

人工智能在心血管疾病风险分层与个体化治疗中的应用进展

朱雯萱 金铨顺

(延边大学附属医院 吉林延吉 133000)

【摘要】心血管疾病是全球首位死亡原因，其管理长期面临着风险分层工具精度不足与“一刀切”治疗策略效能有限的困境。人工智能（AI）技术的介入正在推动这一领域发生根本性转变：从粗放的群体化风险判断迈向精准的个体化动态管理。本文系统综述了AI在心血管疾病风险分层与个体化治疗中的最新进展。在风险分层层面，深度学习模型已能整合影像、电生理、多组学等多模态数据，超越传统评分体系的性能极限；在个体化治疗层面，AI通过识别精细表型、构建“数字孪生”模拟干预效果，正在重塑抗栓策略、导管消融及血运重建等临床决策路径。然而，技术繁荣的背后隐含着模型泛化能力不足与“黑箱”困境等深层挑战。本文认为，从“预测”到“干预”的范式跨越，关键在于发展可解释AI与建立新型人机协同机制，这将是AI真正融入心血管临床实践的前提。

【关键词】人工智能；心血管疾病；风险分层；个体化治疗；可解释性

Advances in the Application of Artificial Intelligence for Cardiovascular Disease Risk Stratification and Personalized Treatment

Zhu Wenxuan Jin Xuan shun

(Yanbian University Affiliated Hospital, Yanji, Jilin 133000)

[Abstract] Cardiovascular diseases rank as the leading cause of death globally, and their management has long faced challenges such as insufficient accuracy of risk stratification tools and limited efficacy of "one-size-fits-all" treatment strategies. The integration of artificial intelligence (AI) technology is driving a fundamental transformation in this field: shifting from broad population-based risk assessment to precise, individualized dynamic management. This article provides a systematic review of the latest advancements in AI applications for cardiovascular disease risk stratification and personalized treatment. At the risk stratification level, deep learning models can now integrate multimodal data—including imaging, electrophysiological, and multi-omics data—exceeding the performance limitations of traditional scoring systems. At the personalized treatment level, AI is reshaping clinical decision pathways for antithrombotic strategies, catheter ablation, and revascularization by identifying fine phenotypes and constructing "digital twin" models to simulate intervention outcomes. However, behind this technological prosperity lie profound challenges, such as inadequate model generalization capabilities and the "black-box" dilemma. This paper argues that the paradigm shift from "prediction" to "intervention" hinges on developing interpretable AI systems and establishing novel human-machine collaboration mechanisms, which are prerequisites for AI's genuine integration into cardiovascular clinical practice.

[Key words] Artificial Intelligence; Cardiovascular Diseases; Risk Stratification; Personalized Therapy; Explanability

1.引言

心血管疾病（CVD）每年夺去约1790万人的生命，是全球健康的头号威胁。尽管他汀、抗栓药物与介入技术极大改善了预后，但临床实践中两个根本性问题始终悬而未决：其一，传统风险评分（如Framingham风险评分）在人群水平表现尚可，却难以精准识别出即将发生事件的个体；其二，指南导向的标准化治疗面对患者的异质性反应时显得笨拙无力，为何相同基线风险的患者对同一种药物或手术的反应截然不同？

这正是AI介入的价值支点。与传统统计学方法不同，机器学习与深度学习擅长在高维、异构的数据中发现非线性关联，而这恰恰是心血管疾病管理的核心难点：一个患者的

风险信号隐匿于影像、心电图、基因组和可穿戴设备数据的复杂交织中，传统的线性模型难以捕捉。近年来，AI在心房颤动（AF）、心力衰竭（HF）、冠状动脉疾病（CAD）等领域的研究呈指数级增长，但多数综述停留在罗列应用场景的层面，未能揭示技术演进的内在逻辑。

本文的核心论点在于：AI正在推动心血管疾病管理从“风险分层”到“个体化治疗”的范式跨越，而这一跨越的关键桥梁是可解释人工智能（XAI）。没有解释，风险预测只是统计警示，无法转化为治疗决策；有了解释，算法才能从辅助诊断的工具上升为临床推理的伙伴。本文将首先梳理AI在风险分层中的技术进展与效能证据，继而分析其在个体化治疗中的前沿探索，最后聚焦于可解释性与人机协同这一核心议题。

2. AI 赋能下的心血管风险分层：超越传统范式

2.1 传统风险评分的固有局限

过去半个世纪，心血管风险分层主要依赖逻辑回归构建的评分体系，如 Framingham 风险评分、SCORE 评分等。这些工具简明、可手工计算，但其局限性同样显著：一是假设危险因素与结局呈线性关系，忽略交互作用与阈值效应；二是依赖预先选定的有限变量，难以纳入影像、功能或生物标志物等复杂信息；三是在不同人群中的校准度下降明显。一项纳入 45 项研究的 Meta 分析显示，传统方法对 CAD 的诊断敏感性约为 75%，在真实世界中漏诊率偏高。

