

运动生理学中红外热成像技术的应用及研究进展

曾显湘¹, 汤春雪¹, 邓雨潇¹, 石丽君^{1,2}

(1. 北京体育大学运动生理学教研室, 北京 100084; 2. 国家体育总局运动应激适应重点实验室, 北京 100084)

摘要: 红外热成像技术(IRT)凭借其非接触性及轻量化特点, 日益受到运动生理学领域的关注和应用。研究结合文献综述与实证研究, 探究恒定负荷耐力运动、递增负荷运动及抗阻运动的皮肤温度(T_{sk})变化规律、应用现状及生理机制, 并从设备、环境、个体因素及分析方法等影响IRT测温的因素入手, 构建运动中基于IRT的 T_{sk} 检测标准化流程, 以推进IRT在运动生理学领域的实践应用。

关键词: 红外热成像技术; 运动生理学; 皮肤温度; 标准化流程

中图分类号: G818.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2025)04-0510-07

Application and Research Progress of Infrared Thermography in Exercise Physiology

ZENG Xianxiang¹, TANG Chunxue¹, DENG Yuxiao¹, SHI Lijun^{1,2}

(1. Department of Exercise Physiology, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. Laboratory of Sports Stress and Adaptation of General Administration of Sport of China, Beijing 100084, China)

Abstract: Owing to its noncontact and lightweight characteristics, infrared thermography (IRT) has been increasingly recognized and applied in exercise physiology. This study combines a literature review and empirical research to investigate the patterns of skin temperature (T_{sk}) changes, the application status, and the physiological mechanisms of constant-load endurance exercise, incremental load exercise, and resistance exercise. It also aims to construct a standardized process for IRT-based T_{sk} detection in exercise, considering factors that affect IRT temperature measurements, such as equipment, environment, individual differences, and analysis methods, to promote the practical application of IRT in the field of exercise physiology.

Keywords: infrared thermography, exercise physiology, skin temperature, standardized processes

0 引言

红外热成像技术(infrared thermography, IRT)是一种实时、非侵入性移动拍摄技术^[1], 可测量物体发出的红外辐射, 并将其转换为数字化温度图像。1917年该技术应用于军事领域, 用于开发狙击手夜视功能。随着摄像机镜头及红外探测器技术的快速发展, IRT逐步应用于工程、建筑评估及医学成像等领域, 并凭借其非接触性特点, 日益受到运动生理学领域学者们的关注。基于IRT的运动生理研究常聚焦于检测运动期间皮肤温度(skin temperature, T_{sk})的变化, 以探究机体体温调节机制。以往研究已形成IRT静态 T_{sk} 检测标准化流程, 如医学成像等, 但在运动过程中, 基于IRT检测的动态 T_{sk} 变化规律及生理机制

尚待详细阐明。因此, 本研究旨在对IRT运动生理学领域相关文献进行综述, 以了解不同运动类型下运动区域的 T_{sk} 变化特征、应用现状及生理机制, 构建运动中基于IRT的 T_{sk} 测量标准化流程, 促进IRT在运动生理学领域的应用实践。

1 基于IRT在不同运动类型中 T_{sk} 变化特征及应用现状

文献汇总^[2-7]可知, 运动生理学中基于IRT检测的 T_{sk} 常用指标有, ①定量指标: 平均温度(\bar{T}_{sk})、最高温度($T_{sk\ max}$)、最低温度($T_{sk\ min}$)和温差(ΔT_{sk}); ②定性指标: 热对称性。此外, 在运动期间, 人体皮肤常出现一些特殊辐射图案: 穿孔体表面辐射图案(perforasome surface radiation pattern, P-Psr)、均匀

收稿日期: 2024-04-08; 修订日期: 2024-06-18。

作者简介: 曾显湘(1998-), 硕士研究生, 研究方向为运动生理学机制研究。E-mail: 1627448337@qq.com。

通信作者: 石丽君(1972-), 教授, 博士, 博士研究生导师, 研究方向为运动与心血管健康促进。E-mail: shilj@bsu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3600201), 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2024JCYJ001)。

表面辐射图案 (homogeneous surface radiation pattern, H-Psr) 及静脉表面辐射图案 (venous surface radiation pattern, V-Psr)。

其中, \bar{T}_{sk} 是最具有代表性的区域测量指标, 常用于体温调控生理机制及疾病和损伤检测研究; $T_{sk\ max}$ 适用于疼痛点及局部炎症的恢复反馈研究; 经由 $T_{sk\ max}$ 与 $T_{sk\ min}$ 相减获得的 ΔT_{sk} , 常用于检测身体是否存在疾病^[2], 如机体正常温度区域出现低温状态或是低温区域出现高温, 均可进行 ΔT_{sk} 测量, 以此判断该部位是否存在异常。

