

提供 CTR 提供参考。

## 1 AI 在 CVD 中的应用

AI 是计算机科学领域的一个分支,旨在模拟人类的思维过程、学习能力和知识存储。它主要包括两个子领域:各种类型的机器学习(machine learning, ML)和认知计算(cognitive computing, CC)。AI 已在工程学、医学、心理学和经济学等领域得到广泛研究<sup>[11-14]</sup>。近年来,一些研究探索了 AI 在医疗保健系统中的潜在应用,表明它在改进诊断和治疗、公共卫生接触者追踪、药物/疫苗开发等方面发挥了作用。研究表明,将 AI 技术应用于心脏病学可显著提高 CVD 诊断、治疗和管理的准确性和效率。基于 AI 的图像分析算法可以快速准确地检测医学图像中的异常,预测模型可以分析大量患者数据以识别并预测某些 CVD 发展的可能性;基于 AI 的决策支持系统可以帮助临床医生做出治疗决策,可穿戴设备可以监测心脏健康并检测 CVD 的早期迹象<sup>[15-17]</sup>。随着 AI 技术的不断发展, AI 将助力临床医护人员利用大数据实施精准的心血管诊疗。

## 2 AI 在 CTR 的应用现状

### 2.1 使用 AI 的可穿戴式设备

可穿戴设备是指内置无线通信功能的小型电子移动设备或计算机,一般是纯机械设备或智能机电一体化系统,通常由传感器、执行器和计算部件构成。这些设备可以作为配件或衣物穿在人体,通常嵌入智能手表或手机中,用于收集、传输甚至分析体温、血压、心率、心电图和脑电图等生命体征数据,从而用于医疗状况的早期诊断和管理<sup>[18]</sup>。这些设备的便携性和易用性使得用户能够随时随地进行健康监测,不受时间和地点的限制,从而提高了患者的依从性和康复效果。近年来,广泛运用的智能穿戴设备如 Apple Watch、Fitbit 和 Omron HeartGuide 等,不仅可以提供实时的生理数据,还能通过 AI 技术对这些数据进行分析,生成个性化的健康报告和建议。例如, Velmovitsky 等<sup>[19]</sup>的研究应用 ML 技术开发了一项压力预测工具对 Apple Watch 的 ECG 传感器收集的心率变异性数据进行分析,结果显示该模型具有很高的特异性及预测能力。Kargarandehkordi 等<sup>[20]</sup>运用 AI 算法开发了一款名为 CardioMate 的核心研究应用程序,对 Fitbit 设备收集的生物信号进行建模分析用以实时预测压力引起的血压峰值,实现主动健康监测。Omron Heart Guide 则可利用 AI 功能来解释连续血压监测数据<sup>[21]</sup>。这些设备通过 AI 技术分析

数据,生成个性化的健康报告和建议,便于用户随时进行健康监测,提高患者的康复效果和依从性。然而,如何基于收集的大量数据评估和正确解释 CTR 的进度是医护人员面临的挑战之一。此外,由于可穿戴设备存在电池容量不足等客观因素,可能采集到无效数据,因此保障数据质量和进行数据预处理尤为重要<sup>[22]</sup>。同时,患者对佩戴可穿戴设备的舒适度满意度欠佳可能导致设备携带率下降,降低数据的完整性<sup>[23]</sup>。值得一提的是,由于生理信号、可穿戴设备和心血管疾病的复杂亚组成分的显著变异性,可能很难基于有限的数据集进行建模。在未来的研究中,探索更高级的 AI 算法、优化模型参数以及集成其他特征或数据源可能会带来更精确的诊断工具。

### 2.2 虚拟康复平台

虚拟康复平台是结合现代信息技术和 AI 技术为患者提供远程康复治疗和管理的新平台。这些平台通常包括远程监测、数据分析与反馈、个性化康复计划、患者教育和互动、远程医疗支持及数据安全与隐私保护等功能。

