论著·军事医学

生活行为与血清生化指标共同影响青年男性热耐受能力:一项海南地区横断面研究

罗 珍,何根林,罗 雪,李 萍,胡 啸,杨学森,谭雨龙 陆军军医大学(第三军医大学)军事预防医学系热带医学教研室,重庆

[摘要] **目的** 青年男性是高温作业的主要群体,全球气候变化加剧的高温暴露严重威胁其作业效能与生命安全,个体间天然存在热耐受能力差异,但当前对热耐受差异的影响因素缺乏系统认识。本研究旨在通过多维度指标(基本生理特征、生活行为特征、血清生化与激素水平等)系统探究影响青年男性热耐受能力的个体差异因素,为高温作业人群的健康防护、热相关疾病预防及人员选拔与任务部署提供理论依据。**方法** 采用横断面研究设计方案,于2024年3月25日至4月6日选取常住海南地区青年男性160位,依据热耐受测试的完成情况和结束时体温、心率分为不耐热组(35人)、一般耐热组(81人)和超强耐热组(44人),对比分析3组基本生理特征(年龄、身高、体质量、BMI、体表面积和体脂肪率);利用问卷星调查各组的生活行为特征(吸烟、失眠、饮水、中暑病史、体能水平、环境适应性);检测血清生化指标[天冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase,AST)、丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase,ALT)、尿素氮(urea nitrogen,UREA)、肌酐(creatinine,Cr)、肌酸激酶(creatine kinase,CK)和肌酸激酶MB同工酶(creatine kinase-MB,CK-MB)]和激素(皮质醇、醛固酮和血睾酮)水平;有序Logistic回归分析影响耐热能力的差异指标,并通过混淆矩阵评价预测准确性。**结果** 单因素分析显示,BMI(P=0.017)、体脂肪率(P=0.002)、吸烟(P=0.010)、失眠(P=0.024)、既往中暑病史(P=0.019)、体能水平(P=0.002)、环境适应性(P<0.001)、Cr(P<0.001)、ALT(P<0.001)、皮质醇(P=0.002)及血睾酮(P=0.002)水平在3组间差异均有统计学意义。多因素有序Logistic回归分析表明,吸烟(OR=2.958,95%CI:1.379~6.346,P=0.005)、中暑病史(OR=3.872,95%CI:1.451~10.328,P=0.007)、体能差(OR=0.047,95%CI:0.006~0.383,P=0.004)、环境适应性一般(OR=0.280,95%CI:0.107~0.730,P=0.009)、Cr(OR=0.820,95%CI:0.762~0.882,P<0.001)、ALT(OR=0.848,95%CI:0.751~0.957,P=0.008)与血睾酮(OR=0.627,95%CI:0.448~0.875,P=0.006)升高是热耐受能力下降的独立危险因素。整体预测准确率为70.00%,具有良好的区分效能。**结论** 个人生理生化(Cr、ALT和血睾酮)和生活行为特征(吸烟、中暑病史、体能水平和环境适应性)是影响海南地区青年男性热耐受能力的关键因素,BMI、体脂肪率、皮质醇及失眠与热耐受存在显著关联。

[关键词] 热耐受;高温;青年;危险因素;睾酮;职业暴露
[中图法分类号] R195.1;R339.52;R446.112 [文献标志码] A

Lifestyle behaviors and serum biochemical indicators jointly influence heat tolerance in young adult males: a cross-sectional study in Hainan region

Luo Zhen, He Genlin, Luo Xue, Li Ping, Hu Xiao, Yang Xuesen, Tan Yulong Department of Tropical Medicine, College of Military Preventive Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, China

[**Abstract**] **Objective** Young adult males constitute the primary workforce in high-temperature

[基金项目] 陆军军医大学科技创新能力提升专项项目(2023XQN17)
[通信作者] 谭雨龙,E-mail:yulong_tan2014@163.com

2097-0927/Copyright © 2026, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
引用格式:罗珍,何根林,罗雪,等. 生活行为与血清生化指标共同影响青年男性热耐受能力:一项海南地区横断面研究[J]. 陆军军医大学学报,2026,48(17):2465-2475. DOI:10.16016/j.2097-0927.202605046.
Citation: Luo Z, He G L, Luo X, *et al*. Lifestyle behaviors and serum biochemical indicators jointly influence heat tolerance in young adult males: a cross-sectional study in Hainan region[J]. J Army Med Univ, 2026, 48(17): 2465-2475. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202605046.

operations, and intensified heat exposure driven by global climate change poses a severe threat to their operational efficiency and life safety. Natural individual differences exist in heat tolerance, yet systematic understanding of the influencing factors remains lacking. This study aims to systematically investigate individual difference factors affecting heat tolerance in young males through multidimensional indicators including basic physiological characteristics, lifestyle behaviors, and serum biochemical and hormonal levels, thereby providing a theoretical basis for health management and heat injury prevention of workers exposed to high-temperature environments. **Methods** A cross-sectional study was conducted among young adult males permanently residing in Hainan. A total of 160 participants were enrolled between March 25 and April 6, 2024, and based on the results of heat tolerance tests and terminal body temperature and heart rate, they were divided into a heat-intolerant group (n=35), a moderately heat-tolerant group (n=81), and a superiorly heat-tolerant group (n=44). General physiological indicators including age, height, body weight, body mass index (BMI), body surface area and body fat percentage were compared across groups. Lifestyle behaviors (smoking status, insomnia, water intake, history of heatstroke, physical fitness and adaptability to local living environment) were investigated *via* Wenjuanxing questionnaire. Serum biochemical indicators [aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT), urea nitrogen (UREA), creatinine (Cr), creatine kinase (CK), and creatine kinase-MB (CK-MB)] and hormones (cortisol, aldosterone, and testosterone) level were detected. Ordinal logistic regression analysis was applied to identify differential indicators influencing heat tolerance, and a confusion matrix was adopted to evaluate the prediction accuracy of the model. **Results** Univariate analysis showed significant differences among the 3 groups in terms of BMI (P=0.017), body fat percentage (P=0.002), smoking (P=0.010), insomnia (P=0.024), history of heatstroke (P=0.019), physical fitness (P=0.002), environmental adaptability (P<0.001), Cr (P<0.001), ALT (P<0.001), cortisol (P=0.002) and serum testosterone (P=0.002). Multivariate ordinal logistic regression analysis revealed that smoking (OR=2.958, 95%CI: 1.379 to 6.346, P=0.005), history of heatstroke (OR=3.872, 95%CI: 1.451 to 10.328, P=0.007), poor physical fitness (OR=0.047, 95%CI: 0.006 to 0.383, P=0.004), moderate environmental adaptability (OR=0.280, 95%CI: 0.107 to 0.730, P=0.009), elevated levels of Cr (OR=0.820, 95%CI: 0.762 to 0.882, P<0.001), ALT (OR=0.848, 95%CI: 0.751 to 0.957, P=0.008) and testosterone (OR=0.627, 95%CI: 0.448 to 0.875, P=0.006) were independent risk factors for decreased heat tolerance. The overall prediction accuracy of the model was 70.00%, indicating satisfactory discriminative performance. **Conclusion** Individual physiological and biochemical indicators (Cr, ALT and testosterone) as well as lifestyle behaviors (smoking, heatstroke history, physical fitness and environmental adaptability) are key influencing factors for heat tolerance in young adult males in Hainan region. BMI, body fat percentage, cortisol and insomnia are also significantly correlated with heat tolerance.