定性指标中, 热对称性常用于评估身体或关节两侧皮肤的温度差, 以推测运动损伤风险^[3]。P-Psr、H-Psr 及 V-Psr 为运动中出现的特殊辐射图案, 常用以揭示机体的体温调节机制。P-Psr 遍布全身, 呈“雪花”或“斑点”状, 出现于耐力性运动中及运动后恢复期, 用以探究穿孔体血管舒缩调节下的散热途径, 也可侧面反映交感神经活动状态; H-Psr 出现于小肌肉群进行抗阻运动的皮肤表面, 呈“均匀”或“高亮”状, 显示局部区域正处于快速散热状态; V-Psr 出现于大肌肉群抗阻运动的皮肤表面, 呈“树形”或“条纹”状, 反映了身体局部热量主要通过皮肤浅表静脉进行辐射散热。

基于 IRT 的运动 T_{sk} 研究汇总, 将运动类型划分为恒定负荷耐力运动 (跑步或自行车运动, 时间超过 10 min, 运动负荷恒定)、递增负荷运动 (跑步或自行车运动, 强度逐级递增) 及抗阻运动 (传统力量训练, 运动时间小于 10 min)。

1.1 恒定负荷耐力运动

涉及恒定负荷耐力运动的 IRT 研究, T_{sk} 检测区域通常包括: 前额、脸部、内眼角、颈部、胸部、腹部、上臂、手背等。在运动刚开始时, 运动区域的 T_{sk} 出现短暂上升, 提示机体处于运动激活状态; 运动至前期, 机体产热和散热失衡, 运动区域 T_{sk} 下降; 运动至中期, 机体体温调节达到新的平衡, 运动区域 T_{sk} 仅在小范围内波动, 随时间变化 T_{sk} 曲线变平缓; 在运动结束时, 运动区域会出现特殊辐射图案 P-Psr^[7], 该现象与身体核心温度升高, 血液被转移到表面并通过周围穿孔体血管舒张进行散热有关。值得注意的是, 非运动区 T_{sk} 的变化与负荷强度的关系仍存争议。如进行 50 W 和 150 W 恒定负荷自行车运动 20 min, 50 W 使胸腹部 T_{sk} 降低 1.5°C~2.0°C, 而 150 W 会使前额 T_{sk} 下降 3°C~6°C^[8]; 但 Zontak 等人^[5]在 50%、70% 及 90% 的最大摄氧量 ($VO_{2\ max}$) 强度下, 通过对比自行车运动时的手背 T_{sk} , 并未发现显著差异。而关于能否通过 T_{sk} 推测核心温度变化方面, 研究结

果不一。Fernandes 等人^[9]比较了安静状态 30 min、60% $VO_{2\ max}$ 强度跑步 30 min 及跑步后被动恢复 60 min 的 3 种状态下, IRT 检测的内眼角温度与胃肠遥测丸测得的核心温度的相关性, 结果显示两者相关性较差; Bourlai 等人^[10]发现, 在炎热的环境中, 通过检测身穿野外消防服的消防员以恒定负荷奔跑时的脸部 T_{sk} , 可推算核心温度; 且该学者认为通过面部的 T_{sk} 推算核心温度的方式, 可用于大规模人群发热的快速筛查。但该类研究仍存在许多局限性, 如未报告室温、样本量较少等, 未来需进一步探讨基于 IRT 的体温检测方法, 确定符合研究目的的最优测量区域, 并通过大数据进行差值补偿。

本研究团队近期在基于 IRT 的运动测试中发现, 恒定负荷耐力运动 (图 1) 开始时, 大腿 T_{sk} 轻微升高, 随后下降, 至第 10 min 达到最低点, 并保持相对稳定, 无显著波动, 直至运动结束; 相比之下, 前臂 T_{sk} 变化幅度较大, 运动开始便持续下降, 在第 10 min 时达到最低, 并随着运动进行呈上升趋势。该测试不仅证实前人的研究, 还发现在该运动方案下, 第 10 min 是腿及前臂 T_{sk} 的温度调节的转折关键点。

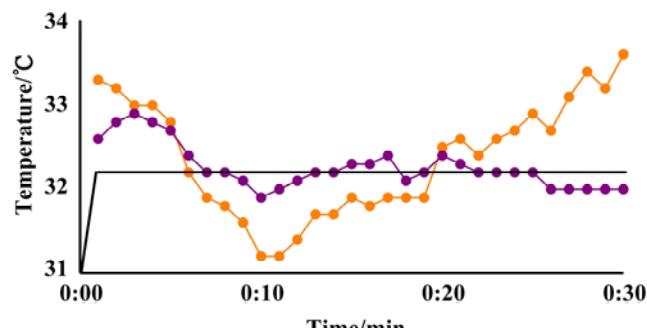


图 1 恒定负荷运动的 \bar{T}_{sk} 变化图

Fig. 1 \bar{T}_{sk} variation diagram of constant load exercise

注: 运动为自行车的恒定负荷运动, 负荷为 130 W, 时间为 30 min, 橙色点线为非运动区域 (前臂) \bar{T}_{sk} 随时间的变化, 紫色点线为运动区域 (腿部) \bar{T}_{sk} 随时间的变化。

Note: The exercise is a constant load exercise on a bicycle, with a load of 130W and a duration of 30 minutes. The orange dotted line represents the change in \bar{T}_{sk} over time in the non-exercise area (forearm), while the purple dotted line represents the change in \bar{T}_{sk} over time in the exercise area (legs).

