

多参数监测可穿戴式设备在结直肠癌加速康复外科策略中的临床价值*

刘星宇¹, 江志伟², 龚冠闻^{2Δ}

1 南京中医药大学第一临床医学院 江苏南京 210023

2 南京中医药大学附属医院普外科 江苏南京 210029

Δ通信作者, E-mail: love_ggw2@163.com

[摘要] 加速康复外科理念已在结直肠癌外科获得广泛应用,但单一生理指标难以全面反映患者个体差异与潜在并发症风险。多参数监测可穿戴式设备可同时记录心率变异性、血氧饱和度、活动量、睡眠质量及连续血糖等多维度信息,通过生理和行为数据的深度整合,为结直肠癌围手术期的个体化管理提供了新的技术支持。本综述首先阐述可穿戴式设备在结直肠癌加速康复外科中的应用现状,探讨生理和行为双向耦合作用下的“早期预警”机制;继而梳理多参数监测在术前评估、围手术期干预和术后康复随访中的关键价值及瓶颈问题,包括技术标准化、数据安全与临床路径融合等挑战。最后提出未来研究与临床推广方向,呼吁在多学科团队协作及大规模前瞻性研究的基础上,建立更加系统、智能化和可持续的数字化监测与管理模式,为结直肠癌患者的加速康复及长期生存质量提升带来更大益处。

[关键词] 结直肠癌; 加速康复外科; 可穿戴式设备; 多参数监测

The clinical value of multi-parameter monitoring wearable devices in enhanced recovery after surgery strategies for colorectal cancer*

Liu Xingyu¹, Jiang Zhiwei², Gong Guanwen^{2Δ}

1 First Clinical Medical College, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

2 Department of General Surgery, Affiliated Hospital of Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210029, Jiangsu, China

ΔCorresponding author, E-mail: love_ggw2@163.com

[Abstract] Enhanced recovery after surgery has been widely adopted in colorectal cancer surgery, yet single physiological indicators are insufficient to comprehensively reflect individual patient variability and potential complication risks. Multi-parameter monitoring wearable devices, capable of recording multidimensional data (e.g., heart rate variability, oxygen saturation, physical activity, sleep quality, and continuous blood glucose), offer novel technical support for personalized perioperative management through the integration of physiological and behavioral metrics. This review first outlines the current applications of wearable devices in enhanced recovery after surgery for colorectal cancer and explores the “early warning” mechanisms driven by bidirectional physiological-behavioral coupling. Key roles and bottleneck problem of multi-parameter monitoring in preoperative assessment, perioperative intervention, and postoperative rehabilitation follow-up are analyzed, alongside challenges such as technical standardization, data security, and integration into clinical pathways. Finally, future research and clinical implementation directions are proposed. We advocate for establishing systematic, intelligent, and sustainable digital monitoring and management systems through multidisciplinary collaboration and large-scale prospective studies, in order to bring greater benefits to enhanced recovery and long-term quality of life in colorectal cancer patients.

[Keywords] colorectal cancer, enhanced recovery after surgery, wearable devices, multi-parameter monitoring

加速康复外科 (enhanced recovery after surgery, ERAS) 理念在结直肠癌手术领域的应用,已被证明可有效缩短住院时间、降低并发症发生率并提升患者

的生活质量^[1-2]。然而,传统ERAS路径更多关注围手术期的临床操作规范,例如疼痛管理、早期下床活动和合理营养支持等,尚无法完全解决个体化康复需求

*江志伟人才引进项目 (grjj0250)

DOI:10.19668/j.cnki.issn1674-0491.2025.03.002 中图分类号:R735.3 文献标志码:A

本文引用信息: 刘星宇, 江志伟, 龚冠闻. 多参数监测可穿戴式设备在结直肠癌加速康复外科策略中的临床价值[J]. 结直肠肛门外科, 2025, 31(3): 185-191.

