

心肌梗死的检测研究进展

卢娟*, 陈家可, 卢家乐, 夏娟, 张思佳, 朱雪宁, 戴斌, 吕圆#

湖南环境生物职业技术学院, 湖南 衡阳

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月21日

摘要

心肌梗死是由于冠状动脉血流急剧减少或中断导致的心肌细胞死亡。及时准确的诊断对于改善患者的预后至关重要。本文综述当前用于心梗检测的主要方法和技术, 包括基于心脏信号的诊断方法、生物标志物、新的检测方法和人工智能的应用, 并探讨了未来的发展趋势。

关键词

心肌梗死, 心肌梗死检测, 生物标志物, 人工智能

Research Advances in Detection of Myocardial Infarction

Juan Lu*, Jiake Chen, Jiale Lu, Juan Xia, Sijia Zhang, Xuening Zhu, Bin Dai, Yuan Lyu#

Hunan Environment Biologic Polytechnic, Hengyang Hunan

Received: Mar. 18th, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 21st, 2025

Abstract

Myocardial infarction is caused by sudden reduction or interruption of coronary artery blood flow, leading to myocardial cell death. Timely and accurate diagnosis is crucial for improving patient outcomes. This review summarizes the current primary methods and technologies for myocardial infarction detection, including diagnostic approaches based on cardiac signals, biomarkers, novel measurement techniques, and applications of artificial intelligence (AI). It also discusses future development trends in this field.

Keywords

Myocardial Infarction, Myocardial Infarction Detection, Biomarkers, Artificial Intelligence

*第一作者。

#通讯作者。



1. 引言

随着生活方式的变化和人口老龄化的加剧, 心血管疾病成为全球范围内主要的健康威胁之一, 其中急性心肌梗死是最为严重的一种疾病。2019 冠状病毒疫情已迅速在世界各地蔓延[1]。研究发现, 新冠肺炎直接或间接影响心血管系统, 可能导致急性心肌梗死、心力衰竭和危及生命的心律失常[2][3]。在研究中, 新冠肺炎的患者患急性心肌梗死的风险高于非感染组[4][5]。除此之外, 高血脂、吸烟和精神压力等是心肌梗死的危险因素(见图 1) [6]。心肌梗死发病快, 危害大, 快速且精确地识别心梗的发生对于治疗决策和患者生存率具有决定性意义[7]。心肌梗死目前的检测方法包括基于心脏信号的检测方法和基于分子标记物的方法(见图 1)。本文详细介绍了当前用于心肌梗死的主要检测方法, 包括基于心脏信号的诊断方法、生物标志物、新的检测方法和人工智能的应用, 并讨论了这些技术的最新进展及其在临床实践中的应用。