1.2 递增负荷运动

涉及递增负荷运动的 IRT 研究, T_{sk} 检测区域通常包括: 头部、脸部、胸部、背部、手臂、手掌、大腿、小腿后侧及全身侧面和全身正面等。递增负荷运动类型多为下肢肌群参与, 故运动区域为下肢。在递增负荷运动开始时, 运动区域的 T_{sk} 出现短暂上升,

随着运动强度增加,运动区域 T_{sk} 表现为持续下降,力竭时达至最低^[6,8]。关于运动区域的 T_{sk} 的变化,本实验得到了与前人相同的测试结果, T_{sk} 呈现强度递增性下降,这也提示 IRT 具有运动强度监控潜能,见图 2 所示。有研究发现,运动区域 T_{sk} 下降程度与运动水平有关, Kapoor 等人^[11]在自行车的 $VO_{2\max}$ 测试中,发现运动员小腿 T_{sk} 下降幅度较非运动员更大,且运动员 T_{sk} 与耗氧量存在显著负相关,而非运动员则无此现象。非运动区域 T_{sk} 的运动变化存在差异,Corral 等人^[12]在进行 step 式递增负荷的跑台运动测试中,将身体划为 6 个主要测温区域——头部正面、侧面以及上下肢的正面、背面,并且发现运动前后,运动区(下肢)的 T_{sk} 下降,非运动区域(上肢)的 T_{sk} 上升,非头部的 T_{sk} 不变。而 Hillen 等人^[7]发现,在 step 式递增负荷的自行车运动测试开始,非运动区(前臂) T_{sk} 下降;至运动中后期, T_{sk} 开始逐步上升。但在本研究的测试中,非运动区域的 T_{sk} 表现为随强度递增性下降(见图 2),与前人研究出现分歧。由于实验方案及研究对象差异,递增负荷运动期间非运动区 T_{sk} 变化需结合实际情况分析。另外, Tanda 等人^[8]在递增负荷跑步测试中,发现了 P-Psr, 并且其遍布全身,表明全身的运动激活。

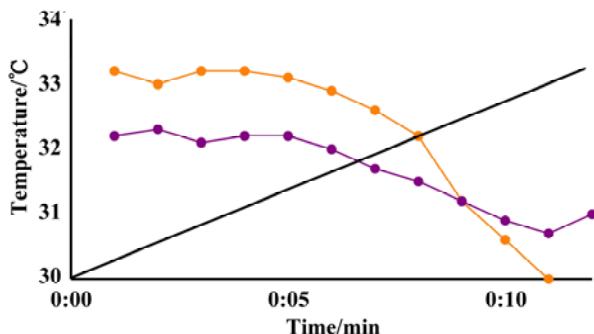


图 2 递增负荷运动的 \bar{T}_{sk} 变化图

Fig. 2 \bar{T}_{sk} variation diagram of incremental load exercise

注: 运动方式为自行车的斜坡式(ramp)递增运动,递增功率为 25 W/min, 橙色点线为非运动区域(前臂) \bar{T}_{sk} 随时间的变化, 紫色点线为运动区域(腿部) \bar{T}_{sk} 随时间的变化。

Note: the exercise mode is a ramp-type increase in power for cycling, with an incremental power of 25w/min. The orange dotted line represents the change in \bar{T}_{sk} over time in the non-exercise area (forearm), and the purple dotted line represents the change in \bar{T}_{sk} over time in the exercise area (leg).

1.3 抗阻运动

涉及抗阻运动的 IRT 研究, T_{sk} 检测区域均为对应的运动区域。多数研究显示,抗阻运动时运动区域 T_{sk} 升高^[13-18],且 T_{sk} 升高范围和升高速度与受试