[**Key words**] heat tolerance; high temperature; young adults; risk factors; testosterone; occupational exposure

Supported by the Special Project of Science and Technology Innovation Capacity Promotion of Army Medical University (2023XQN17). Corresponding author: Tan Yulong, E-mail: yulong_tan2014@163.com

高温作业(如冶金、消防、建筑、港口码头等)是许多青年男性从事的领域。全球气候变化造成极端热浪频繁出现,高温环境已经成为影响青年男性作业效能和身体健康的重要风险因素。高温环境下进行高强度作业会导致热应激,诱发机体产生众多不良反应,如脱水、炎症、心血管应变、中枢性疲劳和认知功能下降[1-3],不仅影响体力、耐力、注意力以及反应速度等,降低作业效能,甚至可能引发中暑、热射病等热相关疾病,危及生命[4]。

既往的研究多集中在通过反复暴露于热环境形成热习服与未有热习服人群之间的差异特征及其潜在的机制探索。然而,不同的个体在面对相同高温环境时天然存在一定程度热耐受能力的差异,在动物研究中已发现,这可能源于多种因素,如种族(种属)差异、遗传因素、肠道菌群等方面[5]。当前只有少数研究试图揭示人群热耐受能力的差异特征[6-7],且多在年龄、性别和身体成分等个体因素方面进行探索。虽然已有研究报道在炎热环境中运动对生化和激素水平有影响[8],但评估与热耐受能力相关的差异特征的证据仍然有限。

本研究旨在通过系统性研究青年男性在基本生理特征、生活行为特征以及血清生化和激素水平的差异,揭示不同热耐受能力青年男性在生理生化指标和生活习惯等层面的差异特征,探究个体热耐受水平的

影响因素。明晰热耐受差异的关键表征及影响因素,不仅能够为高温作业环境下青年男性的职业健康防护、热应激风险评估和热相关疾病的早期预防与干预提供可靠科学依据,还可为高温特殊环境中青年男性的人员选拔、岗位适配、任务部署、个性化耐热训练和体能提升方案的制定提供重要的理论支撑与实践参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究采用横断面研究设计方案,于2024年3月25日至4月6日以便利抽样法选取海南省的青年男性作为研究对象。纳入标准:①年龄18~35周岁的健康青年男性;②在海南省居住≥12个月;③日常有高强度活动和训练经历;④自愿参与并签署知情同意书。排除标准:①近1个月内有发烧、感冒、腿脚受伤或其他服药情况;②中途退出的参与者。研究初步招募符合基础条件受试者共180人,其中20人因问卷、血清生化、热耐受测试等关键指标信息缺失予以剔除,最终纳入资料完整、数据无缺失的研究对象160例,样本有效纳入率88.9%。"其他服药情况"指因各种疾病原因服用药物,服药范围包含但不限于心血管调节药物、糖皮质激素/利尿剂、镇静催眠类制剂、解热镇痛药物等。因上述药物可能会干扰体温调节、循环功能、血清生化与激素检测结果,易对后续指标产生混杂偏倚,故作排除。本研究已获得陆军军医大学伦理委员会批准(2023第2-02)。

1.2 主要仪器与试剂

移动式高温高湿环境模拟帐篷(陆军军医大学热带医学教研室研制)用BGP1506暖风机和AST除湿机稳定环境温湿度,用RETRONIC温湿度记录仪监测帐篷内温湿度变化。采用耳温仪(SV222,菲明格,中国)和心率带(POLAR H10,加拿大)监测核心温度和心率。小米米家智能跑步机(M2,小米,中国)控制运动速度。人体成分分析仪(InBody370,韩国)进行体脂成分检测。全自动生化免疫分析仪(VITROS 5600,强生,美国)检测血清生化指标。皮质醇(RD-RX11149-96T)、醛固酮(RD-RX11204-96T)ELISA试剂盒(瑞达恒辉,中国)检测皮质醇和醛固酮水平。全自动化学发光免疫分析仪(UniCel DxI 800,贝克曼,美国)检测血睾酮水平。

1.3 热耐受测试流程

1.3.1 热耐受测试前准备 研究前统一组织全部受试者于早餐前7:00~8:00完成空腹采血,采集肘正中静脉外周血20 mL,采血器具选用内含分离胶与促凝剂的真空血清采血管,然后填写调查问卷。人体成分分析仪测定身高、体质量和体脂肪率。每日上午8:30~11:30,全部受试者以每批次30人进行热耐受测试,以尽量减少昼夜节律的影响。参与者在封闭房间内称取裸重后停止饮水或排尿,右耳佩戴耳温仪用于监测核心温度,胸部佩戴POLAR H10心率带监测心率,数据连续显示并自动存储。参与者身着短袖和短裤在常温环境(环境温度为27.3 ℃,相对湿度60%)静坐10 min以上,记录静息状态下平均基础体温和心率。

1.3.2 热耐受测试 在移动式高温高湿环境模拟帐篷中进行热耐受测试,环境温度为(40±1)℃,相对湿度为60%±5%,参与者在小米跑步机上以7 km/h的速度进行1 h不间断行走,通过电脑实时采集体温(T)和心率(heart rate,HR)数据,测试结束后,再次进入封闭房间称取裸重并计算脱水率。热耐受测试参考以色列国防军的热耐受测试方案[9]并通过前期预实验进行条件改良。