及早期识别并发症的难题。近年来,可穿戴式设备的飞速发展使得对患者生理信号如心率(heart rate, HR)、血氧饱和度(oxygen saturation, SpO₂)、活动量和行为学指标(如睡眠质量、焦虑程度)的实时监测成为可能,为结直肠癌ERAS的进一步精细化管理带来了新的机遇^[3]。

在外科临床应用中,传统生命体征监测设备往往聚焦于单一或少数指标(如HR腕带监测HR),难以全面评价患者的整体康复状态。与此同时,有文献提示,手术应激与患者的心理状态、睡眠质量和运动量之间存在相互影响的复杂关系,单个生理指标无法充分反映这一交互过程^[4]。因此,多参数监测结合生理和行为数据的整合策略正逐渐被视为结直肠癌ERAS的新方向,有望实现对患者全方位的个体化干预^[5]。本综述旨在系统梳理现有证据,阐述多参数监测可穿戴式设备如何在术前、术中和术后不同阶段为结直肠癌ERAS的精细化管理提供支持,并探讨未来研究与临床推广的关键挑战及前景。

1 可穿戴式设备的应用现状

可穿戴式设备在外科康复中的应用近年来发展迅速,其核心在于实现患者生理状态的连续监测,提供实时数据支持。目前市面上,可穿戴式设备主要涵盖生理信号监测、运动康复监测、生物化学监测和远程数据交互等多个方面。

1.1 生理信号监测型

生理信号监测型可穿戴式设备可实时记录HR、SpO₂、血压(blood pressure, BP)、体温(body temperature, BT)等基础生命体征,目前市面上广泛应用的智能手表和健康监测设备均属于此类,如苹果手表(Apple Watch)、菲比特感知手表(Fitbit Sense)和佳明·威努智能手表(Garmin Venu)等,这些设备搭载光电容积描记(photoplethysmography, PPG)传感器,能够实时监测HR和SpO₂水平,部分产品还具备心电图(electrocardiogram, ECG)功能,可用于筛查房颤等心律异常。威廷斯健康监测腕表(Withings ScanWatch)结合ECG和PPG技术,Kirszenblat和Edouard评估了其在不同低氧水平下测量SpO₂的准确性,证明其能够以临床级别的精度测量SpO₂水平^[6]。同时该设备可在30秒内完成心电图检测,并通过算法分析检测心律失常情况。Touiti等^[7]认为,虽然该设备准确性和实用性无法与标准心电图机相提并论,但它仍然可作为一种有价值的筛查工具,并为心脏相关症状

提供电生理记录。此外,欧姆龙心脏监测腕表(Omron Heart Guide)是一款美国食品药品监督管理局批准的可穿戴式BP监测设备,其内置微型袖带,通过充气测量BP。Vaseekaran等^[8]临床验证结果显示,该设备提供的单次和长期测量BP值与标准BP测量设备相当,可适用于术后BP管理和高血压病患者的日常监测。在术后康复过程中,生理信号监测型可穿戴式设备能够帮助医护人员实时掌握患者的生命体征变化,提前发现潜在的并发症,如低氧血症、心律失常或休克等。通过远程数据传输,医护人员可以随时捕捉患者的不良体征,提高患者术后恢复的安全性和精准性。

1.2 运动康复监测型

运动康复监测型可穿戴式设备主要用于记录患者的步数、运动强度和能量消耗等,帮助医护团队评估术后康复进程。这类设备通常采用加速度计、陀螺仪和磁力计等惯性传感器,以测量人体的移动模式。以国产小米手环4等为代表的健身手环能够持续追踪步数、活动时间和热量消耗,在Pérez等^[9]的一项验证性研究中,证明小米手环在低成本效应下,可对自由生活状态的人群进行精准运动量测量,能够为术后患者提供运动恢复的参考数据。在ERAS方案中,早期活动是关键要素之一,运动康复监测型可穿戴式设备能够客观评估患者的运动水平,确保术后康复目标的顺利达成。通过数据分析,医护人员可以根据患者的活动状态调整康复计划,使患者更快恢复正常生活。

1.3 生物化学监测型

生物化学监测型可穿戴式设备主要用于测量体液(汗液、血液、组织间液等)中的代谢物或生物标志物,如血糖(blood glucose, BG)、乳酸、电解质等。这类设备采用电化学传感器、光谱分析或微流体技术,以便在无创或微创条件下实现实时监测。