者运动水平成正相关^[17]。部分研究发现,在进行 5 组 10 次的 5.9 kg 和 4.9 kg 的前平举测试中, 5.9 kg 强度使肱二头肌 T_{sk} 上升更明显^[15];但在前臂弯举及半蹲(10RM 70% 和 85%)两种运动强度下的抗阻训练中,肱二头肌及股四头肌的 T_{sk} 上升幅度均未发现显著差异^[19]。少量研究认为,抗阻运动期间运动区域 T_{sk} 下降。Formenti 等人^[20]通过对比两种不同速度(5 s 和 1 s 完成一次蹲或起)的无负重深蹲至力竭测试,发现与 5 s 深蹲相比, 1 s 的股四头肌 T_{sk} 下降更快。Ferreira 等人^[21]对比年轻人和老年人在进行 3 min, 20 次/min, 1 kg 负重的膝关节屈伸测试发现,年轻人运动区域 T_{sk} 上升,但老年人不变。此外, Hillen 等人^[12]在两名男性进行膝关节抗阻运动时,在股四头肌观察到 P-Psr、H-Psr 及 V-Psr 等特殊辐射图案。本实验在抗阻运动的实证研究中,也发现了 H-Psr 及 V-Psr,但未见 P-Psr, 见图 3 所示。抗阻运动后,运动区域 T_{sk} 变化存在延迟效应。有研究认为,抗阻运动对运动区域 T_{sk} 影响在 24 h 内可完全恢复^[22],但大部分研究认为 T_{sk} 影响可持续数天^[23-24],其恢复速率与运动方案、运动区域^[20]及训练水平^[25]等有关。Silva 等人^[18]发现运动数天后,运动区域 T_{sk} 变化与压力疼痛阈值存在关联,但与延迟性肌肉酸痛、轻度或中度肌肉损伤的间接标志物如肌酸激酶(CK)无关^[26]。张函楚等^[16]对专业与非专业健美运动员进行 50%、75% 及 100% 最大重复次数为 10 (10RM) 的抗阻训练,发现专业组的 CK 与运动区域 T_{sk} 变化有较高的一致性。可见, CK 与 T_{sk} 的相关性可能受运动水平影响。总之,虽然 T_{sk} 变化与肌肉损伤之间是否存在关联仍存争议,但抗阻运动数天后 T_{sk} 升高可能与身体的炎症反应有关^[27], T_{sk} 的降低可能表明肌肉组织处于恢复过程。



图 3 抗阻运动后的红外热成像图

Fig. 3 Infrared thermogram after resistance exercise tests

注: 运动方案为 5 组高容量俯卧撑,白色箭头为 V-Psr,白色椭圆形为 H-Psr

Note: the exercise program consists of 5 sets of high-capacity push-ups. The white arrow indicates V-Psr, and the white ellipse indicates H-Psr

1.4 应用现状

IRT 不仅可检测不同运动下的 T_{sk} ，也能进行生理参数的预估。梁智敏等人^[28]基于 IRT 获得脸部图像的灰度均值，并经小波去噪、带通滤波后进行小波包分解和重构，获得人体心率估计数据，其与心率实测值相关系数可达 0.873。Jensen 等人^[29]基于 IRT 计算肢体相对于躯干的移动距离以及躯干自身的垂直移动距离，可实现非接触式人体运动能量消耗估算。可见，IRT 凭借其非接触特点以及在可见光领域中受光照变化影响较小的特性，使其具有广泛的前景。



图 4 不同强度运动前后的红外热成像图

Fig. 4 Infrared thermal imaging before and after exercise of different intensities

注：所有的运动测试均为自行车，Pre：运动前，Post：运动后即刻，LICT：低强度运动（70 W, 50 min），MICT：中等强度运动（130 W, 30 min），HIIT：高强度间歇运动（290 W, 10 组，1 min 运动×1 min 间歇），SIT：冲刺间歇运动（峰值功率为 884 W, 4 组，30 s 运动×4 min 间歇）。

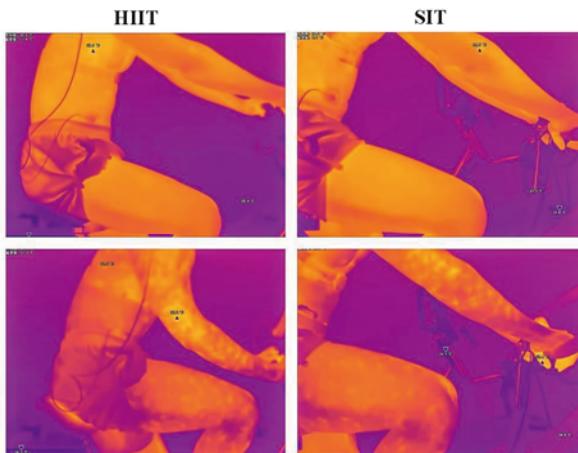
Note: all the exercise tests are bicycle, Pre: before tests, Post: immediately after tests, LICT: Low intensity exercise (70 W, 50 min), MICT: moderate intensity exercise (130 W, 30 min), HIIT: high intensity intermittent exercise (290 W, 10 groups, 1min exercise × 1min interval), SIT: Sprint intermittent exercise (peak power 884 W, 4 groups, 30 s exercise × 4 min interval).