#### 2.2.1 智能监测与数据分析

虚拟心脏康复平台利用智能穿戴设备和生物传感器实时监测患者的心脏健康参数,并通过无线通信技术将数据传输至中央数据库。例如, MyHeart 平台通过可穿戴传感器提取 ECG 数据,实时监测患者的心脏健康状况,并进行身体活动分类,提供个性化康复建议。最近的一项研究运用 MyHeart 平台对心血管患者实施了个性化的 AI 心血管体能测试、康复锻炼以及实时监控,研究表明,使用该平台的患者心功能恢复更快<sup>[24]</sup>。SENSORIA 心脏早期检测平台基于 AI 开发了一套的用于识别心房颤动和结构性心脏杂音的算法,通过 Eko 低射血分数工具能在 15 秒内检测到低射血分数,该工具有助于早期检测心力衰竭<sup>[25]</sup>。此外,类似平台如 Apple Heart Study、Fitbit Health Solutions 等则通过各自可穿戴智能设备监测数据提供全面的健康趋势分析和个性化的健康报告,帮助患者建立健康的生活方式。

#### 2.2.2 个性化康复计划与指导

虚拟康复平台利用大数据分析和 AI 技术对患者的健康数据和康复进展进行深度分析,生成个性化的康复计划,包括具体的运动指导、营养建议和药物管理等。这类平台通过持续监测患者的生理参数,如心率、血压、体温和运动量,结合患者的病史和当前康复阶段,制定出最适合个体的康复策略。例如, Cardiac Reh 提供基于应用的远程心脏康复程序,涵盖个性化康复计划、日常任务提醒、教育内容和康复进度跟踪等功能,确保患者在康复过程中得到全方位的

【基金项目】四川省科技计划资助项目(编号:2022YFS0356)

△通讯作者

支持<sup>[26]</sup>。

**2.2.3 远程医疗支持** 在传统 CTR 时代,患者和医护人员主要通过电话进行交流,这限制了康复的准确性和延续性。技术创新带来了互联网和智能手机的迅速普及,信息通信革命使 CTR 的方式更加多样化。例如,利用自动短信提供激励性提醒,以增强患者的依从性。通过互联网预约宣教课程或与康复专家进行一对一咨询<sup>[27]</sup>。此外,随着移动健康和远程监测技术的发展,整合了智能疾病管理系统的虚拟康复平台得到了广泛应用,使临床医生能够客观地监控和跟踪患者情况的变化,实现患者咨询、药物调整和远程诊疗等一站式服务<sup>[28]</sup>。虚拟康复平台能够全面监测 CR 的关键指标,AI 算法为实时评估和管理这些数据提供了有效的方法。如为心力衰竭患者设计的 Hearten 知识管理系统,它使用 AI 进行数据清理、特征选择、类平衡和分类,自动对康复风险、疾病严重性和患者依从性进行分层,该系统集成了心衰严重程度和不良事件预测,为心力衰竭管理提供决策支持<sup>[29]</sup>。同时,ChatGPT 等开源 AI 语言大模型的推出极大加速了 AI 工具的应用<sup>[30]</sup>。基于这些模型开发的 AI 驱动医疗系统可自动提供关于药物和运动处方的决策支持,进而减少医护人员的时间成本和工作量。此外,CTR 的虚拟康复平台管理了大量的数据,可提供更多的特征来训练和测试 AI 模型。然而,AI 模型造成的分诊偏倚存在潜在的伦理问题,需要进一步的研究来探索 AI 模型的更多交互式使用和实时生理反馈的整合<sup>[31]</sup>。

### 3 AI 应用于 CTR 的局限性

**3.1 数据隐私** AI 在医疗领域的运用带来了诸多益处,但也引发了一系列伦理问题。比如有关隐私数据的管理,尤其是涉及患者健康数据的收集、存储和处理。随着 AI 不断生成大量与患者健康相关的数据,患者隐私受到泄露的风险日益凸显<sup>[32]</sup>。政府管理部门需要通过立法和监管来确保健康信息的合法使用,并强化对数据安全的保护措施。同时,医护人员和技术支持人员需要接受专门的教育和培训,以充分理解并尊重患者的隐私权,从而在使用 AI 技术时能够更好地保护患者的敏感信息。只有通过多方努力,才能在享受 AI 带来的医疗进步的同时,最大程度维护患者的隐私和权益。

