

· 综述与专论 ·

红外热成像在肺部疾病应用的新进展

杨佳诺¹, 王冠理¹, 杨佳夫², 何嘉豪¹, 陈舒敏¹, 沈毅¹,
李娟¹, 任妮¹, 刘春丽^{1*}, 邓方阁^{1*}

1.510000 广东省广州市, 广州医科大学附属第一医院 广州呼吸健康研究院呼吸内科

2.515000 广东省汕头市, 汕头大学医学院附属肿瘤医院放射科

* 通信作者: 刘春丽, 主任医师/教授/博士生导师; E-mail: chunli@gird.cn

邓方阁, 研究员/教授; E-mail: parisdeng256@163.com

【摘要】 红外热成像作为一种具备无创性、无辐射性的非接触式临床检测技术, 通过检测人体表面温度并重建温度分布图像, 可以早期识别多种疾病, 并实现早期诊断及干预。本文着重回顾了红外热成像在急性呼吸道传染性疾病、睡眠呼吸暂停综合征、中医肺疾病研究、新生儿重症监护以及肺栓塞早期筛查等肺部疾病领域中的应用及取得的相关研究进展, 具有重要的临床指导意义。红外热成像技术作为一种功能性成像, 核心优势在于“早”, 不同于疾病过程结构性的改变, 疾病早期常出现血流动力学紊乱、局部炎症等所致局部异常温度分布的功能性改变, 借助基于热敏感性的红外热成像技术可以实现疾病的早期诊断、早期干预以及动态监测等。

【关键词】 肺疾病; 红外热成像; 睡眠呼吸暂停综合征; 肺栓塞; 检测技术

【中图分类号】 R 563 **【文献标识码】** A DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0114

New Progress in the Application of Infrared Thermal Imaging in Pulmonary Diseases

YANG Jianuo¹, WANG Guanli¹, YANG Jiafu², HE Jiahao¹, CHEN Shumin¹, SHEN Yi¹, LI Juan¹, REN Ni¹, LIU Chunli^{1*},
DENG Fangge^{1*}

1.Department of Respiratory Medicine, The first affiliated hospital of guangzhou medical university/ Guangzhou institute of respiratory health, Guangzhou 510000, China

2.Department of Radiology, Cancer Hospital of Shantou University Medical College, Shantou 515000, China

Corresponding author: LIU Chunli, Chief physician/Professor/Doctoral supervisor; E-mail: chunli@gird.cn

DENG Fangge, Research fellow/Professor; E-mail: parisdeng256@163.com

【Abstract】 As a non-invasive and non-radiative non-contact clinical detection technology, infrared thermography can identify various diseases early by detecting the body surface temperature and reconstructing the temperature distribution image, and achieve early diagnosis and intervention. This article focuses on reviewing the application and related research progress of infrared thermography in the fields of acute respiratory infectious diseases, sleep apnea syndrome, traditional Chinese medicine lung disease research, neonatal intensive care, and early screening of pulmonary embolism, which has important clinical guidance significance. As a Functional imaging technology, the core advantage of infrared imaging is “Early”. Unlike structural changes in the course of a disease, the early stages of a disease are often Hemodynamics, the functional changes of local abnormal temperature distribution caused by local inflammation and so on can be early diagnosed, early intervention and dynamic monitoring by means of infrared thermography technology based on thermal sensitivity.

【Key words】 Lung diseases; Infrared thermal imaging; Sleep apnea syndromes; Pulmonary embolism; Detection technology

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2301103); 广东省自然科学基金面上项目 (2020A1515011370, 2023A1515010443); 呼吸疾病国家重点实验室自主课题项目 (SKLRD-Z-202313); 广州市科学技术局-重点研发计划 (2023B03J1387); 广州开发区创新领军人才项目 II 期 (2022-L002)

引用本文: 杨佳诺, 王冠理, 杨佳夫, 等. 红外热成像在肺部疾病应用的新进展 [J]. 中国全科医学, 2024. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0114. [Epub ahead of print] [www.chinagp.net]

YANG J N, WANG G L, YANG J F, et al. New progress in the application of infrared thermal imaging in pulmonary diseases [J]. Chinese General Practice, 2024. [Epub ahead of print].