力博自由型和德康G6是目前最成熟的连续血糖监测(continuous glucose monitoring, CGM)设备,它们通过微型传感器植入皮下,可持续监测BG水平,适用于术后代谢监测和糖尿病患者的BG管理。在Spanakis等^[10]进行的一项临床随机对照研究中,发现德康G6指导下BG检测与传统的床旁指尖BG检测相比较,住院糖尿病患者的整体BG控制效果无明显差异,但德康G6指导下BG检测在预防低BG复发和夜间BG管理方面具有明显优势,且安全性得到了验证。CGM的安全性和实时监测能力为临床决策提供了更可靠的依据。此外,加州大学圣地亚哥分校的研究团队

开发了一款电子指套设备^[11]，仅通过指尖汗液监测乳酸、维生素和药物代谢情况，并且实现了完全依靠指尖汗液供电，能够在较长时间内进行工作，为无创化多维度监测提供了进一步技术支持。生物化学监测型可穿戴式设备能够提供传统生命体征监测无法涵盖的代谢信息，使医护人员能够更深入地了解患者的生理状态，优化术后营养管理和药物调整策略。

以上设备借助无线通信技术，能够将采集的数据实时传输至云端或医院信息系统（hospital information system, HIS），实现远程监测与数据共享，为医护人员提供决策支持，帮助监测并评估患者心理功能及术后康复情况。

2 多参数监测与生理和行为数据的理论基础

2.1 生理和行为数据在术后康复中的交互机制

现代康复医学理论强调术后康复过程并非单一生理调节，而是神经内分泌、免疫功能和心理行为等多维度因素的综合作用结果^[12]。从生理层面看，手术创伤会引起炎症反应及自主神经系统应激，导致心率变异性（heart rate variability, HRV）下降、SpO₂波动等；而从行为层面看，患者因疼痛或焦虑情绪可能减少活动量，影响睡眠质量，进而进一步加重应激反应。生理和行为数据间的“双向耦合”使得任何一个维度出现问题，都会对其他维度产生连锁效应^[13]。因此，只有当监测手段能够综合捕捉生理和行为指标的变化时，才有望较早发现康复进程中的潜在风险并及时介入。

2.2 多参数监测可穿戴式设备的关键指标与作用原理

常见的可穿戴式设备包括智能手表、胸贴式心率计、腰佩式活动监测器等，这些设备通常配备PPG传感器、加速度传感器和生物电传感器，用以测量HR、HRV、步数与运动量、睡眠时长及质量和SpO₂等^[14-15]。PPG技术主要通过探测血液在动脉搏动时的容积变化来推算HR与SpO₂，而加速度计则能客观记录患者的活动强度与步态模式。与传统单一生理监测仪不同的是，这些可穿戴式设备可长时间在患者日常活动中工作，并通过无线传输将数据上传至云端或HIS进行实时分析。

2.3 多参数数据整合的必要性

单一指标监测（如每日步数或平均HR）虽然简单易行，但难以捕捉患者睡眠、情绪、呼吸模式等多维度的信息。Ho等^[16]的研究表明，整合HRV与睡眠质量的数据，可更早预测术后患者发生中重度疼痛的可能性，并及时采取个体化镇痛策略。另一项重症监护研究显示^[17]，HRV与SpO₂水平参数的联合分析，可独立预测进入重症监护患者短期发生不良事件的风险。因此，在围手术期和术后康复管理中，越来越多的临床团队开始尝试引入多参数监测系统，希望通过数据融合来获得更全面的患者康复曲线与风险预警模型。

3 多参数监测在结直肠癌ERAS个体化中的应用现状

近年来，随着ERAS理念在结直肠外科的推广及相关指南的不断完善，外科医师与多学科团队日益重视围手术期个体化管理的重要性。在此背景下，以可穿戴式设备为载体的多参数监测策略逐渐走入临床视野，用于采集并整合患者生理和行为数据（如HR、HRV、SpO₂、活动量及睡眠质量等），为术前评估与术后康复监护提供量化参考。对结直肠癌患者而言，术前基础状态存在差异，部分患者合并心肺功能不全、糖尿病或高龄等因素，传统单一指标的风险评估方法常难以全面反映实际的生理负荷；而在术后阶段，准确及时地发现潜在并发症并给出个体化干预方案，对降低再入院率和提高患者术后生活质量具有决定性意义^[18-19]。