**3.2 数字鸿沟** 智能设备价格昂贵且使用门槛高,使得经济条件较差或年龄较大的人群难以享受这些技术带来的益处,进一步加剧了社会不平等<sup>[33]</sup>。为解决这一问题,政府和社会组织需采取更多措施,例如提供免费的智能技术培训和推广计划,帮助更多人掌握和使用这些技术。同时,制定促进数

字包容的政策,确保在分配资源和技术时,优先考虑弱势群体的需求。通过这些努力,可以让社会各阶层,尤其是那些处于经济和社会边缘的人群,共享人工智能技术带来的进步和便利,缩小数字鸿沟,实现更公平的技术应用。

**3.3 “黑匣子”现象** 复杂的 ML 算法可能产生难以解释的决策过程,导致用户无法理解计算机是如何做出特定的判断或建议的。这种情况可能会引发用户对算法决策的不信任,甚至出现误解和质疑。为了提高算法的透明度和可解释性,需要进行更深入的研究,并开发出更容易理解的人工智能算法,包括创建能够解释其决策过程的模型,或在算法设计中加入解释机制,使得用户能够追踪和理解每一步的判断依据。此外,确保计算机的决策过程对用户透明可见也是必不可少的。通过提供详细的决策路径和依据说明,用户可以更清楚地了解 AI 系统如何得出结论,进而增强对系统的信任。透明的决策过程不仅有助于用户理解和接受人工智能技术,还能促进社会对 AI 技术的信心,推动其更广泛和有效的应用<sup>[34]</sup>。

**3.4 缺乏对 AI 的认知** 调查数据显示,很多医护人员缺乏对 AI 相关知识的了解,对其在医疗领域中的优势和挑战缺乏清晰认识<sup>[35]</sup>。因此,需要加强对医护人员和公众的宣传教育,让他们深入了解 AI 技术在医疗领域的应用前景和潜在价值。此外,AI 技术可能无法准确理解和处理人类的情感问题,缺乏同理心,这也是一个需要解决的挑战<sup>[36]</sup>。总之,在将 AI 运用到医疗领域,特别是在 CTR 中,需要持续解决其面临的技术和伦理挑战。

### 4 AI 在 CTR 应用的未来展望

**4.1 多模态数据融合** CTR 中的多模态数据融合是指对来自多个来源的各类数据进行整合和分析,以提高 CTR 方案的有效性和个性化,即使用 AI 算法对来自不同来源的数据,如可穿戴设备采集的生理数据、影像数据、基因数据和临床检验数据等进行组合和分析。多模态数据融合旨在全面了解患者的健康状况,包括心血管功能、身体活动水平、药物反应和心理健康等方面,并利用 ML 和深度学习等 AI 技术,从这些综合数据中获取有价值的见解,为患者量身定制康复计划。例如,通过结合来自可穿戴设备的生理数据和心脏扫描的影像数据,可以评估心脏功能并检测异常<sup>[37]</sup>。基因数据能深入了解患者对心血管疾病的易感性和药物反应情况<sup>[38]</sup>。

**4.2 智能康复机器人** 基于 AI 的智能康复机器人在 CTR 中具有巨大的应用前景。根据人机交互模式可将智能康复机器人分为远程机器人、自主协作机器人、外骨骼机器人、智能可穿戴机电一体化系

统、手持机器人和社交机器人等类别<sup>[39]</sup>,并根据需求将医疗保健的三种核心模式,即评估、康复、援助提供给患者。首先,远程机器人能够利用先进的远程监测技术,实时收集患者的生理数据和运动情况,实现医护人员对患者的实时监测和指导,大大缩短了患者因交通等原因到医院进行康复训练的时间,提高了康复效率。其次,通过 AI 算法和数据分析,自主协作机器人能够根据患者的个体差异和康复需求,量身定制个性化的康复方案,并在康复过程中动态调整,确保康复效果最大化。外骨骼机器人作为一种先进的辅助设备,可以帮助患者进行步态训练和肌肉强化,从而提高患者的运动能力和生活质量。此外,社交机器人还可以通过虚拟现实、语音交互等技术,在心理支持和社交互动方面发挥重要作用,为患者提供沉浸式的康复体验,增强康复的趣味性和参与度。