© Editorial Office of Chinese General Practice. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

红外热成像 (infrared thermal imaging) 通过测量人体皮肤表面温度, 并经过特定算法重建出观测部位的温度数值以及温度分布图像^[1]。医学红外热成像技术诞生于 1957 年, 外科医生罗森博士首次应用红外热像仪发现乳腺癌患者在癌症区域出现更高的皮肤温度^[2]。自 20 世纪 70 年代以来, 红外热成像技术已经广泛应用于医学的许多领域, 特别是在检测和评估皮肤肿瘤^[3]、乳腺肿瘤^[4]、糖尿病足部并发症^[5]、风湿性疾病^[6]、急性毒性动物咬伤^[7]等领域。近年来, 随着红外成像技术的普遍推广, 其在医学领域中的应用已经涵盖了多个方面, 尤其在肺部疾病的检测和评估方面具有广泛应用。

红外热成像通过对人体表面温度的测定, 由此计算测量区域的温度绝对值、温度分布等, 并由此生成红外热像图^[8]。人体的核心温度范围为 36.5~37.5℃, 而表面温度则约为 33℃, 在生理以及病理状态下可产生一定范围的波动^[9]。体温作为人体基础生命体征, 是许多疾病的先兆改变, 同时也是呼吸系统疾病的重要监测指标^[10]。红外热成像基于热敏性, 通过记录目标区域体表温度绝对数值、局部温度异常表达区以及温度变化趋势曲线等, 重建温度分布图, 协助临床医生诊断及评估疾病。近年来红外成像温度记录法在传统体表温度检测基础上多元化发展, 基于热敏性, 通过构建一定算法以及联合摄像机长时间监测等方式, 在评估呼吸频率、心率以及呼吸模式等方面有较大进展, 其原理主要为:

(1) 基于呼吸过程中热量的散失所致局部区域的温度变化, 通过定位抓取特定面部区域, 标记为兴趣区 (region of interest), 如记录鼻周、口周等区域温度随呼吸过程的波动, 计算呼吸频率以及评估鼻呼吸、口呼吸等呼吸模式。(2) 基于心脏搏动引起的面部局部微循环的改变, 通过记录面部标记区域的温度改变计算心率。目前已有许多临床研究验证其检验效能, 结果普遍与手动测量、仪器测量等金标准呈良好的一致性。通过分析面部特定区域的温度波动, 可以实时监测患者的呼吸频率和心率, 为医生提供重要的生理信息。

1 急性呼吸道传染性疾病

红外热成像技术被广泛用于大规模的急性呼吸道传染性疾病的筛查, 如流感和新型冠状病毒等^[11]。发热是急性呼吸道传染性疾病的常见症状之一^[12], 另外也有研究指出, 呼吸频率升高对于急性呼吸道传染性疾病的诊断也有重要意义^[13]。早期的筛查和诊断可以预防或减少急性呼吸道疾病的传播, 提高治疗方案的有效性, 并减少健康管理成本^[14]。目前红外温度检测装置已广泛应用于急性呼吸道传染性疾病的筛查, 在边境、机场、商场以及医院等均有安置红外体温检测筛查装

