

本文引用: 张悦, 谭驰宇, 王宇歌, 等. 机器学习在癌症患者冠心病诊疗中的典型应用[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(1): 1-8. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.01.001.

[文章编号] 1007-3949(2026)34-01-0001-07

· 专家论坛 ·

机器学习在癌症患者冠心病诊疗中的典型应用

张悦¹, 谭驰宇¹, 王宇歌¹, 徐理理¹, 段舒¹, 马嘉洁¹, 芦美鑫¹, 徐进², 王哲¹

1. 中国医科大学附属盛京医院病理科, 2. 沈阳市第六人民医院普外科, 辽宁省沈阳市 110006

[专家介绍] 王哲, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事干细胞与再生医学研究, 主持国家级及省级课题 4 项, 发表研究型论文 20 篇。现任中国医科大学附属盛京医院病理科副主任、分子病理实验室负责人。担任国际动脉粥样硬化学会中国分会理事, 中华医学会病理学分会心血管学组委员, 辽宁省医学会病理学分会副主任委员。

[摘要] 随着癌症生存率的显著提高, 冠心病已成为癌症长期幸存者的主要非癌症死因。癌症患者相较于普通患者, 面临着特定的风险挑战, 包括抗肿瘤治疗引起的心血管毒性、临床表现的非典型性, 以及传统风险评估工具在适用性上的局限性。这些因素共同导致癌症患者的冠心病诊疗过程变得尤为复杂, 具有挑战性。近年来, 机器学习 (ML) 在医学领域迅速发展, 为优化癌症患者冠心病的诊疗过程, 研究者们开发了大量整合临床特征、影像学信息和实验室检查等多模态信息的 ML 模型。ML 的应用不仅提升了癌症患者冠心病的风险预测能力和早期筛查的敏感度, 避免了传统诊断模式中的主观误差, 还能指导患者进行个性化治疗, 改善患者预后。该文通过总结 ML 在冠心病的风险预测、诊断优化和治疗决策中的典型应用, 探讨 ML 在冠心病诊疗中的研究现状和所面临的挑战, 并展望其未来的临床应用趋势。

[关键词] 冠心病; 机器学习; 癌症; 肿瘤心脏病学

[中图分类号] R5

[文献标识码] A



Typical application of machine learning in the diagnosis and treatment of coronary heart disease in cancer patients

ZHANG Yue¹, TAN Chiyu¹, WANG Yuge¹, XU Chengcheng¹, DUAN Shu¹, MA Jiajie¹, LU Meixin¹, XU Jin², WANG Zhe¹

1. Pathology Department of Shengjing Hospital Affiliated to China Medical University, 2. General Surgery Department of Shenyang Sixth People's Hospital, Shenyang, Liaoning 110006, China

[ABSTRACT] With the significant improvement of cancer survival rate, coronary heart disease has become the main non-cancer cause of death in long-term cancer survivors. Cancer patients have specific risk challenges compared with ordinary patients, including cardiovascular toxicity caused by anti-tumor therapy, atypical clinical manifestations, and limitations in the applicability of traditional risk assessment tools. This makes the diagnosis and treatment of coronary heart disease in cancer patients challenging. In recent years, machine learning (ML) has developed rapidly in the medical field. In order to optimize the diagnosis and treatment process of coronary heart disease in cancer patients, researchers have developed a large number of ML models that integrate multimodal information such as clinical features, imaging information and laboratory examination. The application of ML improves the predictive ability of coronary heart disease risk and the sensitivity of early screening in cancer patients, and avoids subjective errors in traditional diagnostic models. It can also guide doctors to implement personalized treatment for patients and improve their prognosis. This review summarizes the typical application of ML in the diagnosis and treatment of coronary heart disease, discusses the research status and challen-

[收稿日期] 2025-03-04

[修回日期] 2025-04-29

[基金项目] 辽宁省科技计划联合计划项目(应用基础研究项目)(2023JH2/101700170); 中国医科大学高质量发展科技资金项目(2023JH2/20200095)

[作者简介] 张悦, 硕士研究生, 研究方向为机器学习在心血管疾病中的应用, E-mail: zzyyxs@163.com。通信作者王哲, 博士, 教授, 研究方向为心血管疾病的发病机制及诊疗, E-mail: wangz@sj-hospital.org。

ges of ML in the diagnosis and treatment of coronary heart disease, and looks forward to its future clinical application trend.