2 基于 IRT 测得 T_{sk} 变化的运动生理学机制

2.1 恒定负荷耐力运动及递增负荷运动 T_{sk} 变化及 P-Psr 的生理机制

运动引起的 T_{sk} 变化已证实与皮肤汗液蒸发等热因素无关，而是通过延髓喙侧和视前区的交感神经活动，促使机体释放去甲肾上腺素和神经肽-Y，激活皮肤血管平滑肌 α -肾上腺素受体，导致皮肤小动脉血管收缩，血液重新分配，以满足大脑、心脏及运动肌在运动中的氧气需求^[4]。恒定负荷耐力运动与递增负荷运动的 T_{sk} 变化与交感神经有关，运动区域 T_{sk} 随强度增加而下降，反映交感神经去甲肾上腺素活动增强，引起皮下血管收缩^[30]。值得注意的是， T_{sk} 并非随强度的增加而无限制下降，而是随时间延长，下降幅度变缓。长时间运动将提高机体代谢率，打破机体 37°C 热稳态，使体温上升；若运动肌内部或深层组织

本研究团队基于 IRT 围绕不同运动类型及不同运动强度开展多项测试，都获得了高清且高精度的热成像图数据（图 1~图 4）。此外，研究基于 4 种不同强度的自行车恒定负荷运动测试（见图 4），进一步探讨了 IRT 的运动强度监控潜力。图中 4 种强度运动后大腿及手臂的 P-Psr 显示，在数量和上形态存在差异。主要表现为运动后的 P-Psr 以及强度二运动后的 P-Psr 显著于其他强度运动。基于不同强度下的 P-Psr 的差异特征，证实 IRT 具备运动强度监控的潜力。



温度超过特定水平，如核心温度上升 0.2°C~0.3°C， T_{sk} 将升至 38°C^[31]，此时胆碱能神经传递激活非肾上腺素能血管扩张系统，反射性引起神经源性血管舒张，导致皮下血管散热增强。而运动时出现的 P-Psr 反映了大量的血液传导至皮肤表面，增强血管对流散热；运动结束后，P-Psr 增加显示了运动后交感神经张力下降，使皮下小动脉舒张，血流灌注增加。

2.2 抗阻运动中 V-Psr、H-Psr 及 P-Psr 的生理机制

V-Psr 受肌肉质量及体脂率的影响，其形成基于以下 3 个因素：第一，随着机体代谢的升高，运动肌产热大幅增加；第二，血液从深静脉重新分配到浅静脉，运动肌的 T_{sk} 局部升高是由于浅静脉输送的血液对流散热；第三，运动肌静脉血液回流减少，增加了肌肉内部的温度，使热量优先从浅静脉通过皮肤进行辐射^[32]。H-Psr 的出现需要肌肉群具有高快缩肌纤维比例和能承受大负荷的能力；同时，运动肌静脉血液

回流减少,通过附近浅表血管进行散热,使热传导速度更快、温度辐射更均匀。P-Psr 的出现提示了抗阻运动期间的全身激活反应,它与 V-Psr 相反,不受限于运动区域,还可出现于非运动区域甚至遍布全身肢体。抗阻运动后出现的轻微 P-Psr^[33],反映了神经源性反射血管舒张的激活^[31],以及核心温度升高导致静脉血温度升高,促使非肾上腺素能血管扩张系统活动。此外,轻微的 P-Psr 还可能反映了肌肉在承受较大负荷的重复抗阻运动中肾上腺素和去甲肾上腺素的分泌增加。

3 构建运动中基于 IRT 检测 T_{sk} 的标准化流程

综合各研究和指南可知,在运动中基于 IRT 的人体 T_{sk} 测量标准化流程应避免测量误差和无关因素影响,进而增加实验检测结果的可重复性与可对比性。图 5 为本研究基于 IRT 构建的运动检测 T_{sk} 的标准化流程。

第一,标准设备。在进行人体运动的红外热成像研究时,选择合适的红外热像仪是测试前提。通常热像仪分为制冷型和非制冷型两种,制冷型相机体积较大、价格昂贵且拍摄角度受限,而非制冷型相机在价格和维护方面更为经济实惠,在运动中也更为常见。当前,市面上常见的人体运动检测热像仪有 FLIR-E60、FLIR-T335 及 FLIR-SC640 等。红外分辨率是仪器选择考虑的重要技术因素。基于 IRT 进行人类皮肤温度检测时,320×240 像素被认为是获得准确数据的最小分辨率参数^[34]。此外,仪器是否校准将影响数据精确度。在 T_{sk} 检测前需使用黑体对仪器进行校准,若 IRT 检测的温度与黑体的实际温度差值较大,可在数据分析中对差值进行补偿;但如果二者差异过大,则需将相机送至制造商进行重新调校。在仪器摆放方面,IRT 的镜头方位与测试距离会影响 T_{sk}

检测。镜头应垂直对准所检测区域,二者夹角不应大于 60°,并调节焦距进行对焦;而镜头与检测区域的距离应保持在 1~3 m 之间,如果是针对单个身体部位的检测,则距离应在 1~1.5 m 之间,若检测的是全身,则距离应为 3~4 m^[35]。最重要的是所有测试都应在相同的镜头方位与测试距离下进行。

第二,标准环境。环境是实验测试的载体,也是影响人体 T_{sk} 检测最重要的因素之一。室温过高或过低都将影响人体的体温调节,为保持人体的舒适感,室温通常保持在 18°C~25°C,且室温变化不应超过 1°C~2°C^[36]。室内湿度会影响机体运动表现和运动时汗液蒸发率,建议相对湿度控制于 40%~70%^[37]。测试空间大小会通过影响空气中的 CO₂ 浓度,从而引起室温变化,一般而言,以 12 m² 的室内空间最合适,最小应不小于 6~9 m²。此外,可在拍摄区域周围放置抗反射的材料,以避免其他无关红外辐射源干扰。