置^[15]。然而, 使用红外体温检测系统的发热筛查程序存在灵敏度低的问题, 因为仅监测体温不足以发现受感染但未发热或是正处于疾病潜伏期的患者以及区分其他原因所致发热的患者等。近年来红外热成像技术在评估呼吸频率、心率方面的作用相对较新, 许多研究检验了其效能, 其与机器、手动测量的结果呈现良好的相关性, 其原理通常是基于伴随呼吸过程中热量的改变, 即鼻周、口周等区域温度的波动计算呼吸频率, 根据面部局部区域微循环温度改变估计心率^[16]。作为人类历史上面临的重大急性呼吸道传染性疾病的新型冠状病毒肺炎, 其在全球范围内的爆发对全球健康构成重大威胁。ALDRED 等^[17]在巴西新冠病毒流行期间收集 136 例急诊门诊患者, 同时予红外热像仪以及直接测量 (医护人员根据 30 s 内患者胸廓起伏次数) 评估患者呼吸频率, 发现二者测量数据具有良好的一致性, 同时发现新冠组具有更高的呼吸频率, 提示红外热成像技术对于指导急诊以及急性呼吸道传染病的预诊及分诊具备巨大潜力。基于新冠病毒可引起肺损伤, 有研究通过手持式热像仪对比新冠患者以及健康人背部热像图, 通过设定的图像处理方法抓取背部图像图层, 构建了一个具备高诊断效能以及高灵敏度的新冠病毒诊断的红外热成像评分系统^[18]。同样定位于背部兴趣区, BRZEZINSKI^[19]等研究表明红外成像对于诊断新型冠状病毒肺炎具备一定临床价值。季节性流感同样是常见的急性呼吸道感染性疾病^[20], 有研究指出, 通过构建红外热像图信号处理方法, 对季节性流感患者以及健康人进行体温、呼吸频率、心率以及面部温度检测, 并同时在医护人员参与下直接测量 (体温计, 呼吸带, 心电图), 观察发现二者测量结果呈现高度一致性, 且检测结果可显著区分季节性流感患者以及健康人组, 即流感患者具有更高的面部平均温度、更快的呼吸频率以及心率^[21]。MATSUI 等^[22]利用红外热像图在 16 名季节性流感患者以及 22 名健康人中也同样发现季节性流感患者具有更高的面部平均温度以及更高的心率。对于具有传染性的呼吸系统疾病, 应用红外成像检测方式, 实现非接触性、简便性、高效性检测受试者体温、呼吸频率、心率以及面部温度等, 可以迅速筛查伴有急性呼吸道感染症状的患者, 有助于早期发现可能的感染者, 提高筛查效率, 同时进一步保护医护人员。

2 睡眠呼吸暂停综合征

阻塞性睡眠呼吸暂停综合征 (obstructive sleep apnea syndrome, OSAS) 是由于各种原因所致上气道反复阻塞, 进而导致呼吸暂停, 睡眠中断以及间歇缺氧等症状的疾病^[23]。多导睡眠监测 (Polysomnography, PSG) 是成年人 OSAS 诊断的金标准^[24], 然而, PSG 需要在患者

身体上连接多个电极来分析评估睡眠情况,并且是在一个不熟悉的环境中(通常在医院的睡眠室)进行的,因此患者常有不适感或伴有睡眠质量较差,因此得出的数据有时候存在偏差,有时甚至需要多次重复检查。目前已有多项研究关于开发新的非接触式、便携式的睡眠监测设备,具备上述优点的红外热成像技术已有多项研究证明其效能。呼吸频率及心率是睡眠过程重要的监测指标,同时也是OSA的重要监测数据。基于伴随呼吸过程中鼻周、口周部位温度的变化以及面部微循环伴随的温度改变,HU等^[25]应用红外成像联合摄像机长时间监测并定位鼻周、口周、面部等兴趣区,构建算法计算睡眠过程呼吸频率以及心率,并发现与心电图、呼吸带等测量结果高度匹配。MURTHY等^[26]通过纳入13名OSA患者与14名健康人进行红外热像睡眠监测,通过分析比较红外相关睡眠参数与鼻腔压力测定以及热变电阻器所测得的呼吸频率及呼吸波形数据,发现二者在检测呼吸暂停以及低通气具有很好的一致性。呼吸模式是无创计算呼吸频率的重要参数,ELSON等^[27]应用红外成像将兴趣区定位于口腔温度的变化,并区分鼻呼吸(口腔温度相对恒定)以及口呼吸(口腔温度差绝对值增加)两种呼吸模式,这对于红外成像自动抓取面部兴趣区估计呼吸频率有重要意义。需要指出的是,红外热成像除了检测睡眠过程中呼吸频率、心率以及呼吸暂停指数等数据,还具有其本身热敏性的重要特征。身体体温调节与睡眠状态的变化有关,特别对于伴有阻塞性通气功能障碍的患者,由于其本身存在的慢性上呼吸道炎症,可观察到颈前区、下颌部等气道走行区域伴有温度异常改变或是分布异常^[28]。在动物试验中也有研究指出,红外热像图分析比较短头型犬与正常犬腹侧、面部以及背侧温度,发现静息下短头型犬背侧具有更高的温度,另外联合6分钟步行试验发现运动后短头型犬背侧以及面部(尤其是口部)具有更高的平均温度以及峰值温度,具有明显差异性,从而进一步阐明短头阻塞性气道综合征(BOAS)的病理生理现象^[29]。睡眠呼吸暂停综合征是常见的呼吸疾病,近年来其发病率有上升趋势,同时由于目前检测方式的局限易造成部分患者的漏诊以及随访困难,基于红外成像的无创性、非接触式等优点有望最大程度减少睡眠监测过程中的不适性以及增加患者依从性,对于OSA的筛查、诊断以及随访等具有重要意义。