1.3.3 热耐受测试后分组标准 根据完成情况和结束时体温、心率,将参与者分为不耐热(heat-intolerant,HIT)组:自觉不能坚持完成测试者,或因T≥39.5 ℃或HR≥180次/min被立即叫停测试者;一般耐热(moderate heat-tolerant,MHT)组:完成测试且T>38.5 ℃或HR>150次/min;超强耐热(superior heat-tolerant,SHT)组:完成测试且T≤38.5 ℃且HR≤150次/min。

1.4 方法

1.4.1 基本生理指标测量

检测所有参与者的身高、开始前和结束时的体质量,全过程监测体温和心率,计算BMI,ΔT,ΔHR,脱水率。体表面积(body surface area,BSA)根据许文生氏公式计算。根据公式计算生理紧张指数(physiological strain index,PSI)[10]和体内蓄热指数(body heat storage index,BHSI)。

$$PSI=5\times\frac{(Trec_{end}-Trec_{\text{base}})}{(39.5-Trec_{\text{base}})}+5\times\frac{(HR_{end}-HR_{base})}{(180-HR_{base})}$$

式中,$Trec_{end}$为结束时刻的核心温度值,℃;$Trec_{base}$为初始时刻的核心温度值,即人体在热环境劳动前核心温度的初始值,℃;HR_{end}为结束时刻的心率值,bpm;HR_{base}为初始时刻的心率值,即人体在热环境劳动前心率的初始值,bpm;180表示心率的上限设为180 bpm;39.5表示核心温度的上限设为39.5 ℃。

$$BHSI=\frac{(W\times 0.83\times\Delta T_b)}{A}$$

式中,0.83为人体组织的平均比热容,kcal;W为体质量,kg;ΔT_b为平均体温的升高值,℃;A为体表面

积,m^2。

1.4.2 问卷调查及其质量控制

1.4.2.1 问卷编制与内容效度评价 问卷制定基于文献查阅及研究小组(由1名教授、1名副教授、1名高级实验师、3名讲师和1名实验师组成)会议讨论,并邀请6位预防医学相关领域专家完成问卷内容效度评价,内容效度指数为0.832,专家一致认为问卷条目可完整覆盖研究所需观测指标,无冗余、遗漏。

1.4.2.2 问卷现场实施与条目赋值 问卷于热耐受测试前统一通过问卷星发放,由2名经过统一培训的调查员现场指导受试者独立填写,确保信息真实准确。吸烟、失眠、中暑病史采用二分类(是或否),中暑病史是以发病时经过医生确认并接受救治为是,未经医生确认和救治为否;日常饮水习惯和常住环境适应性采用Likert 3点计分法(1=少/差;2=一般;3=充足/好);体能水平根据参与者近期自测的3 000 m跑、引体向上、仰卧起坐3项原始成绩经标准化后计算总分,进行4级评分:差、中、良和优。

1.4.2.3 问卷信度检验与数据质量控制 本问卷在正式试验前招募30名符合纳入标准的预调查对象,间隔7 d完成2次问卷填写。结果表明:有序分类指标(饮水、体能和环境适应性)的重测组内相关系数为0.841;二分类指标(吸烟、失眠和中暑病史)的重测Kappa系数介于0.782~0.815之间;所有重测信度均达到统计学要求,问卷复测稳定性良好。问卷结果提取后,采用双人核对方式进行数据核查与校正。

1.4.3 血清生化指标和激素水平检测

热耐受测试前抽取每位参与者空腹血20 mL,室温静置后以3 000 r/min离心15 min分离血清,在-80 ℃冰箱中保存备用。检测所有血清样本中天冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase,AST)、丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase,ALT)、尿素氮(urea nitrogen,UREA)、肌酐(creatinine,Cr)、肌酸激酶(creatine kinase,CK)和肌酸激酶MB同工酶(creatine kinase-MB,CK-MB)水平以及血清中皮质醇、醛固酮和血睾酮水平。

1.5 统计学分析

数据录入SPSS24.0软件进行统计分析,2组定量资料比较,若数据满足正态分布、方差齐性,采用独立样本t检验,计量资料以$\bar{x}\pm s$描述;若数据不满足正态分布或方差不齐,采用两独立样本秩和检验(Mann-Whitney U检验),计量资料以$M(P_{25},P_{75})$描述。连续数值型变量3组间比较若服从正态分布,采用单因素方差分析,数据以$\bar{x}\pm s$表示,不服从正态分布,采用非参数检验(Kruskal-Wallis H检验),数据以$M(P_{25},P_{75})$表示。分类型变量3组间比较均采用秩和检验,数据以频数(%)表示。使用BMI、体脂肪率、Cr、ALT、皮质醇、血睾酮、吸烟、失眠、中暑病史、体能水平、环境适应性作为自变量进行有序Logistic回归分析预测热耐受能力(因变量)。以$P>0.05$通过平行性检验判定有序Logistic回归分析的准确性。$P<0.05$表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 改良后的热耐受测试能有效区分热耐受能力差异

通过对160位参与者进行统一的热耐受测试后,根据完成情况和结束时体温、心率,将人群分为HIT组(35人),NHT组(81人)和SHT组(44人)。但考虑到HIT组的参与者因结束测试时间不一致,采集数据的变异值较大,为避免造成干扰,仅对MHT组和SHT组进行2组间差异比较。结果显示,与MHT组比较,SHT组的ΔT、ΔHR、PSI和BHSI明显更低,脱水率明显更高,差异均有统计学意义($P<0.001$,表1),提示SHT组青年男性的心血管系统和体温调节能力更佳、散热能力更强。以上结果表明,当前的测试方案能够较好的区分青年男性的热耐受能力差异,文中后续以此对各组参与者的热耐受测试前相关指标进行统计分析。

2.2 较高的BMI和体脂肪率与机体热耐受能力下降相关

本研究3组之间平均年龄相近,身高、体质量和BSA差异均无统计学意义,但SHT组的体质量和BSA较HIT组有减少趋势。不耐热组的BMI($P=0.017$)和体脂肪率($P=0.002$)显著高于NHT组和SHT组。以上结果表明,较高的BMI和体脂肪率与热耐受能力下降相关。见表2。