[KEY WORDS] coronary heart disease; machine learning; cancer; onco-cardiology

在我国,心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)的发病率和死亡率均居首位,是严重危害人类健康的常见疾病,而冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)是最常见的CVD之一,并且年患病率和死亡率依然呈现持续上升的趋势^[1]。癌症是继CVD之后的第二大死亡原因。2022年,我国癌症新发病例数约为482.47万例,新增癌症死亡例数约257.42万例^[2]。肿瘤心脏病学作为新兴交叉学科,主要研究癌症与CVD的相互作用,尤其关注癌症治疗相关心血管毒性的机制、风险预测及管理策略。随着癌症生存率的显著提高,心血管事件已成为癌症长期幸存者的首要非癌症死因,约50%的癌症患者因CVD死亡风险较普通人群增加2~6倍,其中冠心病是最常见的并发症和患者非癌症死亡的主要原因^[3]。

大量证据表明,癌症与CVD有多个共同的风险因素,例如肥胖、高血压、高血糖、高血脂等,并且两者存在显著的相关性^[4]。此外,癌症治疗也会增加患CVD的风险,影响患者的后续治疗和生存^[5]。研究表明,放疗及化疗(如蒽环类、抗血管生成药物)可通过内皮损伤、氧化应激及代谢重编程等途径诱发冠状动脉病变、心肌纤维化及心功能不全,而一些炎症因子和肿瘤源性代谢物也会进一步加剧心脏损伤^[6]。所以,尽早对癌症患者开展CVD风险评估、干预、诊断和治疗十分重要。近年来,机器学习(machine learning, ML)在医学领域发展迅速,它在冠心病的辅助诊断、机制分析和个性化治疗中发挥关键作用。本文将讨论ML在癌症相关冠心病诊疗中的典型应用,并分析其研究进展、临床应用趋势及面临的挑战。

1 癌症患者冠心病诊疗的特殊性

癌症患者由于共同的风险因素和癌症治疗,面临较高的冠心病风险,癌症幸存者整体风险较普通人群高37%^[7]。肺癌患者、结直肠癌患者、血液及淋巴系统恶性肿瘤患者、乳腺癌患者,以及接受雄激素剥夺治疗的前列腺癌患者,其冠心病风险显著增加,风险比介于1.14~1.92^[7-9]。同时,癌症患者普遍存在冠心病风险因素评估与干预不足的问题。例如,血脂异常是冠心病的重要危险因素,而他汀类药物不仅能有效降低胆固醇水平,还具有抗炎和

抗肿瘤作用。然而,Shin等^[10]的研究发现,尽管37.5%的癌症幸存者存在血脂异常,但仅有12.4%的患者接受了降脂药物治疗。癌症还可通过炎症反应、代谢重编程等机制影响心肌代谢,从而增加CVD的风险。研究表明,炎症因子白细胞介素1 β 、白细胞介素6和肿瘤坏死因子 α 可激活信号通路,影响心肌细胞的代谢和功能,导致心肌细胞凋亡和心肌纤维化^[6]。此外,癌症与冠心病存在部分相似症状。癌症和冠心病患者都可能因累及循环系统、代谢异常或治疗不良反应,出现胸痛、心悸、咳嗽、呼吸困难、乏力、恶心等临床表现。癌症患者还存在身体素质差、血小板减少、高出血和高血栓形成风险增加等问题,使得临床医生管理合并冠心病的癌症患者更具挑战性^[11]。癌症治疗也可显著增加冠心病风险,接受胸部放疗的癌症患者,心脏受辐射剂量的增加与发生冠状动脉缺血的风险增加呈线性关系。使用化疗药物也可能导致患者并发CVD的风险增高,如5-氟尿嘧啶可引起冠状动脉痉挛^[4,9,12]。

综上所述,癌症患者相较普通患者存在抗肿瘤治疗相关心血管毒性、临床表现不典型以及传统风险评估工具适用性受限等问题,这些都使得医生对患者的诊断和治疗变得更加复杂。因此,对于患有冠心病的癌症患者,在诊疗过程中应开展多学科团队合作,全面评估各项风险因素及治疗可能引发的心血管毒性,针对患者存在的危险因素进行干预,并借助ML技术为患者选择合适的个性化治疗方案。