3 中医肺疾病领域研究

红外成像技术作为一种非接触式的温度测量工具,同时具备可视化、无创性、高灵敏度等优势,在中医理论验证及经络、腧穴研究领域中得到广泛应用^[30]。中医对于呼吸系统疾病有独特的理论体系,脏腑相合理论

认为,肺与肠相表里,即两者存在特异性的联系,在生理或病理状态下,两者可互相联系^[31]。马师雷^[32]应用红外热像仪在106名健康受试者中观察到肺部疾病患者(支气管哮喘以及慢性支气管炎)可引起大肠以及小肠体表投射点温度特异性升高,其中肺病寒、热证型对红外热值有显著影响作用,同时肠道疾病患者(溃疡性结肠炎以及慢性便秘)也可观察到肺脏体表投射区温度的升高。肺部相关经络穴位中肺俞穴、肺经等是慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、支气管哮喘、肺结核等肺部疾病的常见体表投射点。基于红外温度记录法评估COPD患者与健康人相关经络差异性,LI等^[33]发现二者心肺经络的温度差异性。同时也有研究指出,COPD患者中肺经体表投射点、走行区域特征等均较心经表现出更显著的变化^[34]。研究通过红外成像观察对比哮喘患者以及正常人肺及大肠中间结构的穴位体表温度差异,进一步验证了哮喘患者中间结构的病理反应区以及肺与肠相表里理论^[35]。陈日新等^[36]通过纳入49例慢性持续期支气管哮喘患者,对比研究了灸感法以及红外热像图对肺俞穴热敏态的检测效能,发现红外热成像具有更高的灵敏度以及更明显的温度差。过敏性鼻炎同属高反应性疾病,有研究基于腧穴诊察法以及红外成像法对73例过敏性鼻炎患者研究分析,提示过敏性鼻炎患者较健康人组部分相关经穴存在异常温度改变,提示存在病理征^[37]。朱景智等^[38]运用红外热成像技术评价无痛蜂疗法治疗肺脾气虚型过敏性鼻炎的临床疗效,可观察到治疗前后相关穴位温度具有明显差异性,提示红外成像技术对于评估临床疗效具备可观前景。祖国医学作为中华民族的文化瑰宝,其对于肺部相关疾病的诊治具有卓越的贡献,其中“肺与肠相表里”与腧穴等相关理论以及针灸等治疗方式是其重要组成部分,基于红外成像技术的热敏性以及可视化的优势,不仅实现对传统经脉、腧穴等理论的客观验证,也验证了中医理论中肺与肠的相表里关系,观察不同呼吸道疾病肺经区域的温度变化,为中医肺疾病的研究提供客观数据支持。

4 新生儿重症监护

红外热成像技术在新生儿监护中可以实现对生命体征的非接触性监测^[39]。早产儿通常在出生后立即进入新生儿监护病房,呼吸暂停/骤停是早产儿常见和严重的急性并发症^[40]。作为标准监测程序,临床上一般通过在新生儿身体连接传感器和电极进行生命体征监测,但相较于成年人,新生儿的皮肤更敏感以及更易损伤,在分离黏附电极时,有可能损伤新生儿皮肤或引起皮肤脱落,或是长时间与皮肤相连的电极片,可能引起新生儿皮肤过敏,由此导致皮肤损伤及皮肤感染等严重