2.3 吸烟、失眠、中暑史、体能及环境适应性是热耐受水平的相关影响因素

问卷调查结果显示,3组间吸烟行为分布差异具有统计学意义($H=9.312$,$P=0.010$),HIT组吸烟比例最高(68.6%),SHT组吸烟比例最低(34.1%);3组间失眠情况分布差异具有统计学意义($H=7.429$,$P=0.024$),HIT组失眠(80.0%)高于NHT组(53.1%)与SHT组(59.1%);3组间日常饮水等级构成分布相近,整体比较差异无统计学意义。既往中暑病史分布组间差异具有统计学意义($H=7.948$,$P=0.019$),HIT组既往中暑史人员(34.3%)明显高于NHT组(18.5%)与SHT组(9.1%)。体能等级构成组间差异具有统计学意义($H=12.191$,$P=0.002$),热耐受水平越高,体能评

表1 热耐受测试的生理指标差异[$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Table 1 Differences in physiological indicators during heat tolerance test [$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Item	MHT group(n=81)	SHT group(n=44)	t/Z	P
ΔT/℃	2.7±0.8	1.0±0.5	13.953	<0.001
ΔHR/bpm	66.5±15.3	55.7±12.4	4.019	<0.001
Dehydration rate/%	1.9(1.6,2.2)	2.5(2.4,2.8)	−7.308	<0.001
PSI	8.2±1.5	4.6±1.0	16.466	<0.001
BHSI	82.0(69.2,99.9)	32.4(21.7,43.8)	−8.617	<0.001

HR: heart rate; PSI: physiological strain index; BHSI: body heat storage index

表2 不同热耐受能力青年男性的基本生理特征[$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Table 2 Basic characteristics of young adult males with different heat tolerance levels [$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Item	HIT group(n=35)	MHT group(n=81)	SHT group(n=44)	F/H	P
Age/years	22.8±2.4	22.7±2.4	23.1±2.5	0.410	0.665
Height/cm	173.7±5.8	173.0±5.7	173.5±4.9	0.231	0.794
Body weight/kg	71.9(65.1,80.8)	67.2(61.4,75.2)	66.7(63.2,71.9)	5.674	0.059
BMI/(kg/m^2)	24.1(21.9,25.5)	22.1(21.1,25.0)	22.6(21.5,23.8)	8.105	0.017
BSA/m^2	1.8(1.7,2.0)	1.8(1.7,1.9)	1.8(1.7,1.9)	4.483	0.106
Body fat percentage	13.8(10.9,15.6)	12.7(11.1,13.8)	11.6(10.7,12.7)	12.211	0.002

HIT: heat intolerance; BMI: body mass index; BSA: body surface area

级为“优”的人员占比越高,HIT组体能优秀者占比最低(14.3%),SHT组体能优秀人员占比最高(43.2%)。环境适应性分级构成在3组间差异有统计学意义(H=23.772,P<0.001),HIT组环境适应性评级为“一般”的人员占比最高(57.1%),NHT组与SHT组环境适应性评级为“好”的人员占比均接近80%。综上,吸烟、失眠、既往中暑病史、体能水平和环境适应性分别与青年男性热耐受分级存在明显关联,是影响热耐受水平差异的生活行为因素。见表3。

2.4 血清Cr、ALT、皮质醇及血睾酮水平升高与热耐受能力下降相关

血清生化指标和激素水平检测结果显示,肾功能指标Cr(P<0.001)和肝功能指标ALT(P<0.001)在3组不同耐热能力青年男性中有显著差异,其中HIT组的Cr(94.0 μmol/L *vs* 85.0 μmol/L)和ALT(20.6 IU/L *vs* 19.2 IU/L)水平显著高于SHT组;肾功能指标UREA、肝功能指标AST、心肌酶谱指标CK和CK-MB在3组不同耐热能力青年男性中都没有显著差异;皮质醇(P=0.002)和血睾酮(P=0.002)在3组不同耐热能力青年男性中有显著差异,其中HIT组的皮质醇(173.7 ng/mL *vs* 105.1 ng/mL)和血睾酮(5.3 ng/mL *vs* 4.2 ng/mL)水平显著高于SHT组;但醛固酮在3组中没有显著差异。见表4。

以上结果表明,不同热耐受能力青年男性在反映肾功能指标Cr和肝功能指标ALT上有显著差异,较高的血清Cr、ALT水平、皮质醇和血睾酮水平与热耐受能力下降相关。

2.5 Cr、ALT、血睾酮、吸烟、中暑病史、体能和环境适应性均为热耐受能力的影响因素

前面的统计分析筛选出了11个可能对热耐受能力有影响的变量,分别为BMI、体脂肪率、吸烟、失眠、中暑病史、综合体能成绩、环境适应性、Cr、ALT、皮质醇和血睾酮。对这11个变量继续进行后续的多因素分析。本研究以HIT组为参照组,采用有序Logistic回归,通过了平行线检验(P=0.998),表明以上的运算结果准确可靠。结果显示:BMI、体脂肪率、皮质醇、失眠、体能(中/良)、环境适应性(差)在模型中均未表现出对热耐受等级的独立影响(表5)。高Cr(OR=0.820,95%CI:0.762~0.882,P<0.001)、高ALT(OR=0.848,95%CI:0.751~0.957,P=0.008)和高血睾酮(OR=0.627,95%CI:0.448~0.875,P=0.006)水平是青年男性热耐受能力下降的独立危险因素,其回归系数分别为−0.199、−0.165和−0.468,均小于0,表明热耐受能力随着Cr、ALT和血睾酮升高而降低。吸烟、有既往中暑病史、体能差、环境适应性一般都是青年男性热耐受能力下降的独立危险因素。不吸烟和无中暑病史回归系数分别为1.085和1.354,不吸烟者表现为一般耐热或超强耐热的可能性是吸烟者的2.958倍

表3 不同热耐受能力青年男性的生活行为特征[例(%)]

Table 3 Lifestyle and behavioral characteristics of young adult males with different heat tolerance levels [n(%)]

Item	HIT group(n=35)	MHT group(n=81)	SHT group(n=44)	H	P
Smoking				9.312	0.010
Yes	24(68.6)	42(51.9)	15(34.1)		
No	11(31.4)	39(48.1)	29(65.9)		
Insomnia				7.429	0.024
Yes	28(80.0)	43(53.1)	26(59.1)		
No	7(20.0)	38(46.9)	18(40.9)		
Water intake				1.299	0.522
Sufficient	13(37.1)	36(44.4)	14(31.8)		
Moderate	20(57.1)	37(45.7)	26(59.1)		
Low	2(5.7)	8(9.9)	4(9.1)		
Heatstroke history				7.948	0.019
Yes	12(34.3)	15(18.5)	4(9.1)		
No	23(65.7)	66(81.5)	40(90.9)		
Physical fitness				12.191	0.002
Excellent	5(14.3)	32(39.5)	19(43.2)		
Good	17(48.6)	38(46.9)	17(38.6)		
Pass	10(28.6)	8(9.9)	8(18.2)		
Fail	3(8.6)	3(3.7)	0(0)		
Environmental adaptability				23.772	<0.001
Good	12(34.3)	64(79.0)	35(79.5)		
Moderate	20(57.1)	13(16.0)	7(15.9)		
Poor	3(8.6)	4(4.9)	2(4.5)		