第三,标准个体化因素控制。受试者的年龄、性别、运动水平、损伤与否及个体生活作息均会影响 T_{sk} 数据变化。在年龄方面,随年龄增长,机体代谢率降低,血管功能和散热能力均下降,故老年人 T_{sk} 基础值较低, T_{sk} 反应速度较慢;性别方面,与男性相比,女性出汗率低、体脂率高、散热性差,导致全身大部分区域的 T_{sk} 均较低^[38],且受月经周期影响,使得黄体期的 T_{sk} 高于卵泡期;运动水平高的人通常有更高的血流量和更低的身体脂肪,更好的散热能力, T_{sk} 变化更快,幅度更大;在损伤和药物治疗人群中,若机体存在炎症,则 T_{sk} 较高,若组织灌注不良或变性等情况下,则 T_{sk} 较低,且止痛药、消炎药及调节血管活性等药物对 T_{sk} 也存在干扰^[34];此外,个体生活作息差异会使 T_{sk} 检测结果呈现高变异性,限制了受试者之间数据的比较。因此,可基于研究目的筛选受试

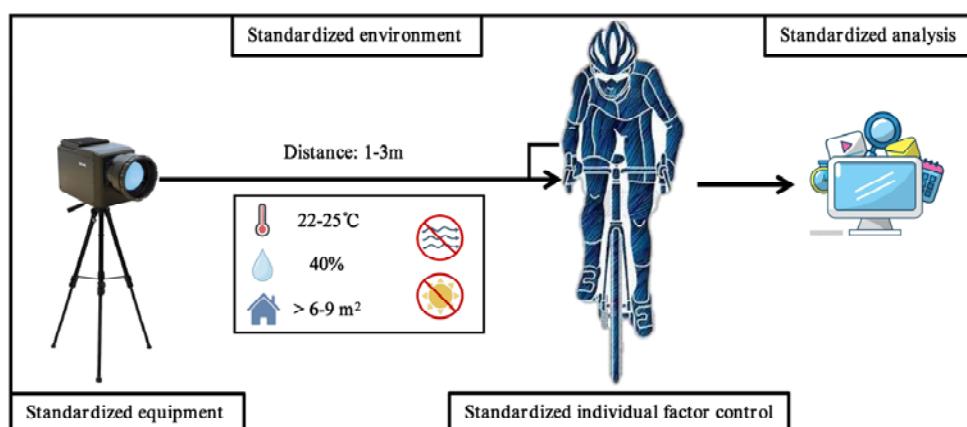


图 5 在运动中基于 IRT 检测 T_{sk} 的标准化流程
Fig. 5 Standardized process for IRT-based detection of T_{sk} in sport

者群体,同时受试者需要遵守测温协议,以此最大程度减少 T_{sk} 检测的干扰因素。如受试者在测温前 12 h 应避免吸烟,测量前 4 h 禁止进食,并清理过于旺盛的毛发,在测试当日需避免体育锻炼、日光浴、长时间紫外线暴露以及化妆品使用。此外,昼夜节律将影响人体核心温度、皮肤血流量及 T_{sk} ,故 T_{sk} 的检测应在一天的同一时间点进行^[39]。受试者来到测量环境时,需适应环境温度,通常需要 10~20 min,若来自极端环境适应时间需延长。在适应期,受试者需补充足够的水分,避开所有可能影响 T_{sk} 的动作和接触,并在测试时尽量保持统一着装和身体姿势。运动中皮肤产生的汗液,可能会影响检测精度,但也有研究认为,运动过程中产生的汗液不足以形成水膜,不影响数据的测量^[40]。

第四,标准化分析。热成像数据分析需使用热像仪所配备的标准软件,如 FLIR 相机的 ThermaCam Researcher Pro 软件、Fluke 相机的 Smartview 软件等。在软件中根据人体解剖形态描绘人工几何形状^[38],以此确定测温区域范围大小,并选择适用指标进行数据分析。

4 总结与展望

基于 IRT 检测运动 T_{sk} 变化有望成为运动生理监控的新手段。恒定负荷耐力运动期间,运动区域 T_{sk} 常呈现轻微上升后,下降至某温度区间后保持稳定的趋势,而递增负荷运动期间,运动区域 T_{sk} 常呈现先轻微上升后随负荷递增持续下降直至运动结束的趋势,这可能与交感神经去甲肾上腺素能神经活动引起的皮肤血管收缩有关;抗阻运动期运动区域 T_{sk} 常上升,运动后 T_{sk} 的延迟变化与肌肉炎症恢复相关。不同运动类型 T_{sk} 、P-Psr、H-Psr 及 V-Psr 变化,对探究机体运动生理机制、强度监控、推测核心温度及热量消耗等均具有重要意义。基于 IRT 的标准化运动 T_{sk} 检测,需考量设备、环境、个体因素及分析方法等要素。当前,运动期间非运动区域 T_{sk} 变化仍存争议,长期运动适应下 P-Psr、H-Psr 和 V-Psr 的变化尚未深入研究。此外,急需开发一款针对 IRT 运动测试的分析软件,以用于动态识别检测区域并统计分析 P-Psr、H-Psr 和 V-Psr 的数量和形态,以促进 IRT 在运动科学中的推广应用。