后果^[41]。而具备无创性、非接触式等优点的红外热成像技术,已有文献报道其在新生儿监护的应用价值。ABBAS等^[42]首次在新生儿监护病房应用红外热成像监测7名新生儿的呼吸频率,并获得了较好的相关性。VILLARROEL等^[43]应用红外热像仪收集了30名早产儿呼吸频率、心率以及体温共90个生命特征数据,并与心电监护仪结果具良好一致性。考虑到不同婴儿体位的影响,有研究选择使用多个摄像头增加视野覆盖范围,进而实现婴儿呼吸运动和血流全面的可视化监测^[44]。由于新生儿生理基础的特殊性,红外热成像技术应用于早产儿等新生儿的监护,可以通过无创、非接触式监测体温、呼吸频率等参数,通过减少外界刺激尚未发育完善的皮肤,早期发现呼吸暂停等急性并发症,在新生儿监护室乃至普通儿科病房都具有较高的应用价值。

5 肺栓塞的早期筛查

静脉血栓栓塞症包括肺栓塞和深静脉血栓形成,肺动脉栓塞是指各种栓子进入肺动脉及其分支,阻断组织血液供应所引起的病理和临床状态,最常见的是血栓栓塞,据文献报道,其中约90%的血栓来源于下肢深静脉血栓^[45]。皮肤表面温度与肢体血流有密切关系^[46],由于深静脉血栓形成所致局部循环障碍,可导致局部血液瘀滞区域表面皮肤温度升高^[47]。有研究指出,应用红外热成像评估下肢静脉血栓,观察到血栓组患者患侧肢体较健康人组具有更高的表面温度,且与自身对侧无血栓肢体的温度差也较健康人组更高,在与下肢静脉彩超以及造影显像结果比较,同时具备较高的诊断效能^[48-49]。红外热成像技术可以检测肢体表面的温度差异,有助于发现下肢深静脉血栓形成,进一步实现动态评估下肢血流状态,住院患者血栓风险评估等。这一技术的推广可应用于肺栓塞的早期筛查,通过检测患者肢体的表面温度是否出现不对称分布,同时利用红外热成像可视化的优势,早期观察下肢是否出现局部异常温度表达区域,推论是否出现血栓前状态的病理改变,为深静脉血栓形成早期诊断、筛查提供支持,对患者的治疗和管理同样具有潜在的临床益处。

6 总结与展望

红外热成像技术作为一种功能性成像,核心优势在于“早”。在机体病理状态下,往往功能性的改变先于结构性的改变,同时,早期局部炎症因子的趋化、代谢产物堆积、血流动力学的改变常引起局部温度的改变,亦或是温度分布的异常。局部温度的改变以及分布可以为临床医生提供额外的人体生理信息,以实现疾病的早期筛查、早期监测等。凭借无创性、无辐射性、非接触式、可视化以及快速便捷等优点,红外热成像技术在肺

部疾病的应用具有潜在的临床益处,有助于早期筛查和动态监测疾病状态。然而,更深入的研究以及诊断流程标准化仍然需要进一步完善,以确保该技术的准确性和可靠性。

作者贡献:杨佳诺提出研究思路,撰写论文;王冠理、杨佳夫、何嘉豪、陈舒敏、沈毅、李娟、任妮负责查阅文献;刘春丽、邓方阁负责论文修订、文章的质量控制及审校、对文章整体负责,监督管理。