表4 不同热耐受能力的青年男性血清生化指标和激素水平差异[$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Table 4 Differences in serum biochemical indices and hormone levels among young adult males with different heat tolerance levels[$\bar{x}\pm s$,$M(P_{25},P_{75})$]

Item	HIT group(n=35)	MHT(n=81)	SHT group (n=44)	F/H	P
UREA/(mmol/L)	6.9±1.6	6.6±1.2	6.5±1.5	0.805	0.449
Cr/(μmol/L)	94.0(90.0,97.0)	87.0(83.0,92.5)	85.0(79.0,89.0)	45.884	<0.001
ALT/(IU/L)	20.6(18.2,29.3)	20.8(18.6,22.6)	19.2(17.0,20.3)	17.856	<0.001
AST/(IU/L)	26.4(23.2,32.3)	27.6(24.1,31.9)	26.8(23.5,33.6)	0.614	0.735
CK/(IU/L)	252.6(203.3,374.7)	247.8(194.4,362.5)	221.9(167.6,324.7)	2.773	0.250
CK-MB/(IU/L)	12.8(9.7,16.8)	13.7(11.0,16.4)	11.9(10.3,15.2)	2.009	0.366
Cortisol/(ng/mL)	173.7(122.8,210.7)	129.3(94.6,184.2)	105.1(78.3,159.8)	12.978	0.002
Aldosterone/(pg/mL)	0.9±0.2	0.8±0.2	0.9±0.2	1.015	0.365
Serum testosterone/(ng/mL)	5.3(4.5,5.8)	4.7(3.9,5.6)	4.2(3.6,5.3)	12.926	0.002

UREA: urea nitrogen; Cr: creatinine; ALT: alanine aminotransferase; AST: aspartate aminotransferase; CK: creatine kinase; CK-MB: creatine kinase-MB

(*OR*=2.958,95%*CI*:1.379~6.346,*P*=0.005)。无中暑病史者表现为一般耐热或超强耐热的可能性是有中暑病史者的3.872倍(*OR*=3.872,95%*CI*:1.451~10.328,*P*=0.007)。体能差和环境适应性一般者回归系数分别为-3.065和-1.274,体能差者表现一般耐热或超强耐热的可能性仅为体能优秀者的4.7%(*OR*=0.047,95%*CI*:0.006~0.383,*P*=0.004)。环境适应性一般是热耐受独立危险因素(*OR*=0.280,95%*CI*:0.107~0.730,*P*=0.009)。综上,有序Logistic回归结果显示:Cr、ALT、血睾酮为热耐受的危险因素;无吸烟、无中暑病史可表现出较强的热耐受;相较于体能优秀人群,体能差者热耐受水平显著降低;环境适应性一般者的热耐受性低于适应良好人群;BMI、体脂率、皮质醇、失眠与热耐受性之间均无独立显著关联。

表5 不同热耐受能力青年男性影响因素的有序Logistic回归分析

Table 5 Ordinal logistic regression analysis of influencing factors for heat tolerance in young adult males with different heat tolerance levels

Item	Regression coefficient	*OR*(95%*CI*)	*P*
BMI	−0.102	0.903(0.757—1.076)	0.255
Body fat percentage	−0.155	0.857(0.689—1.065)	0.164
Cr	−0.199	0.820(0.762—0.882)	<0.001
ALT	−0.165	0.848(0.751—0.957)	0.008
Cortisol	−0.005	0.995(0.988—1.002)	0.182
Serum testosterone	−0.468	0.627(0.448—0.875)	0.006
Smoking			
Yes	0	1(reference)	−
No	1.085	2.958(1.379—6.346)	0.005
Insomnia			
Yes	0	1(reference)	−
No	0.111	1.117(0.524—2.383)	0.775
Heatstroke history			
Yes	0	1(reference)	−
No	1.354	3.872(1.451—10.328)	0.007
Physical fitness			
Excellent	0	1(reference)	−
Good	−0.303	0.739(0.315—1.732)	0.486
Pass	0.040	1.041(0.313—3.455)	0.948
Fail	−3.065	0.047(0.006—0.383)	0.004
Adaptability			
Good	0	1(reference)	−
Moderate	−1.274	0.280(0.107—0.730)	0.009
Poor	−1.608	0.200(0.040—1.010)	0.051

BMI: body mass index; Cr: creatinine; ALT: alanine aminotransferase; *OR*: odds ratio; *CI*: confidence interval

表6 不同热耐受能力分组的预测准确率(例)

Table 6 Crosstab of different heat tolerance groups(*n*)

Groups		Predicted response categories			Original group	Classification accuracy/%
		HIT group	MHT group	SHT group		
Predicted group	HIT group	22	13	0	35	62.86
	MHT group	4	64	13	81	79.01
	SHT group	0	18	26	44	59.10
Predicted total		26	95	39	160	70.00

2.6 热耐受分级预测模型具有较好的区分效能

更进一步,按照以上的运算结果对能显著影响热耐受能力的7项变量(Cr、ALT、血睾酮、吸烟、中暑病史、体能水平和环境适应性)进行混淆矩阵分析,结果显示,所有参与者中预测为HIT组26人,NHT组95人,SHT组39人,表明通过有序Logistic回归评估青年男性热耐受分级的整体预测准确率为70.00%。其中,NHT组的预测准确率最高(79.01%),HIT组次之(62.86%),SHT组最低(59.10%),未出现跨级误判。结果提示对热耐受等级的顺序区分稳定,具有良好的区分效能。见表6。

3 讨论

3.1 体型和体脂成分是影响热耐受能力的重要外在生理条件

据报道,年龄会影响人体热耐受能力,与年轻人相比,中老年人热耐受性更低,更容易出现不耐热症状[11]。本研究对象均为年龄相近的青年男性,不同热耐受组间的年龄和身高无显著差异,消除了年龄、身高对组间热耐受差异的混杂干扰。多项研究表明,身体成分相关指标,如体脂肪率、BMI、体表面积和体表面积与体质量比(BSA/M)等对耐热性产生影响[6,12-13]。