**4.3 强化学习与自适应算法** 强化学习是一种 ML 方法,其目标是通过与环境的交互来学习如何做出决策,以使累积的奖励最大化。在强化学习中,智能体(例如机器人、程序或其他决策制定者)通过尝试不同的行动并观察结果来学习。自适应算法是一类能够根据环境变化或输入数据的特征自动调整自身行为或参数的算法。这种算法能够在运行过程中自动适应和调整以适应环境的变化或输入数据的不确定性。通过强化学习和自适应算法,AI 系统可以不断学习和优化,提供更加智能和高效的康复解决方案。强化学习使得 AI 系统能够在实际应用中,通过不断试验和反馈,优化康复策略,提高康复效果。自适应算法则可以根据患者的个体差异和实时状态,动态调整康复方案,确保每个患者都能获得最合适的康复训练。这些技术的应用将显著提升 CTR 的个性化和精准化水平。

**4.4 健康数据共享与协作** 通过人工智能技术,医疗机构和研究机构能够跨越机构边界,共享并整合多元化的健康数据,包括患者的生理参数、医疗影像等。这些数据被整合到一体后,AI 可以利用其强大的分析能力构建精准的预测模型,为医生提供个性化康复方案的决策支持。此外,AI 技术还能促进知识共享与跨界合作,打破数据封锁,加速康复技术的创新与应用。综上,这种融合了数据共享、AI 分析和跨界合作的协作模式,有望提高 CVD 患者的康复效果,为 CTR 领域带来新的发展机遇。

## 5 小结

CVD 是当今全球面临的重大健康挑战之一,对社会健康和经济都带来了巨大影响。尽管 CR 被证实为改善患者生活质量和降低治疗负担的有效手段,但其覆盖率和普及程度仍然相对较低,部分原

因在于资源不均衡以及传统康复方式的局限性。在这一背景下,CTR 作为一种新型康复方式应运而生,它克服了地域限制,提高了患者的积极性和康复依从性。然而,远程康复也面临技术尚不成熟、隐私数据安全性等诸多挑战,在 CTR 发展的过程中,AI 的应用成为了关键因素,AI 技术能够通过分析患者大量的生理数据、医学影像等信息为患者提供个性化的康复方案,从而使康复治疗更加精准、有效。此外,AI 还能够为医护人员提供决策支持,从而提高了康复的效果和效率。同时,AI 还有助于促进数据共享和跨界合作,加速康复技术的创新与应用。因此,将 AI 技术与 CTR 相结合有望提高 CVD 患者的康复效果,为未来的康复治疗带来新的发展机遇。综上,AI 可以提高 CTR 的效果,有助于使其更加全面并接近最优。然而,目前仍需进一步的证据评估在临床实践中实施 AI 结合 CTR 的可行性和安全性。在未来的发展中,需要进一步加强多学科合作,不断完善技术和制度,以推动 AI 技术在 CTR 中的广泛应用,并充分认识到应用 AI 可能涉及的伦理和法律问题,确保其安全、有效地服务于 CVD 患者的康复需求。