现有文献普遍显示^[20-21]，可穿戴式设备的应用在结直肠癌患者术后康复管理中具有一定可行性和初步成效：其一，通过多参数监测获得的“组合信息”可在患者出现典型临床症状前提示炎症或心血管并发症风险。例如，一项前瞻性观察研究发现，连续监测HR、SpO₂、呼吸频率的水平，能够较早预测重大腹部手术后患者心肌损伤的发生风险^[20]。其二，实时采集的活动量数据能帮助临床团队制订个性化康复目标，如鼓励患者尽早下床活动或根据实时疲劳度调整运动处方，从而增强患者的自我管理能力和康复信心^[21]。另外，有研究采用融合式数据模型，将患者的术前信息（如基础病史、生命体征）与术中生理参数综合分析，建立早期预警系统，初步证实此类系统能缩短住院时间并显著降低再入院率^[22]。

值得注意的是，近年来也有学者将多维度数字化监测平台应用于消化道恶性肿瘤的围手术期管理中，

并取得了积极成果。李嘉宇等^[23]在一项针对50例行腹腔镜胃癌根治术患者的回顾性研究中,将HRV、BG、SpO₂、运动与睡眠指标纳入穿戴式监测系统,实现了对围手术期应激水平和术后康复状态的动态评估,并通过可视化方式辅助个体化干预。虽然该研究主要针对胃癌患者,但其对结直肠癌术后患者的多参数监测流程及远程管理同样具有参考意义,特别是在个体差异化评估和术后并发症早期识别方面,提供了更丰富的循证支撑。

然而,现有多数研究仅在单个中心或小规模样本中探索多参数监测穿戴式设备的有效性和安全性,且设备类型、监测指标、数据采集与分析方法存在较大异质性。有的研究仅监测活动量和HR,而缺少对于睡眠质量、心理压力等行为学数据的关注,难以全面捕捉患者术后恢复轨迹中的异常信号。部分随机对照试验虽然证明了多参数监测可显著缩短患者的术后住院时间,但对特定并发症的干预效果和患者长期依从度的评估仍显不足。此外,HIS(如电子病历、手术麻醉监测系统)与穿戴式设备数据平台之间的互联互通尚处于起步阶段,临床团队往往需要手动整合不同来源的数据,增加了操作复杂度,也在一定程度上限制了大规模推广和标准化应用^[24]。

基于此,如何建立更为系统、规范与高效的数据采集与整合流程,已经成为多参数监测在结直肠癌ERAS路径中应用的关键挑战。一些研究团队正在探索更加灵活的数字化管理平台,通过无线传感器与云端数据传输技术,实现患者院内一院外“无缝监护”^[25]。与此同时,为进一步验证多参数监测的真实临床获益,需要在更大规模、多中心随机对照试验中进行客观评估,并针对不同年龄、合并症和肿瘤分期的患者进行分层分析。只有在研究设计上充分考虑人群差异性、完善数据标注和算法可信度,才能为此类新兴监测模式在结直肠癌个体化康复中的应用提供更高等级的循证依据。

4 多参数监测的整合模式:从数据获取到临床干预

多参数监测要在临床实践中真正发挥功效,必须形成完整的“数据获取—传输—分析—干预”闭环体系。首先,数据获取阶段通常依托多种穿戴式设备,将HR、HRV、活动量、睡眠质量和SpO₂等核心指标进行连续采集。其中,PPG技术已在临床广泛应用,可相对准确且低负担地捕捉脉搏波动信号,配合加速度传感器则能进一步量化患者的日常活动模