参考文献:

- [1] TAVARES I M, VARDASCA R, CERA N, et al. A review of infrared thermography as applied to human sexual psychophysiology[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2018, **133**: 28-40.
 - [2] SZURKO A, KASPRZYK-KUCEWICZ T, CHOLEWKA A, et al. Thermovision as a tool for athletes to verify the symmetry of work of individual muscle segments [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(14): 8490.
 - [3] GOMEZ-CARMONA P, FERNANDEZ-CUEVAS I, SILLERO-QUINTANA M, et al. Infrared thermography protocol on reducing the incidence of soccer injuries [J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2020, **29**(8): 1222-1227.
 - [4] TORII M, YAMASAKI M, SASAKI T, et al. Fall in skin temperature of exercising man [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 1992, **26**(1): 29-32.
 - [5] ZONTAK A, SIDEMAN S, VERBITSKY O, et al. Dynamic thermography: analysis of hand temperature during exercise [J]. *Ann Biomed Eng*, 1998, **26**(6): 988-993.
 - [6] IGARASHI T L, FERNANDES T L, HERNANDEZ A J, et al. Behavior of skin temperature during incremental cycling and running indoor exercises [J]. *Helijon*, 2022, **8**(10): e10889.
 - [7] HILLEN B, PFIRRMANN D, NAEGELE M, et al. Infrared thermography in exercise physiology: the dawning of exercise radiomics [J]. *Sports Medicine*, 2020, **50**(2): 263-282.
 - [8] TANDA G. Skin temperature measurements by infrared thermography during running exercise [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, **71**: 103-113.
 - [9] FERNANDES A A, MOREIRA D G, BRITO C J, et al. Validity of inner canthus temperature recorded by infrared thermography as a non-invasive surrogate measure for core temperature at rest, during exercise and recovery [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2016, **62**(Pt A): 50-55.
 - [10] BOURLAI T, PRYOR R R, SUYAMA J, et al. Use of thermal imagery for estimation of core body temperature during precooling, exertion, and recovery in wildland firefighter protective clothing [J]. *Prehosp Emerg Care*, 2012, **16**(3): 390-399.
 - [11] KAPOOR M, VASDEV V, SINGH R K, et al. Relationship between aerobic fitness and lower limb skin temperature during cycling exercise testing among well-trained athletes and nonathletes: a cross-sectional study [J]. *Medical Journal Armed Forces India*, 2022, **79**(Suppl): S165-S174.
 - [12] CORRAL-PÉREZ J, MARTINEZ-TELLEZ B, VELÁZQUEZ-DÍAZ D, et al. Thermal resting pattern and acute skin temperature response to exercise in older adults: role of cardiorespiratory fitness [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2023, **117**: 103678.
 - [13] SHAKHIH M F M, RIDZUAN N, WAHAB A A, et al. Non-obstructive monitoring of muscle fatigue for low intensity dynamic exercise with infrared thermography technique [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2021, **59**(7-8): 1447-1459.
 - [14] PERPETUINI D, FORMENTI D, IODICE P, et al. Central and peripheral thermal signatures of brain-derived fatigue during unilateral resistance exercise: a preliminary Study [J]. *Biology (Basel)*, 2022, **11**(2): 322.
 - [15] 金超, 饶伟, 刘静. 采用远红外热成像技术评估运动效果初步实验研究[J]. 中国运动医学杂志, 2011, **30**(3): 230-235.
- JIN Chao, RAO Wei, LIU Jing. Evaluation of exercise effects using