本文无利益冲突。

参考文献

- [1] LI F, WANG M, WANG T, et al. Smartphone-based infrared thermography to assess progress in thoracic surgical incision healing: a preliminary study [J]. *Int Wound J*, 2023, 20 (6): 2000-2009. DOI: 10.1111/iwj.14063.
- [2] FAUST O, RAJENDRA ACHARYA U, NG E Y K, et al. Application of infrared thermography in computer aided diagnosis [J]. *Infrared Phys Technol*, 2014, 66: 160-175. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.06.001.
- [3] MAGALHAES C, VARDASCA R, REBELO M, et al. Distinguishing melanocytic nevi from melanomas using static and dynamic infrared thermal imaging [J]. *J Eur Acad Dermatol Venereol*, 2019, 33 (9): 1700-1705. DOI: 10.1111/jdv.15611.
- [4] WANG X F, CHOU K Y, ZHANG G C, et al. Breast cancer pre-clinical screening using infrared thermography and artificial intelligence: a prospective, multicentre, diagnostic accuracy cohort study [J]. *Int J Surg*, 2023, 109 (10): 3021-3031. DOI: 10.1097/JS9.0000000000000594.
- [5] KHOSA I, RAZA A, ANJUM M, et al. Automatic diabetic foot ulcer recognition using multi-level thermographic image data [J]. *Diagnostics*, 2023, 13 (16): 2637. DOI: 10.3390/diagnostics13162637.
- [6] GATT A, MERCIECA C, BORG A, et al. A comparison of thermographic characteristics of the hands and wrists of rheumatoid arthritis patients and healthy controls [J]. *Sci Rep*, 2019, 9 (1): 17204. DOI: 10.1038/s41598-019-53598-0.
- [7] SABITHA P, BAMBIGATTI C, DEEPANJALI S, et al. Point-of-care infrared thermal imaging for differentiating venomous snakebites from non-venomous and dry bites [J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2021, 15 (2): e0008580. DOI: 10.1371/journal.pntd.0008580.
- [8] MUÑOZ-ALCÁMI M, PRIEGO-QUESADA J I, GIMENO RAGA M, et al. Effect of fatigue strength exercise on anterior thigh skin temperature rewarming after cold stress test [J]. *J Therm Biol*, 2021, 101: 103098. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103098.
- [9] HILLEN B, PFIRRMANN D, NÄGELE M, et al. Infrared thermography in exercise physiology: the dawning of exercise radiomics [J]. *Sports Med*, 2020, 50 (2): 263-282. DOI: 10.1007/s40279-019-01210-w.
- [10] RZEPKA A, MANIA A. The clinical picture of influenza against other respiratory tract infections in a general practitioner practice [J]. *Przegl Epidemiol*, 2021, 75 (2): 159-174.