## 【参考文献】

- [1] World Heart Federation, World Heart Report 2023: Full Report[EB/OL]. (2024-08-02). <https://world-heart-federation.org/wp-content/uploads/World-Heart-Report-2023.pdf>
- [2] 国家心血管病中心. 中国心血管健康与疾病报告 2022[M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2023.
- [3] Yang Z, Jia X, Li J, et al. Efficacy and Safety of Hybrid Comprehensive Telerehabilitation (HCTR) for Cardiac Rehabilitation in Patients with Cardiovascular Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials[J]. *Occupational Therapy International*, 2023, 2023:5147805.
- [4] Makita S, Yasu T, Akashi Y J, et al. JCS/JACR 2021 guideline on rehabilitation in patients with cardiovascular disease[J]. *Circulation Journal*, 2022, 87(1): 155-235.
- [5] 曹冬梅,邓涵丹,陈运龙,等. 早期心脏康复训练对经皮冠状动脉介入治疗术后功能性体能指标的影响[J]. *实用医院临床杂志*, 2022, 19(3):31-35.
- [6] Mathews L, Brewer LP. A review of disparities in cardiac rehabilitation: evidence, drivers, and solutions[J]. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, 2021, 41(6): 375-382.
- [7] Brouwers RWM, Van Der Poort EJK, Kemps HMC, et al. Cost-effectiveness of cardiac telerehabilitation with relapse prevention for the treatment of patients with coronary artery disease in the Netherlands [J]. *JAMA Network Open*, 2021, 4(12): e2136652.
- [8] Scherrenberg M, Wilhelm M, Hansen D, et al. The future is now: a call for action for cardiac telerehabilitation in the COVID-19 pandemic from the secondary prevention and rehabilitation section of the European Association of Preventive Cardiology [J]. *European Journal Of Preventive Cardiology*, 2021, 28(5): 524-540.