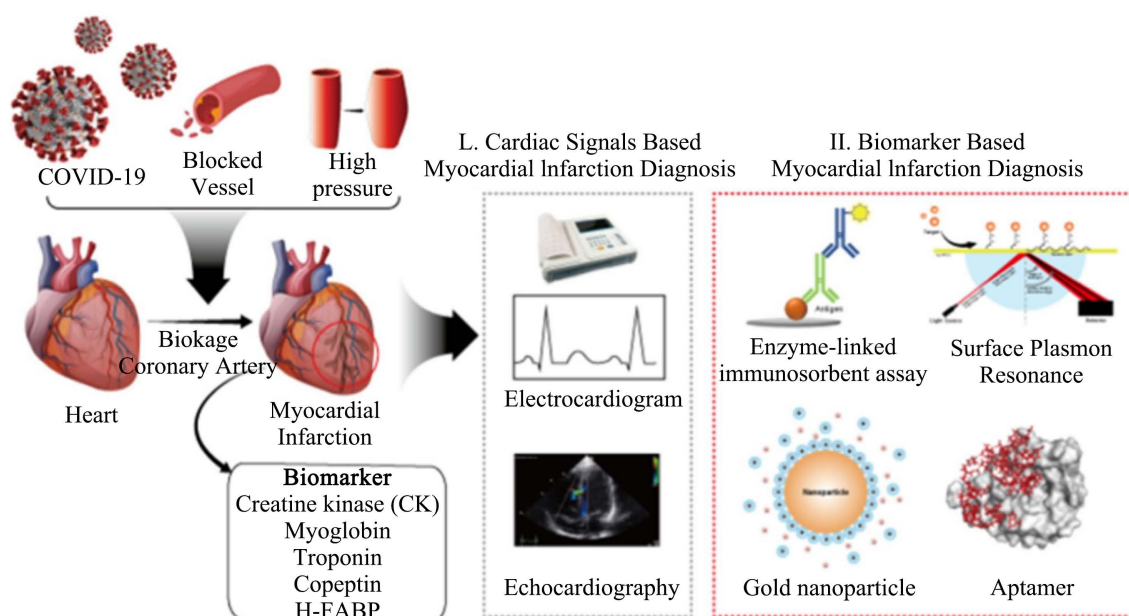


Figure 1. Diagnostic methods for myocardial infarction

图 1. 心肌梗死的诊断方法

2. 基于心脏信号的心肌梗死检测

心肌梗死通常无症状。心电图是评估心脏的最基本和最快速的方法之一。心电图作为心肌梗死诊断的标准程序进行, 成本低、安全性高、报告快[8]。为了通过心电图测量诊断心肌梗死, 进行基于深度学习的诊断研究, 该研究使用患者的心电图测量大数据。基于 MI 患者和正常人的心电图结果, 开发了一种用于诊断心肌梗死的深度学习算法, 并开发一个自动诊断模型。尽管心电图是诊断急性心肌梗死最常见的方法, 但只有 50%~57% 的急性心肌梗死患者可以准确诊断, 非 ST 段抬高型急性冠状动脉综合征患者没有显示心肌梗死的典型心电图模式[9][10], 需要全面评估心电图和肌钙蛋白等分子标志物的变化。

超声心动图是评估心肌梗死患者的理想方法，能够监测心脏和瓣膜功能。冠状动脉疾病的功能结果、整体和节段壁运动的评估以及心肌梗死的后果都是超声心动图检查的一部分。在心电图和超声心动图的情况下，由于疾病是通过基于出现的模式的主观诊断来诊断的，因此越来越多地使用基于大数据的算法方法来提高准确性。为了准确诊断心肌梗死，有必要使用客观数值进行诊断，以确认生物标志物的变化。

3. 心肌梗死的标志物

血液生物标志物检测主要用于评估心肌损伤的程度。常用的心肌酶学检查指标包括肌酸激酶、肌酸激酶同工酶、肌钙蛋白(cTn)、肌红蛋白、乳酸脱氢酶等[11][12]。其中，肌钙蛋白因其高度特异性和敏感性，成为诊断心肌梗死的关键生物标志物。疾病不同时间段的变化不同。具体如下表 1。

Table 1. Temporal variations in cTnI concentrations across different time periods
表 1. 不同时间段 cTnI 浓度变化

时间段	cTnI (ng/mL)	cTnT (ng/mL)
正常范围	<0.04	<0.03
开始升高	1.5~3小时	1.5~3小时
达峰时间	10~24小时	10~24小时
恢复至基线	10~14天	10~14天

随着组学技术的发展，一系列新型标志物被发掘，涵盖外泌体、代谢标志物、miRNA 及表观遗传标记物。新型分子标志物为心肌梗死的早期诊断、风险分层及个体化治疗提供了全新思路。随着纳米技术、液体活检及人工智能的深度融合，未来有望实现无创、实时、高灵敏度的检测，彻底改变心肌梗死的诊疗范式。常见的新型分子标记物及其分子机制和检测优势如下表 2。

Table 2. Novel molecular biomarkers
表 2. 新型分子标记物

新型标志物类型	新型标志物代表	分子机制	优点
miRNA [13]-[15]	miR-208b、miR-499a	调控心肌细胞凋亡、炎症及血管新生，通过外泌体释放入血	早期诊断 (发病后2小时内)
外泌体蛋白[16] [17]	HSP70、FABP3、CD40L	反映心肌细胞应激、能量代谢及免疫激活，通过液态活检技术检测	无创、可重复检测
代谢标志物[18]	乳酸、酮体(β -羟丁酸)、脂质组	缺血缺氧条件下心肌代谢产物堆积，反映能量代谢异常	动态监测梗死进展
表观遗传标志物[19] [20]	DNA甲基化(SOX9基因)、组蛋白修饰	调控心肌纤维化及基因表达，与梗死后心室重构相关	个体化风险评估

当心肌梗死进展时，分析患者的基因表达特征以确定各种因素的变化。在这项研究中，分析了 30,905 个样本。使用患者样本的表达谱将 MCFS 方法应用于排名分析，使用获取的特征列表将 IFS 方法用于 SVM。通过这种方式，选择了 134 个特征。通过聚类分析选择能够检测心肌梗死的因素(图 2)。通过基因表达特征的大数据分析，可以鉴定 MI 后表达水平升高的基因(DCK 和 RNU4-7P)和表达水平降低的基因

(KLHL8、HCLS1、MOB3A、IL17RA、ETF1、ZFAS1、CRK、MXD1、UBXN2B、FCAR 和 EXTL3)。通过分析表达模式的变化可以揭示 MI 的机制(图 2) [21]。通过对大数据分析中获得的 134 个不同基因的基因相互作用分析,揭示了一些基因中的相互作用网络,基因 IL1R1、TLR2 和 TLR4 与 MI 表现出联系 [22]。与特定疾病密切相关的因素可以通过大数据和交互分析来识别,并适用于其他疾病。