- DOI: 10.32394/pe.75.15.
- [11] LECHIE J R, CHIESA-ESTOMBA C M, PLACE S, et al. Clinical and epidemiological characteristics of 1420 European patients with mild-to-moderate coronavirus disease 2019 [J]. *J Intern Med*, 2020, 288 (3): 335-344. DOI: 10.1111/joim.13089.
- [12] YANG F, HE S, SADANAND S, et al. Contactless measurement of vital signs using thermal and RGB cameras: a study of COVID 19-related health monitoring [J]. *Sensors*, 2022, 22 (2): 627. DOI: 10.3390/s22020627.
- [13] GUAN W J, NI Z Y, HU Y, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China [J]. *N Engl J Med*, 2020, 382 (18): 1708-1720. DOI: 10.1056/NEJMoa2002032.
- [14] HEALC, HARVEY A, BROWN S, et al. The association between temperature, heart rate, and respiratory rate in children aged under 16 years attending urgent and emergency care settings [J]. *Eur J Emerg Med*, 2022, 29 (6): 413-416. DOI: 10.1097/MEJ.0000000000000951.
- [15] MARTINEZ-JIMENEZ M A, LOZA-GONZALEZ V M, KOLOSOVAS-MACHUCA E S, et al. Diagnostic accuracy of infrared thermal imaging for detecting COVID-19 infection in minimally symptomatic patients [J]. *Eur J Clin Invest*, 2021, 51 (3): e13474. DOI: 10.1111/eci.13474.
- [16] TESAR J, MUZIKA L, SKÁLA J, et al. Measurement and processing of thermographic data of passing persons for epidemiological purposes [J]. *Sensors*, 2023, 23 (6): 2945. DOI: 10.3390/s23062945.
- [17] SUN G H, NAKAYAMA Y, DAGDANPUREV S, et al. Remote sensing of multiple vital signs using a CMOS camera-equipped infrared thermography system and its clinical application in rapidly screening patients with suspected infectious diseases [J]. *Int J Infect Dis*, 2017, 55: 113-117. DOI: 10.1016/j.ijid.2017.01.007.
- [18] ALDRED A, RIBEIRO J A S, BEZERRA P M S, et al. Application of thermography to estimate respiratory rate in the emergency room: the journal Temperature toolbox [J]. *Temperature*, 2023, 10 (2): 159-165. DOI: 10.1080/23328940.2022.2099215.
- [19] BRZEZINSKI R Y, RABIN N, LEWIS N, et al. Automated processing of thermal imaging to detect COVID-19 [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1): 17489. DOI: 10.1038/s41598-021-96900-9.
- [20] ALI S T, COWLING B J, WONG J Y, et al. Influenza seasonality and its environmental driving factors in mainland China and Hong Kong [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 818: 151724. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151724.
- [21] QU Y J, MENG Y Q, FAN H, et al. Low-cost thermal imaging with machine learning for non-invasive diagnosis and therapeutic monitoring of pneumonia [J]. *Infrared Phys Technol*, 2022, 123: 104201. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104201.
- [22] NEGISHI T, ABE S, MATSUI T, et al. Contactless vital signs measurement system using RGB-thermal image sensors and its clinical screening test on patients with seasonal influenza [J]. *Sensors*, 2020, 20 (8): 2171. DOI: 10.3390/s20082171.
- [23] YEGHIAZARIANS Y, JNEID H, TIETJENS J R, et al. Obstructive sleep apnea and cardiovascular disease: a scientific statement from the American heart association [J]. *Circulation*, 2021, 144 (3): e56-e67. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000988.
- [24] KAWALA C R, HUMPHREYS C J, KHAPER T, et al. Alternative and complementary treatments for obstructive sleep apnea [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2021, 204 (9): 1097. DOI: 10.1164/rccm.202102-0452RR.
- [25] HU M H, ZHAI G T, LI D, et al. Combination of near-infrared and thermal imaging techniques for the remote and simultaneous measurements of breathing and heart rates under sleep situation [J]. *PLoS One*, 2018, 13 (1): e0190466. DOI: 10.1371/journal.pone.0190466.
- [26] MURTHY J N, VAN JAARSVELD J, FEI J, et al. Thermal infrared imaging: a novel method to monitor airflow during polysomnography [J]. *Sleep*, 2009, 32 (11): 1521-1527. DOI: 10.1093/sleep/32.11.1521.
- [27] TELSON Y C, FURLAN R M M, PORTO M P, et al. Evaluation of the breathing mode by infrared thermography [J]. *Braz J Otorhinolaryngol*, 2023, 89 (6): 101333. DOI: 10.1016/j.bjorl.2023.101333.
- [28] JARNALO M, VARDASCA R, MENDES J G, et al. Antero-cervical thermophysiological characterization of obstructive sleep apnea patients [J]. *Schlaf Atmung*, 2018, 22 (4): 1111-1116. DOI: 10.1007/s11325-018-1644-4.
- [29] GALLMAN J, LEE-FOWLER T, CLARK-PRICE S, et al. Evaluation of infrared thermography and 6-minute walk tests to assess airflow limitation, impaired thermoregulation, and exercise intolerance in dogs with brachycephalic obstructive airway syndrome [J]. *PLoS One*, 2023, 18 (3): e0283807. DOI: 10.1371/journal.pone.0283807.
- [30] LI X Y, JIANG Y L, HU H T, et al. The moxibustion-induced thermal transport effect between the heart and lung meridians with infrared thermography [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 817901. DOI: 10.3389/fcvm.2022.817901.
- [31] 王晓利, 任玉梅, 李玮. 基于“肺肠同治”探讨肺炎喘嗽与肠道菌群的关系 [J]. *中医学报*, 2023, 38 (12): 2493-2498. DOI: 10.16368/j.issn.1674-8999.2023.12.399.
- [32] 马师雷. 基于三部《名医类案》和红外热像技术分析“肺与大肠相表里”理论的证治规律 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2013.
- [33] LI X Y, JIANG Y L, HU H T, et al. The difference in heat transport characteristics of the heart and lung meridians: a comparative study of COPD patients and healthy subjects [J]. *Medicine*, 2021, 100 (5): e23804. DOI: 10.1097/MD.00000000000023804.
- [34] JIANG Y L, HU H T, LI X Y, et al. Difference in the metabolic characteristics of chronic obstructive pulmonary disease patients and healthy adults [J]. *Medicine*, 2020, 99 (30): e21302. DOI: 10.1097/MD.00000000000021302.
- [35] FU Y, NI J X, MARMORI F, et al. Infrared thermal imaging-based research on the intermediate structures of the lung and large intestine exterior-interior relationship in asthma patients [J]. *Chin J Integr Med*, 2016, 22 (11): 855-860. DOI: 10.1007/