2 机器学习在冠心病诊疗中的应用

近年来,ML在冠心病诊疗中展现出显著潜力。在CVD的研究中,冠心病的进展是由患者性格、生活习惯、遗传和环境等多种因素相互作用的结果。ML可以整合多组学数据(如基因组学、蛋白质组学、影像组学及转录组学等)建立不同的数据模型,在冠心病的风险预测、辅助诊断、疾病分型和预后预测等方面起到作用。ML在冠心病诊疗中常用的算法模型包括传统ML模型、集成学习模型、深度学习(deep learning, DL)模型和其他模型(表1)。

通过ML技术,冠心病的诊疗有了新的应用趋势:(1)诊断模型升级:从传统统计方法转向DL模

型,可以自动提取影像特征进行分析;(2)诊疗数据整合:整合影像检查、基因检测和临床数据,从单一模态向多模态数据融合发展;(3)治疗优化:从群体

治疗方案向个性化精准诊疗转变,推动冠心病诊疗进入精准医学时代。

表 1. ML 在冠心病诊疗中常用的算法模型

Table 1. Commonly used algorithm models of ML in the diagnosis and treatment of coronary heart disease

算法类别	算法模型	在冠心病诊疗中的应用
传统 ML 模型	SVM	影像分割和风险预测 ^[13-14]
	Logistic regression	风险预测 ^[13,15]
集成学习模型	Random forest	通过多组学数据整合、临床特征筛选进行风险预测和辅助诊断 ^[16-17]
	GBDT	可分析多组学数据进行风险预测和辅助诊断 ^[18]
DL 模型	CNN	分析影像数据,进行风险预测和辅助诊断 ^[14,19]
	DNN	
	RNN 和 LSTM	时序数据分析,通过动态建模进行纵向风险评估、辅助诊断和预后预测 ^[14]
其他模型	CoxPH	结合临床和影像数据预测生存结局 ^[18]
	遗传-表观遗传联合模型	整合基因和甲基化数据,提升风险预测特异性、辅助诊断和治疗 ^[20-22]
	GNN	通过知识图谱整合冠心病病理机制,辅助个性化治疗推荐 ^[23]

注:SVM:支持向量机(support vector machine);GBDT:梯度提升决策树(gradient boosting decision tree);CNN:卷积神经网络(convolutional neural network);LSTM:长短期记忆网络(long short-term memory network);RNN:循环神经网络(recurrent neural network);DNN:深度神经网络(deep neural network);CoxPH:Cox 比例风险模型(Cox proportional hazards);GNN:图神经网络(graph neural network)。

3 机器学习在共病患者诊疗过程中的具体应用

随着癌症特异性死亡率的下降和幸存人群的老龄化,冠心病和癌症共病患者数量不断增加。因此,尽早识别可能因冠心病死亡的高风险癌症患者并进行早期干预变得尤为重要。在医疗大数据应用的不断发展下,基于临床特征、影像学信息和实验室检查的 ML 模型已广泛用于冠心病的风险预测、辅助诊断和治疗指导。

3.1 基于机器学习的风险分层与早期预警

在心血管风险评估中,传统的评分系统,如动脉粥样硬化性心血管疾病(atherosclerotic cardiovascular disease, ASCVD)评分和冠状动脉钙化评分(coronary artery calcium score, CACS),多仅依据患者的胆固醇、血压、血糖等基础临床资料进行风险预测,存在一定局限性。这些传统方法通常未充分考虑癌症特异性因素,缺乏对影像学资料的分析,导致预测准确性不足^[24]。相比之下,ML 具有显著的优势,ML 可以利用临床数据和心血管影像学信息,建立个体化动态数据风险预测模型,解决了传统模型在癌症患者中因忽略癌症治疗特异性和患者治疗的动态变化导致的预测偏差。