2.2 多模态数据融合与深度学习突破

AI 的介入改变了这一格局。深度学习模型，尤其是卷积神经网络 (CNN)，能够从原始数据中自动学习特征表示，无需人工预设变量。在 CAD 风险分层中，融合临床变量、心电图 (ECG)、冠状动脉 CT 血管成像 (CCTA) 和心肌灌注影像的多模态模型，其曲线下面积 (AUC) 可超过 0.90，显著优于传统评分。其核心优势在于捕获了传统方法难以量化的信息血管壁的细微钙化模式、心肌纹理的异常、心电信号中隐匿的形态学特征。

在心衰领域，AI 模型整合电子健康记录、超声心动图参数和血浆生物标志物，能够提前识别高风险亚群。一项 Meta 分析报道，AI 驱动的风险分层模型与 5 年全因死亡率降低 15% 相关 (HR=0.72)，这并非 AI 直接改善结局，而是通过更精准地识别出需要强化干预的患者，使资源得以合理配置。在大规模健康系统数据中，AI 预测不良事件的算法使 30 天再入院率相对降低 20%。

房颤的风险预测是另一典型案例。深度学习模型仅从窦性心律 ECG 中即可预测未来发展为房颤的风险，其 AUC 约为 0.87。这意味着 AI 能够捕捉到肉眼无法识别的、反映心房电重构的早期信号，将风险识别的窗口大幅前移。

2.3 效能证据的再审视

然而，峰值性能不等于临床实效。上述令人振奋的 AUC 值大多来自单中心回顾性数据，当模型部署到外部人群或真实临床流程中时，性能衰减普遍存在。一项系统评价明确指出，AI 模型在 >75 岁老年患者中的 AUC 下降达 0.08-0.12。这是因为训练数据往往来自学术医疗中心，对基层医疗机构、不同种族或年龄极端群体的代表性不足。因此，当前对 AI 风险分层效能的合理解读应是：在受控条件下优于传统方法，但泛化能力尚待大规模前瞻性验证。

3. 从预测到干预：个体化治疗的 AI 路径

如果说风险分层的目标是回答“谁会生病”，那么个体化治疗要解决的是“该患者应接受何种治疗”。后者对算法

的要求更高不仅需要预测，更需要指导行动。

3.1 表型驱动精准治疗策略

房颤管理是体现这一转变的典型领域。“一刀切”的抗凝与节律控制策略在真实世界中效果参差，根源在于房颤并非单一疾病，而是一组异质性综合征。机器学习聚类分析在多个国际队列中识别出三组核心表型：低风险/年轻型、动脉粥样硬化/高心血管风险型、以及老年/多病共存型。不同表型对口服抗凝药、导管消融或左心耳封堵的获益-风险比存在系统差异。这种数据驱动的表型分类为临床决策提供了超越传统 CHA₂DS₂-VASc 评分的精细化依据。

在心衰领域，同样的逻辑正在展开。射血分数保留的心衰 (HFpEF) 尤其异质，传统分类难以指导治疗。无监督学习已识别出具有不同临床轨迹和预后特征的 HFpEF 亚型，为精准靶向特定病理生理通路 (如炎症、纤维化或代谢紊乱) 奠定了基础。

3.2 数字孪生与治疗模拟

心血管干预的决策往往面临权衡支架还是搭桥？抗血小板单药还是双联？消融边界如何设定？AI 正在发展一种极具颠覆性的方法：心脏“数字孪生”。通过整合患者的心脏解剖模型、电生理特性和血流动力学参数，深度学习方法可以构建个体的虚拟心脏，在手术前模拟不同消融路径或起搏方案的疗效，而非依赖医生的经验试错。这种“先模拟、后干预”的策略有望将复杂心律失常的治疗从反应性修复提升至预测性规划。

3.3 药物选择的智能化

在抗栓治疗领域，传统方法通过 HAS-BLED、PRECISE-DAPT 等评分辅助临床判断，但其区分能力有限。机器学习模型可整合遗传信息 (如 CYP2C19 基因型)、肾功能、年龄和合并用药等多维特征，预测个体患者的缺血与出血风险曲线，从而指导 P2Y₁₂ 抑制剂的选择与疗程。初步证据显示，这种药物基因组学模型可将抗血小板治疗的并发症减少约 37%。类似探索正在他汀类药物不耐受、抗心律失常药物剂量优化等领域展开。

4. 挑战与反思：可解释性与人机协同

4.1 “黑箱”困境与可解释 AI 的必要性

AI 在心血管医学中的最大阻力并非技术性能，而是信任。当一个深度神经网络建议某种治疗策略时，临床医生有理由追问：为什么？如果无法回答这个问题，AI 的输出只能是“建议”，难以成为“决策依据”。更严重的是，缺乏解释意味着无法识别算法的错误模式当模型犯错时，它可能以难以预料的方式犯错，这对临床安全构成重大风险。