- [9] Zhong W, Liu R, Cheng H, et al. Longer-Term Effects of Cardiac Telerehabilitation on Patients With Coronary Artery Disease: Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *JMIR MHealth and UHealth*, 2023, 11: e46359.
- [10] Owen O, O'Carroll V. The effectiveness of cardiac telerehabilitation in comparison to centre-based cardiac rehabilitation programmes: A literature review [J]. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 2022; 1357633X221085865.
- [11] den Uijl I, Sunamura M, Brouwers RMW, et al. Cardiac rehabilitation for patients with obesity: lessons learned from the OPTICARE XL trial [J]. *Netherlands Heart Journal*, 2024, 32(1): 14-22.
- [12] Pan Y, Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends [J]. *Automation In Construction*, 2021, 122: 103517.
- [13] Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, et al. AI in health and medicine [J]. *Nature Medicine*, 2022, 28(1): 31-38.
- [14] Arisdakessian S, Wahab OA, Mourad A, et al. A survey on IoT intrusion detection: Federated learning, game theory, social psychology, and explainable AI as future directions [J]. *IEEE Internet Of Things Journal*, 2022, 10(5): 4059-4092.
- [15] Bickley SJ, Chan HF, Torgler B. Artificial intelligence in the field of economics [J]. *Scientometrics*, 2022, 127(4): 2055-2084.
- [16] Rezaei M, Rahmani E, Khouzani SJ, et al. Role of artificial intelligence in the diagnosis and treatment of diseases [J]. *Kindle*, 2023, 3(1): 1-160.
- [17] Siddiq M. Exploring the role of machine learning in contact tracing for public health: benefits, challenges, and ethical considerations [J]. *American Journal of Economic and Management Business (AJEMB)*, 2023, 2(3): 99-110.
- [18] Khadela A, Papat S, Ajabiya J, et al. AI, ML and other bioinformatics tools for preclinical and clinical development of drug products [J]. *Bioinformatics Tools for Pharmaceutical Drug Product Development*, 2023: 255-284.
- [19] Velmovitsky PE, Alencar P, Leatherdale ST, et al. Using apple watch ECG data for heart rate variability monitoring and stress prediction: A pilot study [J]. *Frontiers In Digital Health*, 2022, 4: 1058826.
- [20] Kargarandehkordi A, Slade C, Washington P. Personalized AI-Driven Real-Time Models to Predict Stress-Induced Blood Pressure Spikes Using Wearable Devices: Proposal for a Prospective Cohort Study [J]. *JMIR Research Protocols*, 2024, 13(1): e55615.
- [21] Quazi S. Artificial intelligence and machine learning in precision and genomic medicine [J]. *Medical Oncology*, 2022, 39(8): 120.
- [22] Jones AK, Yan CL, Rivera Rodriguez BP, et al. Role of wearable devices in cardiac telerehabilitation: A scoping review [J]. *PloS One*, 2023, 18(5): e0285801.
- [23] Böttcher S, Vieluf S, Bruno E, et al. Data quality evaluation in wearable monitoring [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 21412.
- [24] Ghani A, Maniha N, Lim WJ, et al. Rehabilitation and Home Health Monitoring Based-AI Scheduling Application for Coronary Artery Disease and Cardiovascular Patients [J]. *Instrumentation, Mesures, Métrologies*, 2024, 23(2).
- [25] Bachtiger P, Petri CF, Scott FE, et al. Point-of-care screening for heart failure with reduced ejection fraction using artificial intelligence during ECG-enabled stethoscope examination in London, UK: a prospective, observational, multicentre study [J]. *The Lancet Digital Health*, 2022, 4(2): e117-e125.
- [26] Vonk T, Bakker EA, Zegers ES, et al. Effect of a personalised mHealth home-based training application on physical activity levels during and after centre-based cardiac rehabilitation: rationale and design of the Cardiac RehApp randomised control trial [J]. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 2021, 7(3): e001159.
- [27] Huwa J, Tweya H, Mureithi M, et al. "It reminds me and motivates me": Human-centered design and implementation of an interactive, SMS-based digital intervention to improve early retention on antiretroviral therapy: usability and acceptability among new initiates in a high-volume, public clinic in Malawi [J]. *PloS One*, 2023, 18(7): e0278806.
- [28] Ullah M, Hamayun S, Wahab A, et al. Smart technologies used as smart tools in the management of cardiovascular disease and their future perspective [J]. *Current Problems In Cardiology*, 2023, 48(11): 101922.
- [29] Masatake K, Olivier H, Martin M, et al. Machine learning-derived echocardiographic phenotypes predict heart failure incidence in asymptomatic individuals [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(2): 193-208.
- [30] Dergaa I, Saad HB, El Omri A, et al. Using artificial intelligence for exercise prescription in personalised health promotion: A critical evaluation of OpenAI's GPT-4 model [J]. *Biology of Sport*, 2023, 41(2): 221-241.
- [31] Johnson AE, Brewer LPC, Echols M R, et al. Utilizing artificial intelligence to enhance health equity among patients with heart failure [J]. *Heart Failure Clinics*, 2022, 18(2): 259-273.
- [32] Majeed A, Hwang SO. When AI meets Information Privacy: The Adversarial Role of AI in Data Sharing Scenario [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 76177-76195.
- [33] Xing F, Peng G, Zhang B, et al. Socio-technical barriers affecting large-scale deployment of AI-enabled wearable medical devices among the ageing population in China [J]. *Technological Forecasting And Social Change*, 2021, 166: 120609.
- [34] Von Eschenbach WJ. Transparency and the black box problem: Why we do not trust AI [J]. *Philosophy & Technology*, 2021, 34(4): 1607-1622.
- [35] Abdullah R, Fakieh B. Health care employees' perceptions of the use of artificial intelligence applications: survey study [J]. *Journal Of Medical Internet Research*, 2020, 22(5): e17620.
- [36] Marcos-Pablos S, García-Peñalvo F J. Emotional intelligence in robotics: A scoping review [C]// *New Trends in Disruptive Technologies, Tech Ethics and Artificial Intelligence: The DITTET Collection 1*. Springer International Publishing, 2022: 66-75.
- [37] Cosoli G, Poli A, Scalise L, et al. Measurement of multimodal physiological signals for stimulation detection by wearable devices [J]. *Measurement*, 2021, 184: 109966.
- [38] O'Sullivan JW, Raghavan S, Marquez-Luna C, et al. Polygenic risk scores for cardiovascular disease: a scientific statement from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2022, 146(8): e93-e118.
- [39] Atashzar SF, Carriere J, Tavakoli M. How can intelligent robots and smart mechatronic modules facilitate remote assessment, assistance, and rehabilitation for isolated adults with neuromusculoskeletal conditions [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, 8: 610529.

(收稿日期:2024-05-10;修回日期:2024-06-06)

(本文编辑:彭羽)