- infrared thermography[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2011, **30**(3): 230-235.
- [16] 张函楚, 周政. 抗阻训练后健美运动员体表温度及肌酸激酶的特征研究[J]. *当代体育科技*, 2023, **13**(5): 23-26.
- ZHANG Hanchu, ZHOU Mei. Study on body surface temperature and characteristics of *Creatine kinase* of bodybuilders after resistance training [J]//*Contemporary Sports Technology*. 2023, **13**(5): 23-26.
- [17] FORMENTI D, LUDWIG N FAU - GARGANO M, GARGANO M FAU - GONDOLA M, et al. Thermal imaging of exercise-associated skin temperature changes in trained and untrained female subjects [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2013, **41**(4): 863-871.
- [18] DA SILVA W, MACHADO Á S, LEMOS A L, et al. Relationship between exercise-induced muscle soreness, pain thresholds, and skin temperature in men and women [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, **100**: 103051.
- [19] NEVES E B, CUNHA R M, ROSA C, et al. Correlation between skin temperature and heart rate during exercise and recovery, and the influence of body position in these variables in untrained women[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **75**: 70-76.
- [20] FORMENTI D, LUDWIG N, TRECROCI A, et al. Dynamics of thermographic skin temperature response during squat exercise at two different speeds[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2016, **59**: 58-63.
- [21] FERREIRA J J, MENDONÇA L C, NUNES L A, et al. Exercise-associated thermographic changes in young and elderly subjects[J]. *Ann Biomed Eng.*, 2008, **36**(8): 1420-1427.
- [22] DINDORF C, BARTAGUIZ E, JANOWICZ E, et al. Effects of unilateral muscle fatigue on thermographic skin surface temperature of back and abdominal muscles-A pilot study [J]. *Sports (Basel)*, 2022, **10**(3): 41.
- [23] MACHADO Á S, DA SILVA W, PRIEGO-QUESADA J I, et al. Can infrared thermography serve as an alternative to assess cumulative fatigue in women? [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2023, **115**: 103612.
- [24] BARBOZA J A M, FERREIRA J J A, CERQUEIRA M S, et al. Can skin temperature be altered after different magnitudes of eccentric exercise-induced muscle damage? [J]. *Res Q Exerc Sport*, 2022, **93**(4): 702-709.
- [25] KASPRZYK-KUCEWICZ T, SZURKO A, STANEK A, et al. Usefulness in developing an optimal training program and distinguishing between performance levels of the athlete's body by using of thermal imaging [J]. *Int J. Environ Res Public Health*, 2020, **17**(16): 5698.
- [26] DA SILVA W, MACHADO Á S, SOUZA M A, et al. Can exercise-induced muscle damage be related to changes in skin temperature? [J]. *Physiol Meas.*, 2018, **39**(10): 104007.
- [27] STEWART I B, MOGHADAM P, BORG D N, et al. Thermal infrared imaging can differentiate skin temperature changes associated with intense single leg exercise, but not with delayed onset of muscle soreness [J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2020, **19**(3): 469-477.
- [28] 梁智敏, 陈骐, 肖书明, 等. 利用热成像技术对心率进行无接触检测的研究[J]. *中国体育科技*, 2018, **54**(1): 136-145.
- LING Zhimin, CHEN Qi, XIAO Shuming, et al. Research on non-contact heart rate detection using thermal imaging[J]. *China Sport Science and Technology*, 2018, **54**(1): 136-145.
- [29] JENSEN M M, POULSEN M K, ALLDIECK T, et al. Estimation of energy expenditure during treadmill exercise via thermal imaging[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2016, **48**(12): 2571-2579.
- [30] OOTSUKA Y, TANAKA M. Control of cutaneous blood flow by central nervous system [J]. *Temperature (Austin, Tex)*, 2015, **2**(3): 392-405.
- [31] KELLOGG D L JR, JOHNSON J M, KOSIBA W A. Control of internal temperature threshold for active cutaneous vasodilation by dynamic exercise [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1991, **71**(6): 2476-2482.
- [32] GONZÁLEZ-ALONSO J. Human thermoregulation and the cardiovascular system [J]. *Experimental Physiology*, 2012, **97**(3): 340-346.
- [33] HILLEN B, PFIRRMANN D, NÄGELE M, et al. Infrared thermography in exercise physiology: the dawning of exercise radiomics [J]. *Sports Medicine (Auckland, NZ)*, 2020, **50**(2): 263-282.
- [34] FERNÁNDEZ-CUEVAS I, BOUZAS MARINS J C, ARNÁIZ LASTRAS J, et al. Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: a review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **71**: 28-55.
- [35] Priego-Quesada J I. *Application of Infrared Thermography in Sports Science*[M]. Netherlands: Springer International Publishing, 2017.
- [36] 欧聪颖, 刘何清, 张强. 室内静坐状态下影响皮肤温度的环境因素[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2021, **36**(3): 22-27.
- OU Congying, LIU Heqing, ZHANG Qiang. Environmental factors of affecting human skin temperature when sitting indoors[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, **36**(3): 22-27.
- [37] PRIEGO QUESADA J I, CARPES F P, SALVADOR PALMER R, et al. Effect of saddle height on skin temperature measured in different days of cycling [J]. *Springerplus*, 2016, **27**(5): 205.
- [38] CHUDECKA M, LUBKOWSKA A. Thermal maps of young women and men [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **69**: 81-87.
- [39] COSTA C M, SILLERO-QUINTANA M, PINONOSA CANO S, et al. Daily oscillations of skin temperature in military personnel using thermography[J]. *Journal of The Royal Army Medical Corps*, 2016, **162**(5): 335-342.
- [40] PRIEGO QUESADA J I, MARTÍNEZ GUILLAMÓN N, CIBRIÁN ORTIZ DE ANDA R M, et al. Effect of perspiration on skin temperature measurements by infrared thermography and contact thermometry during aerobic cycling[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **72**: 68-76.