此外,BSA/M比值、体脂肪率、脱水率和有氧能力是男性和女性热耐受性差异的重要原因[7,14]。本研究针对海南常住青年男性人群分析显示,BMI和体脂肪率均与热耐受能力存在关联,BMI偏高者在高温暴露下整体热耐受水平更低。已有文献表明,BMI较高的个体在热适应过程中其核心温度的适应程度低于BMI较低的个体,且肥胖个体在高温环境下热耐受性较差[15]。有研究将受试者按体脂肪率高低分为高脂肪率组和低脂肪率组进行热应激测试,结果表明,低体脂肪率组可延长热应激耐受时间,高体脂肪率组与较快的热储存率和较短的运动耐受时间显著相关[16]。针对美国陆军和海军陆战队的新兵研究也表明,与BMI在正常范围内的军人相比,肥胖军人热耐受能力更低,且发生劳力性热射病的风险更高[17-19]。

3.2 生活行为特征是影响热耐受能力的重要独立危险因素

在生活环境基本一致的条件下,能影响热耐受能力的因素可能更多受个人生活行为特征的影响。本研究结果显示,吸烟、失眠、既往中暑病史、体能水平及环境适应性均是青年男性热耐受分级的独立影响因素。有研究指出个人吸烟习惯对散热能力有负面影响,通过造成肺通气不良,损害有氧代谢能力,还易诱发高血压等心血管疾病,从而增加热致疾病风险[20]。有序Logistic回归分析显示,吸烟者热耐受水平呈现出降低趋势。一项针对年轻吸烟者的研究也指出,吸烟可能损害乙酰胆碱诱导的皮肤血管舒张功能,这类似于衰老对内皮功能的影响,进一步限制了热应激时必要的皮肤血流增加,可能导致热耐受能力下降[21]。当然,吸烟存在剂量累积效应,长期多年或大量吸烟才会显著损伤散热功能、降低热耐受;本研究仅区分是否吸烟,无吸烟年限、日吸烟量等详细数据,结论仅可做定性风险参考,无法量化不同吸烟程度的影响。未来研究需更详细收集日吸烟量和累计吸烟年限等量化分层指标,计算包年指数,以考察吸烟剂量累积效应。对于有中暑史的人群,在热浪期间或进行高温作业时,需要采取严格的防护措施。《部队热习服指南》中指出,对于有中暑史的人群,通过科学的热习服训练提高热耐受能力尤为重要[22]。多项关于中暑高危因素的研究指出,“既往中暑史”是中暑发生的重要经验性风险因素[23],但并未提供具体的量化数据或再发风险率。本研究在问卷调查时特别说明中暑病史以是否经过医生确认并接受救治为判定标准,结果表明有中暑史人群热耐受水平整体偏低。但未对中暑发作频次和分型做进一步采集,在未来研究计划中增加中暑相关量化分层指标的优化方案,明确结论适用边界,提升研究结论精准度。体能水平是热耐受的重要保护性因素。澳大利亚的1项研究证实,运动能力是军事及非军事人群热不耐受的预测因素[13]。良好的心肺功能与肌肉储备可提升热应激下的心输出量,保障散热器官的血液供应,此外,规律运动所带来的机体适应性改变,可以优化汗腺分泌功能、提高机体对高温的代偿阈值[24]。已有研究表明,个体热适应状态是影响热耐受能力的重要因素[25],长期接触高温环境形成的环境适应,能够下调机体交感神经兴奋性、改善体温调节中枢应答模式,降低高温刺激带来的应激反应。本研究在招募研究对象时,要求在海南常住时间至少为1年,且日常有高强度活动和训练经历,已在一定程度上控制上述因素对热适应状态的潜在干扰。然而,仅依靠纳入标准仍不足以完全排除训练强度、热环境适应时长等个体化混杂变量的影响。后续研究在招募参与者时,应系统性记录并量化日常活动与训练强度、生活与热接触环境、在琼累计居住时长等更全面的环境适应史及训练背景资料,并将其纳入多因素分析模型,以进一步区分各因素对热耐受能力的独立效应及交互效应。

3.3 基础肝、肾功能状态是影响热耐受能力的重要内在生理条件

据报道,肌肉和肾脏功能的血清生化生物标志物在运动后升高,而ALT、AST、CK和Cr的升高程度取决于运动的类型、强度和持续时间[26]。这些生物标志物也被用于评估劳力性热射病的严重程度[27]。一项对澳大利亚军人的回顾性研究称,有中暑病史军人的血清生化标志物水平明显升高,如CK(6 523.1 U/L)、ALT(166.9 U/L)和AST(180.4 U/L)[28]。血清生化标志物也被广泛应用于监测劳力性热射病的临床恢复状态[27]。因此,我们在评估热耐受能力时考虑了这些临床生化标志物,Cr和ALT不仅在单因素分析中组间差异显著,且经多因素校正后仍为热耐受能力下降的独立危险因素,但需要说明的是Cr和ALT的水平都在正常范围内,只是与SHT组青年男性相比,HIT组的生理应变更高。鉴于热不耐受者的体能水平较低,或以往的工作或训练可能对其身体造成较大生理压力,因此这一结论还需要在更大规模的研究中进一步明确。