3.1.1 临床与电子健康记录数据 ML 相较于

传统预测模型,能够同时整合实验室指标、用药记录等结构化数据,患者病历、影像报告等非结构化数据,以及就诊记录等时序信息。Zhou 等^[25]利用乳腺癌患者的电子健康数据,开发了 LSTM 模型,对乳腺癌患者进行包括冠心病在内的 6 种心脏病进行风险预测,ML 模型的曲线下面积(area under the curve, AUC)达 0.95。Stabellini 等^[26]开发了针对乳腺癌、结直肠癌或肺癌患者癌症特异性冠心病风险评分的 ML 模型,与传统评分相比 AUC 提升幅度最高达 0.31。这些研究都表明,ML 模型可以整合传统静态模型容易忽略的癌症特异性信息,从而进行早期预测干预。

3.1.2 影像数据 研究证明,基于冠状动脉 CT-血流储备分数(CT-fractional flow reserve, CT-FFR)的 ML 模型能够无创评估冠状动脉,其预测准确性显著高于传统冠状动脉计算机断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)。通过 ML 优化的 CT-FFR 算法,可自动提取相关数据并预测患有冠心病的肺癌患者在围术期发生主要心血管不良事件(major adverse cardiac events, MACE)的风险,CT-FFR 值 ≤ 0.8 是围术期 MACE 的独立风险因素^[27]。Atkins 等^[28]运用 DL 算法自动量化接受胸部放疗的晚期肺癌患者的 CACS 值,发现 DL-CACS 升高与全因死亡率和 MACE 升高相关。在乳腺癌

患者中也观察到了类似现象, CACS 值 >400 分的患者患冠心病的风险增加 3.4 倍, 接受放疗的患者患冠心病的风险要高于未接受放疗的患者, 并且与放疗剂量呈正相关^[29-31]。此外, Ruggirello 团队^[32]在使用软件自动计算 CACS 时发现, 女性肺癌患者的 CACS 显著低于男性, 提示肺癌全因死亡率和发生 MACE 的风险可能存在性别差异。自动化计算 CACS 不仅为癌症患者的冠心病风险分层提供了客观指标, 提升了工作效率, 还能动态监测动脉粥样硬化的进展, 起到早期预警的作用。还有研究表明, 通过 ML 模型对磁共振成像进行分析, 结果显示神经胶质瘤的遗传变异可能在一定程度上增加患冠心病的风险^[33]。

ML 在癌症患者冠心病风险预测中弥补了传统风险评分的不足, 但也存在一定的局限性: 多数研究仅依赖单一数据源, 例如电子健康记录数据或影像数据, 缺乏对基因组学、代谢组学等多组学数据的整合。此外, 当前研究还存在数据质量与样本不平衡问题, 共病组样本量远小于非共病组, 癌症患者的医疗数据多分散, 相关癌症病史存在差异, 模型泛化能力较弱。未来应整合患者的多模态数据, 进行动态建模, 针对癌症患者的异质性, 开发个性化预测框架。

3.2 机器学习在影像学诊断中的优化应用

影像组学 ML 模型在 X 射线、CT 和 CTA 等影像分析中展现出其准确性和高效性^[34]。影像组学最初主要应用于肿瘤领域, 现已扩展至非肿瘤疾病。在 CVD 中, 该技术常用于分析冠状动脉斑块的特征, 并预测心血管事件的风险。Ahn 等^[35]建立了基于乳腺 X 射线的 CNN 模型, 用于预测 CACS, 其性能与传统的心血管风险评分相当。另外, 还有研究表明接受乳腺 X 射线筛查的女性群体中, 基于 DL-CTA 评估的冠心病严重程度与乳腺 X 射线检测到的乳腺动脉钙化显著关联^[36]。这些研究提示, 乳腺 X 射线不仅可以作为乳腺癌筛查, 还可作为预测该人群冠状动脉病变程度的辅助诊断依据, 为冠心病的无创筛查提供了新思路。此外, 在肺癌的早期诊断中, ML 也常用于对 CT 影像和临床数据的分析。CNN 模型可自动检测低剂量 CT 影像中的肺结节并评估冠状动脉钙化程度, 有助于医生对肺癌和冠心病做出早期诊断, 其中对冠状动脉钙化检测的敏感度和特异度分别达 92.9% 和 96.0%, 有效改善了患者的发病率和死亡率^[37]。Tanabe 等^[38]利用 CNN 对用于筛查肺癌的 CT 图像数据进行核转化, 在定量冠状动脉钙化评估中展现出良好的一致性,