式^[26-27]。然而,不同设备在采样频率、算法和传感器精度方面仍存在差异,需要在研究设计与临床使用时进行标准化校准和定期质量控制。在数据传输与分析层面,如何将穿戴式设备的实时信息与HIS进行无缝对接,是实现多参数监测价值的关键。已有研究尝试使用云端数据平台,将患者离院后的生理和行为指标与院内影像学、实验室检测结果相融合,以便多学科团队通过统一界面获取完整的康复动态信息^[28]。目前尚缺乏广泛适配的互操作性标准,导致临床人员需要在不同软件间频繁切换或手动录入数据,限制了实时监测的效率与时效性。随着医疗大数据与远程医疗技术的飞速发展,越来越多的团队开始引入机器学习或人工智能算法,对多参数信息进行自动识别与模式判别,以提高并发症的早期预警准确度。

在干预实施方面,基于多参数监测生成的动态风险信号可以帮助医师、护士、营养师、康复治疗师和心理专家协同制定个体化方案,实现生理和行为双向调控。例如,当监测系统发现患者夜间HRV显著下降、睡眠中断频率升高且活动量减少时,可能提示出现潜在炎症或焦虑情绪的加重;此时由主管医师与心理科进行联合评估,及时调整镇痛、镇静策略或强化心理干预,将并发症风险控制萌芽阶段。对已出院的患者而言,多参数远程监测还能在社区或家庭环境下实现“闭环管理”,包括远程会诊、在线开具运动及营养处方、实时教育与反馈等。通过持续的信息交换与干预优化,使结直肠癌患者在术后康复期能够获得更精细、高效、个体化的医疗支持,从而在整体上降低再入院率并提升长期预后。

5 临床证据与机制阐释:多参数联动对康复结局的影响

多参数监测在结直肠癌围手术期的应用价值,不仅体现在诊疗流程优化与患者体验改善,也在不断积累的循证医学证据中得到初步验证。这些证据通常聚焦于三个核心机制层面:其一,术后炎症反应与自主神经调节的相互作用;其二,并发症的早期识别路径;其三,生理和行为耦合作用对康复进程的整体调控。通过探讨这些机制并结合临床实证研究结果,可更好地理解多参数监测如何实质性地影响患者预后与长期生活质量。

5.1 术后炎症反应与自主神经调节

外科手术引发的创伤及应激反应会导致机体免疫与神经内分泌系统出现复杂的级联变化。已有研究表

明, HRV可作为评价自主神经张力和术后应激水平的重要指标, 在ERAS模式下对早期识别并发症及预后评估具有潜在价值^[29]。一项纳入45例胃癌患者的前瞻性队列研究发现, HRV的明显下降往往出现在临床症状显现之前, 可用来预测围手术期应激程度和自主神经功能状态^[30]。此外, 夜间BT波动和睡眠结构紊乱也与炎症因子水平密切相关, 一旦患者在术后出现持续性低温或频繁觉醒, 临床上应警惕潜在感染、心肺并发症或焦虑情绪加剧^[31]。这些结果支持了从多参数角度同步观察机体炎症反应和神经调节状态的必要性, 从而在生理层面捕捉早期风险信号。

5.2 并发症的早期识别路径

传统监测方式往往依赖定时生命体征测量或实验室检测(如白细胞计数、C反应蛋白), 但这些指标对于亚临床阶段并发症的识别往往滞后^[32]。多参数监测通过实时采集活动量、HRV、SpO₂和行为学指标(如睡眠时长与中断频次等), 可以构建更敏感的预警模型。当某些监测参数同时偏离基线或出现异常组合, 如夜间HRV显著下降、活动量骤减且SpO₂波动增大, 临床团队可优先排查吻合口漏、肺部感染或静脉血栓形成等常见术后并发症。一项系统综述指出, 多种早期预警评分系统(如NEWS、MEWS)在术后48小时内对死亡和严重并发症具有良好的预测能力, 明显优于单一指标^[33]。由此可见, 多参数联动在提高监测敏感性与干预时效方面, 较传统方法更具优势。

5.3 生理和行为耦合作用对康复进程的调控

在ERAS模式中, 促进患者早期活动、完善镇痛管理和优化营养支持是核心原则, 但能否落到实处, 很大程度取决于患者本身的依从性和心理状态^[34]。多参数监测能够对患者日常行为进行量化, 同时亦能通过HRV等指标客观反映患者心理压力与自主神经平衡状态。当监测数据提示患者心理压力升高(如HRV降低)且夜间觉醒率增多时, 及时的心理干预和镇痛方案调整, 可在初始阶段打破负向循环。此外, 若术后运动量不足, 结合SpO₂和主观疲劳评分的波动情况, 可评估患者是否存在疼痛控制不佳、营养摄入不足或心理恐惧等问题。通过MDT的协作, 基于多参数数据对各环节进行针对性强化或修正, 从而在生理和行为这两个层面共同推进康复节律。