3.4 皮质醇和血睾酮水平反映热耐受能力的内分泌差异特征

在高温下进行长时间的高强度运动可能会影响

人体的激素反应并导致中暑症状。然而,在高温暴露人群中,关于血液中激素水平的研究很少[29]。本研究发现皮质醇和睾酮水平与耐热能力呈负相关关系。皮质醇是一种应激激素,高温诱导的热应激也可以促进机体产生皮质醇[30]。在高温环境下运动时,高温应激和机体对运动压力的应激有协同作用,皮质醇会显著升高[31]。Alele等[8]在对军人志愿者进行的耐热性评估中发现,当核心温度超过39 ℃时,皮质醇水平显著增加。此外,在高温下运动时中度脱水会引起血浆皮质醇的显著增加[32]。本研究发现,热耐受水平较低的青年男性基础皮质醇浓度显著更高。既往研究证实,良好的体能储备与运动训练可有效抑制机体过度分解代谢与应激反应,降低生理应激水平[33]。因此,不耐热人群皮质醇偏高,可能是其体能薄弱、基础生理应激应答更强烈的表征[34]。同时,长期体能训练可诱导机体产生类似热适应的心血管调节优势,稳定内分泌应激状态,抑制皮质醇异常升高,这也是超强耐热人群中皮质醇水平相对更低的重要原因[28]。在高温环境下,皮质醇稳态平衡对机体热耐受至关重要。持续高水平的皮质醇不仅会加重身心负荷、干扰认知与决策能力,还会显著增加劳力性热射病等重度热损伤的发生风险,严重时可危及生命[35-36]。因此,应考虑将皮质醇作为热耐受能力评价的潜在指标。睾酮作为一种雄性激素,具有广泛的生物学效应,但睾酮与热耐受能力之间的影响,目前缺乏直接的研究证据。有研究者在热暴露小鼠模型中发现,雄性小鼠在热暴露下的核心温度上升速度显著快于雌性小鼠,更容易发生热应激诱导的体温过高,通过去势可以降低核心体温,额外补充睾酮又可以逆转这一结果,表明睾酮有很强的热平衡调节作用,且是热应激易感因素[37]。这可能部分解释了在本研究中观察到血睾酮与热耐受能力之间的负相关关系。

需要说明的是,海南的高温高湿环境与单纯高温地区对人体的影响均以热应激为基础,均可导致核心体温升高、心率增加,因此本研究在基础生理指标层面的部分规律与已有文献具有一致性[38]。与单纯高温环境相比,高温高湿环境的决定性特征在于高相对湿度严重抑制了人体蒸发散热的效率。有文献提示,湿度从根本上改变了人体的负荷热调节模式,且湿热环境下的热耐受性比干热环境更差,因此湿度是加剧热应力的关键因素[39]。本研究样本为海南常住人群,长期暴露于湿热环境中,可能已形成一定程度的热适应,造成热耐受基线偏高[40]。这一情况使得本研究结论外推性有限,但研究揭示了湿热暴露人群的热应激反应模式。

本研究仍存在若干不足之处。第一,该研究对象来自常住海南地区的青年男性,可能已具备了一定的热适应能力,对于非常住热区的青年男性,该研究的预测指标需要进一步验证,未来可纳入不同地域、不同热暴露背景的人群,对比常住热区与非热区人群的热耐受特征差异,提升结论的普适性;第二,未来研究可结合宏基因组、代谢组学等多组学方法挖掘影响热耐受的深层机制,为高温人群热损伤预警、个性化热适应训练及职业健康防护提供更加精准的理论依据。

综上,本研究表明青年男性热耐受能力是外在生理形态、内在脏器功能、内分泌水平与后天生活行为等共同作用的结果。其中,生活行为属于人为可控因素,可通过戒烟、科学体能训练、环境适应性训练等方式进行干预;而基础肝肾功能作为重要内在生理条件,可作为热耐受风险评估的关键参考指标。本研究有助于对高温环境下青年男性的职业健康与安全,预防热相关疾病提供科学依据,并对高温环境下青年男性的个性化训练方案、选拔或任务部署提供理论依据。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] Rodrigues Júnior J F C, Mckenna Z, Amorim F T, *et al*. Thermoregulatory and metabolic responses to a half-marathon run in hot, humid conditions[J]. J Therm Biol, 2020, 93: 102734. DOI:10.1016/j.jtherbio.2020.102734.

[2] Schlader Z J, Schwob J, Hostler D, *et al*. Simultaneous assessment of motor and cognitive tasks reveals reductions in working memory performance following exercise in the heat [J]. Temperature (Austin), 2022, 9(4): 344-356. DOI: 10.1080/23328940.2021.1992239.

[3] Lee J K W, Tan B, Ogden H B, *et al*. Exertional heat stroke: nutritional considerations[J]. Exp Physiol, 2022, 107(10): 1122-1135. DOI:10.1113/EP090149.

[4] Bouchama A, Abuyassin B, Lehe C, *et al*. Classic and exertional heatstroke[J]. Nat Rev Dis Primers, 2022, 8(1): 8. DOI:10.1038/s41572-021-00334-6.

[5] 胡明, 李萍, 刘吉洛, 等. 热习服分子机制、特异性标志物及遗传差异研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2022, 47(10): 1034-1041. DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2022.10.1034.
Hu M, Li P, Liu J L, *et al*. Research progress on molecular mechanism, specific markers and genetic differences of heat

acclimatization[J]. Med J Chin PLA, 2022, 47(10): 1034-1041. DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2022.10.1034.

[6] Lisman P, Kazman J B, O'Connor F G, *et al*. Heat tolerance testing: association between heat intolerance and anthropometric and fitness measurements [J]. Mil Med, 2014, 179(11): 1339-1346. DOI: 10.7205/milmed-d-14-00169.

[7] Kazman J B, Purvis D L, Heled Y, *et al*. Women and exertional heat illness: identification of gender specific risk factors[J]. US Army Med Dep J, 2015: 58-66.

[8] Alele F O, Malau-Aduli B S, Malau-Aduli A E O, *et al*. Haematological, biochemical and hormonal biomarkers of heat intolerance in military personnel[J]. Biology, 2021, 10(10): 1068. DOI:10.3390/biology10101068.

[9] Schermann H, Craig E, Yanovich E, *et al*. Probability of heat intolerance: standardized interpretation of heat-tolerance testing results versus specialist judgment [J]. J Athletic Train, 2018, 53(4): 423-430. DOI: 10.4085/1062-6050-519-16.

[10] Moran D S, Shitzer A, Pandolf K B. A physiological strain index to evaluate heat stress[J]. Am J Physiol, 1998, 275(1): R129-R134. DOI:10.1152/ajpregu.1998.275.1.R129.

[11] Pandolf K B. Aging and human heat tolerance [J]. Exp Aging Res, 1997, 23(1): 69-105. DOI: 10.1080/03610739708254027.

[12] Havenith G, Inoue Y, Luttikholt V, *et al*. Age predicts cardiovascular, but not thermoregulatory, responses to humid heat stress[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1995, 70(1): 88-96. DOI:10.1007/BF00601814.

[13] Alele F O, Malau-Aduli B S, Malau-Aduli A E O, *et al*. Individual anthropometric, aerobic capacity and demographic characteristics as predictors of heat intolerance in military populations[J]. Medicina (Kaunas), 2021, 57(2): 173. DOI:10.3390/medicina57020173.