有助于提升 CT 定量测量的准确性和可靠性。

相较于传统的诊断手段, ML 能够利用现有的癌症筛查影像进行深入分析, 具备无创性、快速性和高敏感度等多重优势。然而, 基于影像组学的 ML 模型在实际应用中仍面临显著挑战: 首先, ML 尤其是 DL, 通常需要大量标注数据来训练模型, 以实现良好的性能, 这导致时间和人力成本居高不下。其次, 分析医学影像信息依赖于高性能计算资源及复杂的算法优化, 这对临床应用构成了技术壁垒。此外, 模型的泛化能力不足, 不同影像设备或参数设置所导致的图像差异会直接影响模型表现, 这一问题需通过跨中心数据训练或标准化预处理来加以改善^[38]。这些因素共同制约了影像组学 ML 模型在临床中的实际应用。

3.3 机器学习辅助的治疗决策优化

癌症治疗本身可能增加冠心病的风险, 例如, 放疗、抗代谢药物、血管内皮生长因子受体抑制剂和免疫检查点抑制剂等疗法, 在提升癌症治疗效果的同时, 也可能引发心血管事件^[4]。因此, 癌症患者在治疗期间对于心脏的保护至关重要, ML 模型可以通过多参数分析识别高风险患者, 优化治疗策略。研究发现, 非小细胞肺癌患者在接受左前降支 ≥ 15 Gy 的放疗剂量时, 与包括冠心病在内的 MACE 的发生显著相关, 且在无基础冠心病的患者中, 这一风险增加更为显著^[39]。在 ML 对心血管影像的分析中, 图像分割作为关键环节, 可以精准区分心肌组织的正常区域和病变区域。对采取放疗的非小细胞肺癌患者, 使用基于 CT 影像信息 DL 模型可以自动分割心脏基底结构并评估心底部最大放疗剂量^[40]。适用于临床的 MACE 风险预测模型, 整合了冠心病、高血压及左前降支接受 ≥ 15 Gy 照射的体积百分比作为主要预测因子, 能够量化 MACE 风险, 并为个体化剂量约束提供科学依据。评分超过 5 分的患者, 建议通知临床医生进行随访, 优化心血管治疗策略, 或考虑转诊^[41]。基于全因死亡率的预测模型可识别高危患者, 也推荐临床优先选择心脏保护性化疗方案^[42]。Walls 等^[40]构建了 DL 模型, 验证了心脏基底剂量与生存率之间存在显著相关性, 建议将最大放疗剂量控制在 54.5 Gy 以内, 以降低心脏毒性。在乳腺癌和淋巴瘤患者中也有类似研究, 心脏平均剂量 >3 Gy 的乳腺癌患者, 10 年内因心脏疾病死亡的风险显著升高^[43-44]。此外, 乳腺癌患者接受蒽环类化疗药物也与冠心病的风险增高显著相关^[29]。临床医生对弥漫性大 B 细胞淋巴瘤患者进行蒽环类药物化疗前, 可以通过胸部 CT

自动计算的 CACS 识别高风险患者,实施心血管保护策略^[45]。上述研究显示,通过应用 ML 技术,能够有效评估癌症患者在接受化疗过程中引发的冠心病风险,从而为患者的个性化用药和安全性治疗提供科学依据。因此,医生在制定临床治疗方案时,应构建肿瘤-心脏联合评估机制,通过个性化治疗方案的设计与动态心血管监测,实现抗癌疗效与心血管保护的双重优化。

4 总结与展望

近年来,随着癌症治疗手段的不断进步,患者生存期显著延长,CVD 成为癌症幸存者的主要非癌症死亡原因之一。CVD 与癌症在流行病学、危险因素及发病机制等多个方面存在显著相关性,这使得癌症患者罹患冠心病的风险显著增加。癌症患者常因肿瘤本身及相关治疗而出现与冠心病相似的临床症状,这无疑增加了癌症患者早期冠心病诊断的难度。此外,在治疗过程中,癌症与冠心病的治疗策略可能存在冲突,进而影响患者的治疗效果和预后。因此,针对癌症与冠心病共病患者的诊疗显得尤为困难。随着人工智能的发展,基于临床信息和各组学数据的 ML 模型可以在癌症患者的冠心病诊疗中发挥重要作用。在冠心病的风险预测方面,ML 能够整合癌症治疗的特异性信息,构建个体化的动态数据风险预测模型,从而推动冠心病群体风险评估向个体化精准预测的转型。在辅助诊断方面,相较于传统诊断手段,ML 展现出无创、快速和高敏感度的显著优势。在治疗层面,ML 可为医生提供决策支持,有效提升诊疗效率和准确性,进而改善患者的预后。