- s11655-016-2102-4.
- [36] 陈日新, 陈明人, 李巧林. 灸感法与红外法检测支气管哮喘(慢性持续期)患者肺俞穴热敏态的对比研究[J]. 江西中医药, 2011, 42(1): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.0411-9584.2011.01.004.
- [37] 黄楚峰. 基于红外热成像检测及传统腧穴诊察技术的过敏性鼻炎经穴反应观察[D]. 北京: 北京中医药大学, 2019.
- [38] 朱景智, 陈文芬, 朱焕, 等. 基于红外热成像技术评价无痛蜂疗法治疗肺脾气虚型过敏性鼻炎的临床疗效[J]. 中医外治杂志, 2022, 31(2): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1006-978X.2022.02.012.
- [39] AMBALAVANAN N, WEESE-MAYER D E, HIBBS A M, et al. Cardiorespiratory monitoring data to predict respiratory outcomes in extremely preterm infants[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2023, 208(1): 79-97. DOI: 10.1164/rccm.202210-1971OC.
- [40] HAMADA K, HIRAKAWA E, ASANO H, et al. Infrared thermography with high accuracy in a neonatal incubator[J]. Ann Biomed Eng, 2022, 50(5): 529-539. DOI: 10.1007/s10439-022-02937-w.
- [41] LLOYD R, GOULDING R, FILAN P, et al. Overcoming the practical challenges of electroencephalography for very preterm infants in the neonatal intensive care unit[J]. Acta Paediatr, 2015, 104(2): 152-157. DOI: 10.1111/apa.12869.
- [42] ABBAS A K, HEIMANN K, JERGUS K, et al. Neonatal non-contact respiratory monitoring based on real-time infrared thermography[J]. Biomed Eng Online, 2011, 10: 93. DOI: 10.1186/1475-925X-10-93.
- [43] VILLARROEL M, CHAICHULEE S, JORGE J, et al. Non-contact physiological monitoring of preterm infants in the Neonatal Intensive Care Unit[J]. NPJ Digit Med, 2019, 2: 128. DOI: 10.1038/s41746-019-0199-5.
- [44] LORATO I, STUIJK S, MEFTAH M, et al. Multi-camera infrared thermography for infant respiration monitoring[J]. Biomed Opt Express, 2020, 11(9): 4848-4861. DOI: 10.1364/BOE.397188.
- [45] FREUND Y, CHAUVIN A, JIMENEZ S, et al. Effect of a diagnostic strategy using an elevated and age-adjusted D-dimer threshold on thromboembolic events in emergency department patients with suspected pulmonary embolism: a randomized clinical trial[J]. JAMA, 2021, 326(21): 2141-2149. DOI: 10.1001/jama.2021.20750.
- [46] TREAT-JACOBSON D, MCDERMOTT M M, BRONAS U G, et al. Optimal exercise programs for patients with peripheral artery disease: a scientific statement from the American heart association[J]. Circulation, 2019, 139(4): e10-e33. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000623.
- [47] DENG F G, TANG Q, ZHENG Y J, et al. Infrared thermal imaging as a novel evaluation method for deep vein thrombosis in lower limbs[J]. Med Phys, 2012, 39(12): 7224-7231. DOI: 10.1118/1.4764485.
- [48] DENG F G, TANG Q, JIANG M, et al. Infrared thermal imaging and Doppler vessel pressurization ultrasonography to detect lower extremity deep vein thrombosis: diagnostic accuracy study[J]. Clin Respir J, 2018, 12(3): 1118-1124. DOI: 10.1111/crj.12639.
- [49] DENG F G, TANG Q, ZENG G Q, et al. Effectiveness of digital infrared thermal imaging in detecting lower extremity deep venous thrombosis[J]. Med Phys, 2015, 42(5): 2242-2248. DOI: 10.1118/1.4907969.
- (收稿日期: 2024-03-10; 修回日期: 2024-05-16)
(本文编辑: 贾萌萌)