[14] Druyan A, Makranz C, Moran D, *et al*. Heat tolerance in women—reconsidering the criteria[J]. Aviat Space Environ Med, 2012, 83(1): 58-60. DOI:10.3357/asem.3130.2012.

[15] Brazelton S C, Charkoudian N, Bradbury K E, *et al*. Inter-individual variability in physiological adaptations during heat acclimation in adults: Contributions of body mass index and body size [J]. Physiol Rep, 2026, 14(2): e70713. DOI:10.14814/phy2.70713.

[16] Selkirk G A, McLellan T M. Influence of aerobic fitness and body fatness on tolerance to uncompensable heat stress[J]. J Appl Physiol (1985), 2001, 91(5): 2055-2063. DOI: 10.1152/jappl.2001.91.5.2055.

[17] Gardner J W, Kark J A, Karnei K, *et al*. Risk factors predicting exertional heat illness in male Marine Corps recruits[J]. Med Sci Sports Exerc, 1996, 28(8): 939-944. DOI:10.1097/00005768-199608000-00001.

[18] Wallace R F, Kriebel D, Punnett L, *et al*. Risk factors for recruit exertional heat illness by gender and training period [J]. Aviat Space Environ Med, 2006, 77(4): 415-421.

[19] Bedno S A, Urban N, Boivin M R, *et al*. Fitness, obesity and risk of heat illness among army trainees[J]. Occup Med (Lond), 2014, 64(6): 461-467. DOI: 10.1093/occmed/kqu062.

[20] Zlatar T, Mendes F, Vasconcelos B, *et al*. Lifestyle factors influencing heat stress response: a review [J]. CESET, 2018: 22-31.

[21] Moyen N E, Ganio M S, Burchfield J M, *et al*. Effect of passive heat stress on arterial stiffness in smokers versus non-smokers[J]. Int J Biometeorol, 2016, 60(4): 499-506. DOI:10.1007/s00484-015-1046-2.

[22] 宁波, 宋青.《部队热习服指南》解读[J]. 空军医学杂志, 2018, 34(4): 276-278, 289. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2018.04.018.
Ning B, Song Q. Interpretation of "Military Heat Acclimatization Guidelines" [J]. Med J Air Force, 2018, 34(4): 276-278, 289. DOI: 10.3969/j.issn.2095-3402.2018.04.018.

[23] Park J, Kim Y, Oh I. Factors affecting heat-related diseases in outdoor workers exposed to extreme heat[J]. Ann Occup Environ Med, 2017, 29(1): 30. DOI:10.1186/s40557-017-0183-y.

[24] Périard J D, Eijsvogels T M H, Daanen H A M. Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies [J]. Physiol Rev, 2021, 101(4): 1873-1979. DOI: 10.1152/physrev.00038.2020.

[25] Foster J, Hodder S G, Lloyd A B, *et al*. Individual responses to heat stress: implications for hyperthermia and physical work capacity [J]. Front Physiol, 2020, 11: 541483. DOI:10.3389/fphys.2020.541483.

[26] Sanchis-Gomar F, Lippi G. Physical activity—an important preanalytical variable[J]. Biochem Med, 2014, 24(1): 68-79. DOI:10.11613/BM.2014.009.

[27] Mitchell K M, Cheuvront S N, King M A, *et al*. Use of the heat tolerance test to assess recovery from exertional heat stroke[J]. Temperature (Austin), 2019, 6(2): 106-119. DOI:10.1080/23328940.2019.1574199.

[28] Alele F O, Malau-Aduli B S, Malau-Aduli A E O, *et al*. Epidemiology of exertional heat illness in the military: a systematic review of observational studies[J]. Int J Environ

Res Public Health, 2020, 17(19): 7037. DOI: 10.3390/ijerph17197037.

[29] Peake J. Heat, athletes, and immunity[J]. Am J Lifestyle Med,2010,4(4):320-326.DOI:10.1177/1559827610362969.

[30] Brenner I, Shek P, Zamecnik J, *et al*. Stress hormones and the immunological responses to heat and exercise[J]. Int J Sports Med, 1998, 19(2): 130-143. DOI: 10.1055/s-2007-971895.

[31] Brooks K, Carter J. Overtraining, exercise, and adrenal insufficiency[J]. J Nov Physiother, 2013, 3(125): 11717. DOI:10.4172/2165-7025.1000125.

[32] Brandenberger G, Candas V, Follenius M, *et al*. Vascular fluid shifts and endocrine responses to exercise in the heat [J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 1986, 55(2): 123-129. DOI:10.1007/BF00714993.

[33] Costello J T, Rendell R A, Furber M, *et al*. Effects of acute or chronic heat exposure, exercise and dehydration on plasma cortisol, IL-6 and CRP levels in trained males[J]. Cytokine, 2018, 110: 277-283. DOI: 10.1016/j.cyto.2018.01.018.

[34] Cramer M N, Jay O. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress[J]. Auton Neurosci, 2016, 196: 3-13. DOI:10.1016/j.autneu.2016.03.001.

[35] van den Bos R, Harteveld M, Stoop H. Stress and decision-making in humans: Performance is related to cortisol reactivity, albeit differently in men and women [J]. Psychoneuroendocrinology, 2009, 34(10): 1449-1458. DOI:10.1016/j.psyneuen.2009.04.016.

[36] Hill E E, Zack E, Battaglini C, *et al*. Exercise and circulating cortisol levels: the intensity threshold effect[J]. J Endocrinol Invest, 2008, 31(7): 587-591. DOI:10.1007/BF03345606.

[37] Chen Y F, Yu T Z. Testosterone mediates hyperthermic response of mice to heat exposure[J]. Life Sci, 2018, 214: 34-40. DOI:10.1016/j.lfs.2018.10.058.

[38] Bartman N E, Vargas N T, Cavuoto L A, *et al*. Heat strain differences walking in hot-dry and warm-wet environments of equivalent wet bulb globe temperature [J]. Temperature, 2024, 11(4): 333-349. DOI: 10.1080/23328940.2024.2384185.

[39] Weitz C A. Coping with extreme heat: current exposure and implications for the future [J]. Evol Med Public Heal, 2024, 12(1): 156-168. DOI:10.1093/emph/eoae015.

[40] Daanen H A M, Racinais S, Périard J D. Heat acclimation decay and re-induction: a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Med, 2018, 48(2): 409-430. DOI: 10.1007/s40279-017-0808-x.

(收稿:2026-05-15;修回:2026-07-21)

(编辑 栾 嘉)