不可否认,ML 在癌症患者冠心病诊疗方面取得了显著进展,但同时也遭遇诸多挑战。目前的研究普遍存在样本多样性不足和模型泛化能力较弱的问题,不同癌症类型对冠心病诊疗的影响因素各异。此外,大多数研究集中于肺癌和乳腺癌患者,仅有少数文献涉及前列腺癌、结直肠癌和淋巴瘤等。模型的外部检验能力同样显得不足,大多数研究缺乏独立的外部验证。此外,治疗过程中对动态指标的监测存在较大难度,进而频繁出现数据缺失的情况。针对上述问题,未来研究应涵盖更多样化的人群和癌症类型,整合实时生物标志物与治疗数据,延长随访时间,积极推动多中心前瞻性研究,以优化癌症患者的冠心病诊疗流程。同时,将临床指南融入模型设计,提升模型的解释性。此外,还需完善患者数据隐私保护机制及相关伦理审查流程,

确保模型的合规应用。相信通过 ML 与多模态数据的深度融合,癌症和冠心病共病患者的个体化精准治疗将迎来新的发展机遇。

[参考文献]

- [1] 国家心血管病中心,中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2023 概要[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(7): 625-660.
National Center for Cardiovascular Diseases, the Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2023: an updated summary [J]. Chin Circ J, 2024, 39(7): 625-660.
- [2] 赵文静,尹周一,王裕新,等. 2024 美国癌症统计报告解读及中美癌症流行情况对比[J]. 肿瘤防治研究, 2024, 51(8): 630-641.
ZHAO W J, YIN Z Y, WANG Y X, et al. Interpretation on cancer statistics, 2024 and comparison of cancer prevalence between China and America [J]. Cancer Res Prev Treat, 2024, 51(8): 630-641.
- [3] CHEN C B, DALSANIA R K, HAMAD E A. Healthcare disparities in cardio oncology: patients receive same level of surveillance regardless of race at a safety net hospital [J]. Cardiooncology, 2021, 7(1): 3.
- [4] MANOHAR H, POTTER A S, KOUTROUMPAKIS E, et al. Can we mitigate coronary heart disease risk in patients with cancer? [J]. Curr Atheroscler Rep, 2022, 24(8): 599-606.
- [5] STOLTZFUS K C, ZHANG Y, STURGEON K, et al. Fatal heart disease among cancer patients [J]. Nat Commun, 2020, 11(1): 2011.
- [6] FINKE D, HECKMANN M B, FREY N, et al. Cancer-a major cardiac comorbidity with implications on cardiovascular metabolism [J]. Front Physiol, 2021, 12: 729713.
- [7] FLORIDO R, DAYA N R, NDUMELE C E, et al. Cardiovascular disease risk among cancer survivors: the atherosclerosis risk in communities (ARIC) study [J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 80(1): 22-32.
- [8] MUHANDIRAMGE J, ZALCBERG J R, VAN LONDEN G J, et al. Cardiovascular disease in adult cancer survivors: a review of current evidence, strategies for prevention and management, and future directions for cardio-oncology [J]. Curr Oncol Rep, 2022, 24(11): 1579-1592.
- [9] KIM K, DI GIOVANNA E, JUNG H, et al. Association of metabolic health and obesity with coronary heart disease in adult cancer survivors [J]. Eur J Clin Invest, 2024, 54(5): e14161.
- [10] SHIN S, WOOK SHIN D, YOUNG CHO I, et al. Status of dyslipidemia management and statin undertreatment in