总而言之, 多参数监测在结直肠癌术后康复中的应用价值不仅止于“数据可视化”, 其真正贡献在于帮助临床医师和患者自身更早发现并发症苗头, 并推动个体化的干预策略实施。这些机制层面的阐释与近

年来的实证研究结果相互印证, 构成了多参数监测可穿戴式设备在结直肠外科ERAS中的循证基础, 也为进一步大规模临床试验和跨学科研究指明了方向。

6 应用前景、挑战及未来研究方向

多参数监测为结直肠癌围手术期管理带来了新的思路和实用价值, 尤其在个体化康复、早期并发症预警及多学科协同方面展现出可观潜力。然而, 要使这一技术在实际临床环境中大范围落地并实现可持续应用, 仍需面对多重挑战并进一步开展高质量研究, 为其临床有效性和安全性提供更坚实的循证依据。

在技术与设备层面, 如何提升可穿戴式设备的多参数测量精准度和使用舒适度是目前的核心需求。一些研究团队正致力于开发更小型、柔性化且低功耗的传感器, 以满足患者在住院与居家环境下的长时间监测要求^[35]。与此同时, 为了实现术前一术中一术后全程的“闭环管理”, 需要HIS、可穿戴式设备和云端数据平台三方在互操作性与数据安全方面达成一致标准。现阶段, 因数据格式和传输协议仍未统一, 造成信息交换效率不足, 易形成“数据孤岛”。若能在国家或行业层面出台多参数监测的技术规范与安全指引, 将为临床推广扫除重要障碍。

如何在临床路径中融入多参数监测并实现标准化, 是实践应用所面临的另一大挑战。ERAS理念已在结直肠外科广为接受, 但其核心流程多集中于疼痛管理、营养支持、术后早期活动等操作层面; 而多参数监测需要外科、麻醉科、护理部、康复科、心理科等多方团队在数据解读和干预决策上保持高度协同。因此, 未来亟需开展更大规模、多中心的随机对照试验, 在包含不同年龄、术前合并症和肿瘤分期的患者人群中, 统一监测指标、干预阈值和观察终点, 全面评估多参数监测对住院时间、并发症发生率、再入院率和患者主观生活质量的影响。只有在明确其临床效益和成本一效益比的前提下, 医疗保险或商业保险才可能逐步介入支付, 为更多患者提供高可及性的数字化康复方案。

在未来研究方向方面, 随着大数据和人工智能技术的快速发展, 多参数监测也将与其他“精准医学”手段相结合, 推动个体化和预测性医疗的进一步演进。例如, 通过将可穿戴式设备采集的HRV、SpO₂、活动量和睡眠质量等时序性数据, 与患者的基因组信息、影像组学特征以及肿瘤分子分型相结合, 可能在更早阶段对术后并发症或复发风险进行精准预测; 并据此制定差异化的康复方案。与此同时, 人机交互与

智能指导系统（如移动端应用、远程医疗平台）可向患者提供及时反馈和个性化干预建议，包括运动强度调整、心理支持以及饮食营养指导。这样的“智能助手”不仅有助于提升患者依从度与自我管理水平，也能减轻医护人员的工作负担，促进医疗资源的合理分配。

7 小结

多参数监测可穿戴设备将生理和行为数据深度融合，为结直肠癌 ERAS 提供了突破单一指标局限、

实现个体化精细化管理的可能性。基于多维度指标的实时采集和综合分析，外科团队可更早识别并发症风险并提供适时干预，使患者在生理和心理这两方面均实现快速而安全的术后康复。尽管当前尚存在技术标准、隐私保护与成本效益分析难以统一等多重挑战，但随着更多大规模临床试验和跨学科合作的推动，多参数监测有望成为未来结直肠癌 ERAS 的重要支柱，为改善患者术后生活质量与长期预后带来深远影响。

