0$、$k_1$、$k_2$。每名志愿者均有其各自不同的线性回归常数，形成各志愿者特有的人体代谢预测公式，用于计算预测实际负荷运动中的人体代谢率。

经线性回归计算，完成了8名志愿者回归模型公式中的常量系数求解，求解结果见表1。表1中max AE为志愿者代谢预测公式通过心率和CO_2分压计算结果与肺功能仪实测数据之间的最大偏差值(代谢率)，max Er为二者之间的相对误差(百分比)最大值。由表1数据可知，人体代谢预测公式中的常量系数k_1、k_2均为正数，表明代谢率与2个自变量之间均为正相关关系。总体而言，人体代谢率与CO_2分压相关性更好，系数权重相对更大；而与心率相关性稍差，

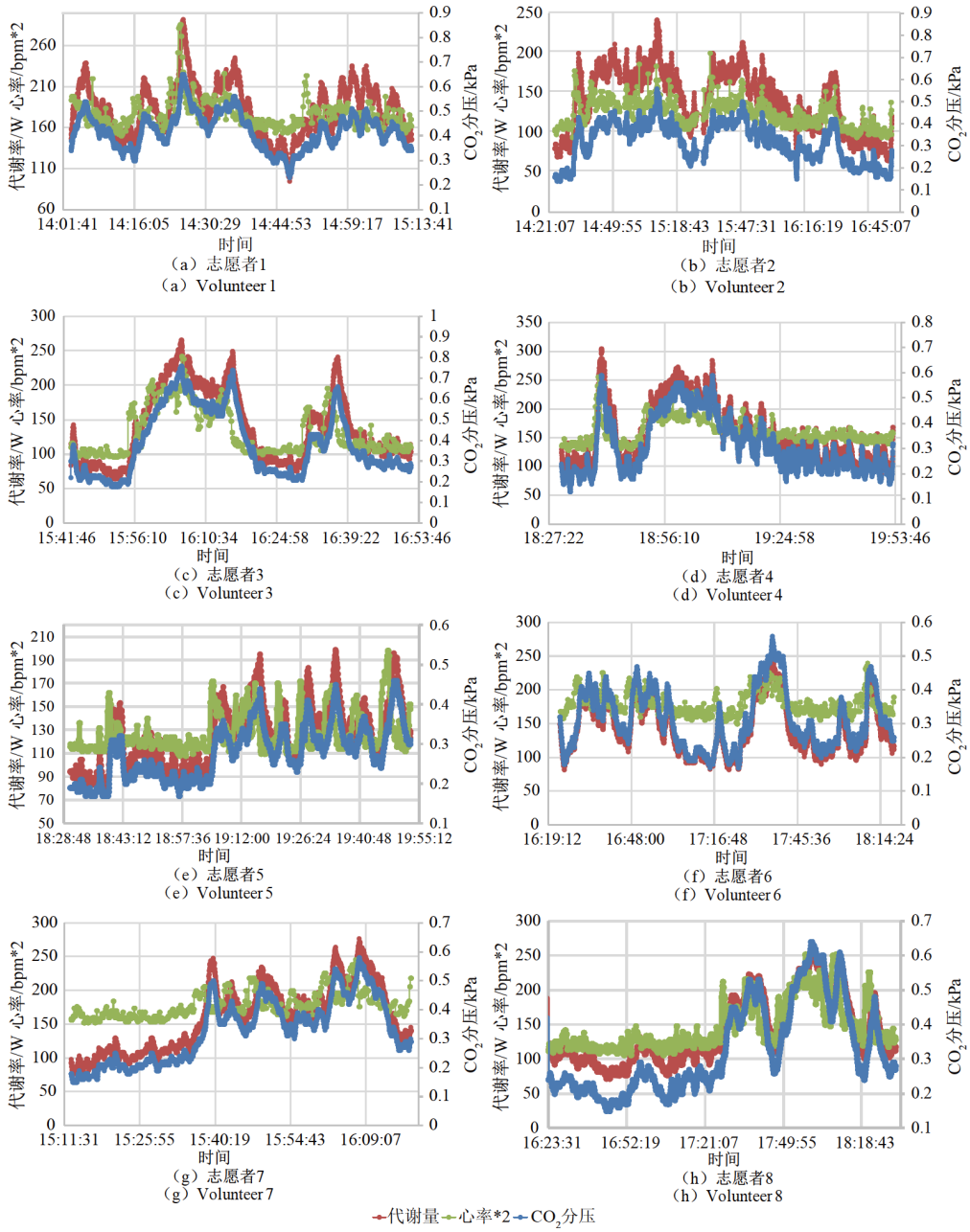


图 3　人体代谢与心率和CO_2变化曲线

Fig. 3　Curves of human metabolism, and heart rate and CO_2 concentration

表 1　志愿者代谢预测公式常量计算结果

Table 1　Calculated constants for the metabolism prediction function of volunteers

Volunteer ID	k_0	k_1	k_2	R_2	max *AE*/W	max *Er*/%
1	-2.675	423.218	0.082	0.964	17.04	8.58
2	-4.700	410.686	0.236	0.989	12.31	9.79
3	10.136	324.062	0.056	0.995	11.05	7.20
4	4.395	453.559	0.087	0.989	16.55	10.75
5	14.796	379.324	0.081	0.975	13.79	10.12
6	-2.026	362.055	0.211	0.987	10.99	9.29
7	-4.181	426.009	0.172	0.985	14.07	9.54
8	0.238	478.184	0.144	0.988	10.62	3.16