- Korean cancer survivors; a Korean national health and nutrition examination survey study[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2021, 28(8): 864-872.
- [11] 袁祖贻. 2024年《中国慢性冠脉综合征患者诊断及治疗指南》更新要点和建议[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2024, 32(12): 1013-1019.
- YUAN Z Y. Key points and suggestions for the update of 2024 "diagnosis and management guidelines for chronic coronary syndrome patients in China"[J]. *Chin J Arterioscler*, 2024, 32(12): 1013-1019.
- [12] WANG F M, REITER-BRENNAN C, DARDARI Z, et al. Association between coronary artery calcium and cardiovascular disease as a supporting cause in cancer: The CAC consortium[J]. *Am J Prev Cardiol*, 2020, 4: 100119.
- [13] BEUNZA J J, PUERTAS E, GARCÍA-OVEJERO E, et al. Comparison of machine learning algorithms for clinical event prediction (risk of coronary heart disease) [J]. *J Biomed Inform*, 2019, 97: 103257.
- [14] FEDEWA R, PURI R, FLEISCHMAN E, et al. Artificial intelligence in intracoronary imaging [J]. *Curr Cardiol Rep*, 2020, 22(7): 46.
- [15] MA C Y, LUO Y M, ZHANG T Y, et al. Predicting coronary heart disease in Chinese diabetics using machine learning[J]. *Comput Biol Med*, 2024, 169: 107952.
- [16] MIR A, UR REHMAN A, ALI T M, et al. A novel approach for the effective prediction of cardiovascular disease using applied artificial intelligence techniques [J]. *ESC Heart Fail*, 2024, 11(6): 3742-3756.
- [17] FAN R, ZHANG N, YANG L, et al. AI-based prediction for the risk of coronary heart disease among patients with type 2 diabetes mellitus[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 14457.
- [18] KOKKORAKIS M, FOLKERTSMA P, ANAGNOSTAKIS F, et al. Simplifying coronary artery disease risk stratification: development and validation of a questionnaire-based alternative comparable to clinical risk tools[J]. *EBioMedicine*, 2025, 111: 105518.
- [19] KHAN MAMUN M M R, ELFOULY T. Detection of cardiovascular disease from clinical parameters using a one-dimensional convolutional neural network [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(7): 796.
- [20] PHILIBERT R, DOGAN T K, KNIGHT S, et al. Validation of an integrated genetic-epigenetic test for the assessment of coronary heart disease [J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(22): e030934.
- [21] DOGAN M V, KNIGHT S, DOGAN T K, et al. External validation of integrated genetic-epigenetic biomarkers for predicting incident coronary heart disease[J]. *Epigenomics*, 2021, 13(14): 1095-1112.
- [22] FRISVOLD D, DOGAN M, DOGAN T, et al. The use of precision epigenetic methods for the diagnosis and care of stable coronary heart disease reduces healthcare costs[J]. *Adv Ther*, 2024, 41(6): 2367-2380.
- [23] WANG H, ZU Q, LU M, et al. Application of medical knowledge graphs in cardiology and cardiovascular medicine: a brief literature review [J]. *Adv Ther*, 2022, 39(9): 4052-4060.
- [24] TESCHE C, BRANDT V. Calling for a new Framingham: machine learning in cardiovascular risk assessment-the key for improved outcome prediction? [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(3): 626-628.
- [25] ZHOU S, BLAES A, SHENOY C, et al. Risk prediction of heart diseases in patients with breast cancer: a deep learning approach with longitudinal electronic health records data[J]. *iScience*, 2024, 27(7): 110329.
- [26] STABELLINI N, MAKRAM O M, KUNHIRAMAN H H, et al. A novel machine learning-based cancer-specific cardiovascular disease risk score among patients with breast, colorectal, or lung cancer [J]. *JNCI Cancer Spectr*, 2025, 9(1): pka016.
- [27] MA Z, DONG S, OU S, et al. The predictive value of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve for perioperative cardiac events in lung cancer surgery[J]. *Eur J Radiol*, 2024, 180: 111688.
- [28] ATKINS K M, WEISS J, ZELEZNIK R, et al. Elevated coronary artery calcium quantified by a validated deep learning model from lung cancer radiotherapy planning scans predicts mortality [J]. *JCO Clin Cancer Inform*, 2022, 6: e2100095.
- [29] GAL R, VAN VELZEN S G M, HOONING M J, et al. Identification of risk of cardiovascular disease by automatic quantification of coronary artery calcifications on radiotherapy planning CT scans in patients with breast cancer[J]. *JAMA Oncol*, 2021, 7(7): 1024-1032.
- [30] KIM K, CHUNG S Y, OH C, et al. Automated coronary artery calcium scoring in patients with breast cancer to assess the risk of heart disease following adjuvant radiation therapy[J]. *Breast*, 2022, 65: 77-83.
- [31] GERNAAT S A M, VAN VELZEN S G M, KOH V, et al. Automatic quantification of calcifications in the coronary arteries and thoracic aorta on radiotherapy planning CT scans of Western and Asian breast cancer patients [J]. *Radiother Oncol*, 2018, 127(3): 487-492.
- [32] RUGGIRELLO M, VALSECCHI C, LEDDA R E, et al. Long-term outcomes of lung cancer screening in males and females[J]. *Lung Cancer*, 2023, 185: 107387.
- [33] USOVA E I, ALIEVA A S, YAKOVLEV A N, et al. Integrative analysis of multi-omics and genetic approaches-a new level in atherosclerotic cardiovascular risk prediction