可解释 AI (XAI) 正是应对这一挑战的技术回应。通过注意力机制、Shapley 值、局部可解释模型等工具，XAI 能

够标注出哪些输入特征（如 ECG 的特定导联、影像的特定区域）驱动了模型的输出。在 CAD 风险分层中，XAI 已被用于揭示模型判断冠脉狭窄时关注的解剖标志，帮助临床医生验证其推理是否符合病理生理学常识。这种“人机对账”机制是建立算法信任的基础。

4.2 临床整合的现实壁垒

即便模型表现优异且具备可解释性，将其嵌入临床 workflow 仍面临重重障碍。首先是数据层面的碎片化 AI 模型通常需要标准化的输入格式，但不同医疗机构的影像协议、EHR 结构和编码体系各异，导致模型迁移后性能“断崖式下跌”。其次是伦理与法律层面的不确定性：当 AI 辅助的决策导致不良结局时，责任归属如何界定？是开具处方的医生、部署 AI 的医院，还是算法的开发者？目前尚无共识。第三是监管滞后，多数 AI 模型作为“软件即医疗设备”的审批路径尚不清晰，随机对照试验证据稀缺。

4.3 协同而非替代：重新定位人机关系

上述挑战指向一个根本性认识：AI 在心血管医学中的角色是增强而非替代。人机协同的“混合智能”模式日益获得认可 AI 负责处理高维数据、识别隐匿模式、量化不确定性，而临床医生负责整合情境信息（患者的价值观、社会经济因素、罕见合并症等）并做出最终决策。在这种框架下，AI 不是“黑箱权威”，而是“认知外挂”：它扩展了医生的

感知边界，但判断权仍归于人类。

5. 结论与展望

AI 正在重塑心血管疾病管理的底层逻辑：从基于有限变量的群体化风险评估，转向融合多模态数据的个体化动态评估；从遵循指南的标准化治疗，转向表型驱动、模拟优化的精准干预。这一范式转变的核心驱动力是深度学习的表征学习能力与可解释 AI 的透明化努力。

然而，从技术成熟到临床普及，仍需跨越三重关卡：一是外部验证与实时性能监控，确保模型在不同人群和真实 workflow 中的稳健性；二是伦理与法律框架的构建，明确数据隐私、算法公平性与责任归属；三是医生培训与认知更新，使临床工作者具备审慎使用 AI 工具的能力。

展望未来，AI 在心血管医学中最激动人心的应用或许尚未到来。随着多组学数据、可穿戴设备实时流数据和环境暴露信息的深度整合，“数字心脏”将不仅是一个诊断工具，更成为一个持续学习、动态演化的健康伙伴。但无论技术如何演进，一个原则不会改变：AI 的终极价值不在于它有多智能，而在于它能否帮助医生更好地理解患者、更明智地做出决策。

参考文献：

- [1]Artificial Intelligence in Cerebrovascular Disease Management: A Comprehensive Review of Risk Prediction, Diagnosis, Therapeutic Optimization, and Clinical Translation. *Vascular Health and Risk Management*, 2025, 21: 949–964.
- [2]Jankauskas SS, Varzideh F, Kansakar U, Santulli G. Artificial Intelligence in Cardiovascular Medicine: A Giant Step in Personalized Medicine? *Journal of Personalized Medicine*, 2026, 16(4): 192.
- [3]Alyacoub R. Artificial intelligence in heart failure – a comprehensive literature review. *Cardiology Journal*, 2025.
- [4]A narrative review on the use of artificial intelligence in cardiovascular medicine. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, 2026.
- [5]Woodman RJ, et al. Clinical phenotypes of atrial fibrillation: A review of machine learning applications in personalized treatment. *JRSM Cardiovascular Disease*, 2025.
- [6]Varzideh F, Mone P, Kansakar U, et al. Artificial Intelligence in Cardiovascular Medicine: Focus on Hypertension. *Hypertension*, 2026.
- [7]Henna F, et al. Narrative Review on Explainable Artificial Intelligence for Multimodal Risk Stratification in Coronary Artery Disease. *Cardiology in Review*, 2025.
- [8]Impact of Artificial Intelligence on Cardiovascular Disease Diagnosis, Risk Assessment, and Treatment: A Meta-Analysis of 45 Studies. *Circulation*, 2025, 152(Suppl_3).
- [9]Greco A, et al. Personalized Treatment of Patients with Coronary Artery Disease: The Value and Limitations of Predictive Models. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 2025.
- [10]Tang YD, et al. Integrating multimodal intelligence in heart failure: AI-driven risk prediction, precision diagnosis, phenotyping, personalized treatment, and prognosis. *Chinese Medical Journal*, 2026.