与已有研究结论基本一致[9],系数权重相对更小。人体代谢率预测结果与肺功能仪实测值比对计算后的相对误差最大为10.75 %,最小为3.16 %,总平均为8.55 %。

试验期间的整体耗氧量可由服装内配套的氧瓶精确获取,呼吸商取为0.83[4],对应氧热价为4.86 kcal/L[16],以此为基础计算获取人体代谢总量。使用肺功能仪MetaMax 3B测试获取的人体代谢总量与通过耗氧量得到的计算值基本一致,8名志愿者对应的8组代谢总量相对误差最大为3.87 %,最

小为0.38 %，总平均为2.19 %。通过耗氧计算获取的代谢总量与肺功能仪测试数据基本一致，由此说明试验期间肺功能仪获取的代谢率数据准确可信。

5 结论

1)心率和CO_2分压与人体代谢率之间为正相关关系，不同志愿者数据均可使用线性回归的方法求解获得对应的人体代谢率预测公式。

2)通过预测公式获取的人体代谢率与实际测试值基本接近，最大预测相对误差平均为8.55 %，利用预测公式可有效计算估测人体代谢率。受密闭服装现有设计及资源约束，其他常用方法应用受限的情况下，利用心率和CO_2预测密闭服装内人体代谢率是可行的。

3)各志愿者代谢影响因素存在差异，线性回归求解得到的心率和CO_2分压权重不同，人体代谢预测公式中自变量的常量系数不同。

参考文献(References)

[1] 张万欣, 廖前芳, 李金林, 等. 空间站飞天舱外航天服系统设计与验证[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(2): 1393-1415.
Zhang W X, Li Q F, Li J L, et al. System design and verification of space station Feitian EVA spacesuit[J]. Sci. China: Technol. Sci, 2022, 52(2): 1393-1415 (in Chinese).

[2] 张万欣, 王涛, 王海亮, 等. 舱外航天服液温调节特性实验研究[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(1): 37-42.
Zhang W X, Wang T, Wang H L, et al. Experimental study on liquid temperature modulation characteristics of EVA spacesuit[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(1): 37-42 (in Chinese).

[3] Yu S, Warren J J. Numerical modeling of heat and moisture transfer in a wearable convective cooling system for human comfort[J]. Building and Environment, 2015, 93(2): 50-62.

[4] 杨振中. 航天中的人体热舒适研究[D]. 西安: 西安第四军医大学, 2015.
Yang Z Z. The Research of Thermal Comfort for Human in Spaceflight[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2015 (in Chinese).

[5] 张汝果, 徐国林. 航天生保医学[M]. 北京: 国防工业出版社. 1999: 37-40.
Zhang R G, Xu G L. Aerospace Life Support Medicine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999:37-40 (in Chinese).

[6] 金睿. 头罩式间接能量代谢测量系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
Jin R. Study of ventilated-hood indirect calorimetry system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022 (in Chinese).

[7] Speakman J R. The history and theory of the doubly labeled water technique[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1998, 68(4), 932-938.

[8] 殷婷. 代谢率对人体热舒适影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
Yin T. Study on the Effect of Metabolic Rate Under the Condition of Thermal[D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese).

[9] 彭远开, 徐国林, 刘钢, 等. 上、下肢运动条件下心率与能量代谢率线性回归的观察[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(5): 357-361.
Peng Y K, Xu G L, Liu G, et al. Observation on changes of heart rate and energy metabolic rate and their regression under upper and lower limb exercise[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1998, 11(5): 357-361 (in Chinese).

[10] Iannotti R J, Claytor R P, Horn T S, et al. Heart rate monitoring as a measure of physical activity in children[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2004, 36(11): 1964-1971.

[11] Qi M W, Li X F, Weschler L B, et al. CO_2 generation rate in Chinese people[J]. Indoor Air, 2014, 24(6): 559-566.

[12] 汪雪妮. 不同活动量下人体二氧化碳生成量实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
Wang X N. Experimental Study of Human Carbon Dioxide Generation Rate at Different Activity Levels[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021 (in Chinese).

[13] Lawrence T M, Braun J E. A methodology for estimating occupant CO_2 source generation rates from measurements in small commercial buildings[J]. Building and Environment, 2007, 42(2): 623-639.

[14] 李敏, 朴建华, 刘健敏, 等. Fitmate肺功能测试仪测定静息代谢率的可信度研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2007, 19(6), 512-514.
Li M, Piao J H, Liu J M, et al. Study on reliability of resting metabolic rate determined by fitmate lung-function analytical instrument[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2007, 19(6), 512-514 (in Chinese).

[15] 吕健雄, 李鑫, 程道文, 等. 线性回归方法在核数据处理中的应用[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2014, 46(4), 72-76.
Lyu J X, Li X, Cheng D W, et al. The application of linear regression method in nuclear data processing[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2014, 46(4), 72-76 (in Chinese).

[16] 冉辉. 非蛋白呼吸商中糖和脂肪氧化百分比类型的确定[J]. 铜仁师范高等专科学校学报, 2002, 4(4), 77-80.
Ran H. Recognizing the types of oxidizing percentage of sugar and fat among nonprotein respiratory quotient[J]. Journal of Tongren Teachers College, 2002, 4(4), 77-80 (in Chinese).

(责任编辑:高慧)