- [J]. *Biomolecules*, 2021, 11(11): 1597.
- [34] 陆意歌, 何玮, 林泓言, 等. CT 冠状动脉周围脂肪衰减结合机器学习算法诊断冠心病心肌缺血[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2024, 32(6): 514-520.
- LU Y G, HE W, LIN H Y, et al. CT coronary perivascular fat attenuation combined with machine learning algorithms for diagnosis of myocardial ischemia in coronary heart disease [J]. *Chin J Arterioscler*, 2024, 32(6): 514-520.
- [35] AHN S, CHANG Y, KWON R, et al. Mammography-based deep learning model for coronary artery calcification [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2024, 25(4): 456-466.
- [36] HUANG Z, XIAO J, XIE Y, et al. The correlation of deep learning-based CAD-RADS evaluated by coronary computed tomography angiography with breast arterial calcification on mammography [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 11532.
- [37] CHAMBERLIN J, KOCHER M R, WALTZ J, et al. Automated detection of lung nodules and coronary artery calcium using artificial intelligence on low-dose CT scans for lung cancer screening: accuracy and prognostic value[J]. *BMC Med*, 2021, 19(1): 55.
- [38] TANABE N, KAJI S, SHIMA H, et al. Kernel conversion for robust quantitative measurements of archived chest computed tomography using deep learning-based image-to-image translation[J]. *Front Artif Intell*, 2022, 4: 769557.
- [39] ATKINS K M, CHAUNZWA T L, LAMBA N, et al. Association of left anterior descending coronary artery radiation dose with major adverse cardiac events and mortality in patients with non-small cell lung cancer[J]. *JAMA Oncol*, 2021, 7(2): 206-219.
- [40] WALLS G M, O'CONNOR J, HARBINSON M, et al. The association of incidental radiation dose to the heart base with overall survival and cardiac events after curative-intent radiotherapy for non-small cell lung cancer: results from the NI-HEART study[J]. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 2024, 36(2): 119-127.
- [41] TJONG M C, BITTERMAN D S, BRANTLEY K, et al. Major adverse cardiac event risk prediction model incorporating baseline cardiac disease, hypertension, and logarithmic left anterior descending coronary artery radiation dose in lung cancer (CHyLL) [J]. *Radiother Oncol*, 2022, 169: 105-113.
- [42] CHAO H, SHAN H, HOMAYOUNIEH F, et al. Deep learning predicts cardiovascular disease risks from lung cancer screening low dose computed tomography [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 2963.
- [43] VAN VELZEN S G M, GAL R, TESKE A J, et al. AI-based radiation dose quantification for estimation of heart disease risk in breast cancer survivors after radiation therapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2022, 112(3): 621-632.
- [44] EMAUS M J, IŠGUM I, VAN VELZEN S G M, et al. Bragatston study protocol: a multicentre cohort study on automated quantification of cardiovascular calcifications on radiotherapy planning CT scans for cardiovascular risk prediction in patients with breast cancer[J]. *BMJ Open*, 2019, 9(7): e028752.
- [45] SHEN H, LIAN Y, YIN J, et al. Cardiovascular risk stratification by automatic coronary artery calcium scoring on pretreatment chest computed tomography in diffuse large B-cell lymphoma receiving anthracycline-based chemotherapy: a multicenter study [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(2): e014829.
- (此文编辑 文玉珊)