利益冲突声明 全体作者均声明不存在与本文相关的利益冲突。

参考文献

- [1] KEHLET H, WILMORE D W. Evidence-based surgical care and the evolution of fast-track surgery[J]. *Annals of surgery*, 2008, 248(2): 189-198.
- [2] LJUNGQVIST O, SCOTT M, FEARON K C. Enhanced recovery after surgery: a review[J]. *JAMA surgery*, 2017, 152(3): 292-298.
- [3] KAVALLIEROS K, KARAKOZIS L, HAYWARD R, et al. Wearable devices in colorectal surgery: a scoping review[J]. *Cancers*, 2024, 16(13): 2303.
- [4] ROSENBERG J, WILDSCHIØDTZ G, PEDERSEN M H, et al. Late postoperative nocturnal episodic hypoxaemia and associated sleep pattern[J]. *British journal of anaesthesia*, 1994, 72(2): 145-150.
- [5] LOHSIRIWAT V, JITMUNGNGAN R, CHADBUNCHACHAI W, et al. Enhanced recovery after surgery in emergency resection for obstructive colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *International journal of colorectal disease*, 2020, 35(8): 1453-1461.
- [6] KIRSZENBLAT R, EDOUARD P. Validation of the withings scanwatch as a wrist-worn reflective pulse oximeter: prospective interventional clinical study[J]. *Journal of medical Internet research*, 2021, 23(4): e27503.
- [7] TOUITI S, MEDARHRI I, MARZOUKI K, et al. Feasibility and reliability of whintings scanwatch to record 4-lead electrocardiogram: a comparative analysis with a standard ECG[J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20593.
- [8] VASEEKARAN M, KAESE S, GORLICH D, et al. WATCH-BPM-comparison of a WATCH-type blood pressure monitor with a conventional ambulatory blood pressure monitor and auscultatory sphygmomanometry[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2023, 23(21): 8877.
- [9] DE LA CASA PÉREZ A, LATORRE ROMAN P A, MUNOZ JIMENEZ M, et al. Is the Xiaomi Mi Band 4 an accuracy tool for measuring health-related parameters in adults and older people? An original validation study[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19(3): 1593.
- [10] SPANAKIS E K, URRUTIA A, GALINDO R J, et al. Continuous glucose monitoring-guided insulin administration in hospitalized patients with diabetes: a randomized clinical trial[J]. *Diabetes care*, 2022, 45(10): 2369-2375.
- [11] DING S, SAHA T, YIN L, et al. A fingertip-wearable microgrid system for autonomous energy management and metabolic monitoring[J]. *Nature electronics*, 2024, 7(9): 788-799.
- [12] TAZREEAN R, NELSON G, TWOMEY R. Early mobilization in enhanced recovery after surgery pathways: current evidence and recent advancements[J]. *Journal of comparative effectiveness research*, 2022, 11(2): 121-129.
- [13] GOLDER H, CASANOVA D, PAPALOIS V. Evaluation of the usefulness of the Clavien-Dindo classification of surgical complications[J]. *Cirugia española*, 2023, 101(9): 637-642.
- [14] CHEN J, ABBOD M, SHIEH J S. Pain and stress detection using wearable sensors and devices-a review[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(4): 1030.
- [15] PRIETO-AVALOS G, CRUZ-RAMOS N A, ALOR-HERNANDEZ G, et al. Wearable devices for physical monitoring of heart: a review[J]. *Biosensors*, 2022, 12(5): 292.
- [16] HO C N, FU P H, HUNG K C, et al. Prediction of early postoperative pain using sleep quality and heart rate variability[J]. *Pain practice: the official journal of World Institute of Pain*, 2024, 24(1): 82-90.
- [17] BODENES L, N'GUYEN Q T, LE MAO R, et al. Early heart rate variability evaluation enables to predict ICU patients' outcome[J]. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 2498.
- [18] 孙立华. 结直肠癌术后患者3个月内非计划性再入院危险因素分析[J]. *护理实践与研究*, 2021, 18(9): 1290-1293.
- [19] 周丹, 郭思思, 谭勤, 等. 个体化预测结肠癌术后发生并发症风险列线图模型的建立[J]. *现代临床医学*, 2023, 49(4): 253-255, 259.
- [20] LOFT F C, RASMUSSEN S M, ELVEKJAER M, et al. Continuously monitored vital signs for detection of myocardial injury in high-risk patients - an observational study[J]. *Acta anaesthesiologica Scandinavica*, 2022, 66(6): 674-683.
- [21] SANKARAN S, LUYTEN K, HANSEN D, et al. Have you met your mets? - enhancing patient motivation to achieve physical activity targets in cardiac tele-rehabilitation[C]//*Proceedings of the 32nd International BCS Human Computer Interaction Conference*. Birmingham: BCS Learning & Development, 2018.
- [22] SHICKEL B, LOFTUS T J, RUPPERT M, et al. Dynamic predictions of postoperative complications from explainable, uncertainty-aware, and multi-task deep neural networks[J]. *Scientific reports*, 2023, 13(1): 1224.

- [23] 李嘉宇, 江志伟, 王刚, 等. 围手术期多维度数字化监测平台在胃癌患者中的应用价值[J]. 中华消化外科杂志, 2024, 23(4): 601-608.
- [24] RAJAGOPALAN R. Smart and pervasive health systems—challenges, trends, and future directions[C]//Future of Information and Communication Conference. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [25] MAJEED J H, AISH Q. A remote patient monitoring based on WBAN implementation with internet of thing and cloud server[J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2021, 10(3): 1640-1647.
- [26] VAN DER STEL S D, LAI M, GROEN H C, et al. Imaging photoplethysmography for noninvasive anastomotic perfusion assessment in intestinal surgery[J]. The Journal of surgical research, 2023, 283: 705-712.
- [27] LAMBERIGTS M, VAN HOOF L, PROESMANS T, et al. Remote heart rhythm monitoring by photoplethysmography-based smartphone technology after cardiac surgery: prospective observational study[J]. JMIR mHealth and uHealth, 2021, 9(4): e26519.
- [28] 李洋, 黄进, 田丰, 等. 云端融合的神经系统疾病多通道辅助诊断研究[J]. 中国科学(信息科学), 2017, 47(9): 1164-1182.
- [29] KOO C H, XUE B, YIK V, et al. Using heart rate variability to develop a predictive model for post-operative cardiovascular complications following major abdominal surgery: a pilot study[J]. World journal of surgery, 2024, 48(3): 585-597.
- [30] CHENG W, LIU J, ZHI M W, et al. Stress and autonomic nerve dysfunction monitoring in perioperative gastric cancer patients using a smart device[J]. Annals of noninvasive electrocardiology: the official journal of the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology, Inc, 2022, 27(1): e12903.
- [31] IRWIN M R. Sleep disruption induces activation of inflammation and heightens risk for infectious disease: role of impairments in thermoregulation and elevated ambient temperature[J]. Temperature (Austin, Tex.), 2023, 10(2): 198-234.
- [32] VERKKALA K, VALTONEN V, JÄRVINEN A, et al. Fever, leucocytosis and C-reactive protein after open-heart surgery and their value in the diagnosis of postoperative infections[J]. The Thoracic and cardiovascular surgeon, 1987, 35(2): 78-82.
- [33] SMITH M E, CHIOVARO J C, O'NEIL M, et al. Early warning system scores for clinical deterioration in hospitalized patients: a systematic review[J]. Annals of the American Thoracic Society, 2014, 11(9): 1454-1465.
- [34] RITTER A S, WELSCH T, BRODERSEN F, et al. Impact of enhanced recovery after surgery protocol compliance on outcome after pancreatic surgery: results from a certified ERAS center[J]. Annals of surgery open: perspectives of surgical history, education, and clinical approaches, 2024, 5(4): e501.
- [35] LEE S P, HA G, WRIGHT D E, et al. Highly flexible, wearable, and disposable cardiac biosensors for remote and ambulatory monitoring[J]. NPJ digital medicine, 2018, 1: 2.

[收稿日期: 2025-04-07]

(责任编辑: 龙冰霜)