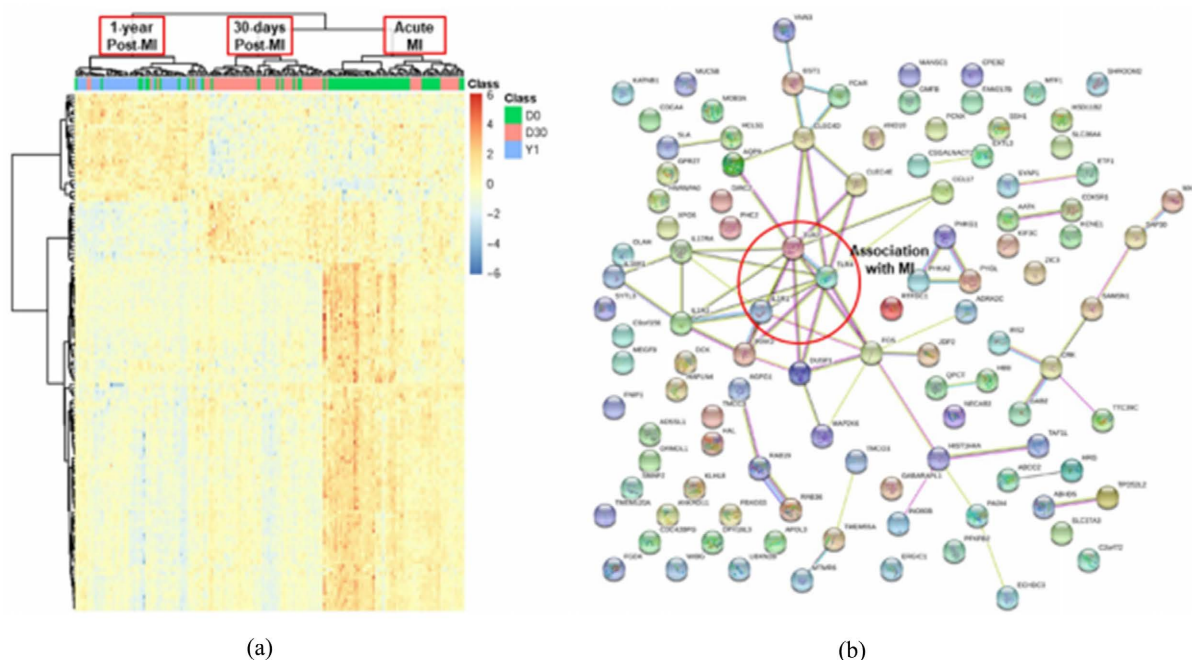


Figure 2. Gene analysis diagram
图 2. 基因分析图

尽管已经进行了许多研究来检测因心肌梗死发生而变化的因素,但对检测这些因素的材料的研究也很重要。如果诊断材料的特异性和敏感性低,即使发生疾病,也无法识别。因此,对材料开发的研究也很重要。

4. 心肌梗死检测的新技术

心肌梗死的早期诊断依赖于生物标志物的精准检测。随着纳米技术、单细胞测序、合成生物学及人工智能的突破,标志物检测正迈向超灵敏、实时化、个性化的新阶段。

金纳米星阵列传感器利用金纳米颗粒的局域表面等离子共振效应,将抗体修饰在纳米星表面,特异性捕获目标标志物(如 cTnI)。当目标蛋白结合时, LSPR 波长发生偏移,通过光谱仪实时监测信号变化 [23]。MIT 团队开发的传感器在胸痛患者中实现 5 分钟确诊,灵敏度达 0.1 pg/mL,与标准 ECG 结合可将 STEMI 诊断效率提升 40% [24]。这类检测方法适合用于急诊。利用石墨烯的高电子迁移率和荧光特性,构建电化学发光传感器。抗体修饰的 GQDs 与 cTnI 结合后,产生电化学信号放大效应[25] [26]。可以检测 miRNA 与蛋白质标志物。加州大学圣地亚哥分校的“Biostamp”贴片已通过临床试验,可连续监测 72 小时,预警无症状心肌缺血[27]。通过微通道内的抗体修饰捕获目标分子,结合荧光标记实现快速定量。集成微型泵与光学传感器,无需离心即可完成全血检测。新加坡国立大学研发的“Lab-on-Chip”系统可在 5 分钟内完成 cTnI 检测,灵敏度达 0.02 ng/mL [28]。利用微流控芯片分离单个外泌体,通过纳米孔测序(ONT MinION)或二代测序(NGS)分析 miRNA/mRNA 谱。STEMI 患者外泌体中 miR-208b 水平在发病

后 2 小时内显著升高(AUC 值 0.93)。外泌体检测是一个重点,欧洲心脏病学会(ESC)指南纳入外泌体 miR-204 检测,用于区分 STEMI 与非 STEMI 患者,减少不必要的冠脉造影检查[29] [30]。循环肿瘤 DNA (ctDNA)甲基化检测是检测的新方向,通过焦磷酸测序或甲基化特异性 PCR (MS-PCR)检测心肌损伤相关基因(如 SOX9、MYC)的甲基化状态,SOX9 基因启动子区域甲基化水平与心肌梗死后心室重构显著相关[31]。利用纳米孔测序技术直接测序血液中的 circRNA,通过生物信息学分析其与心肌缺血的调控关系[32]。circRNA 在血液中半衰期长达数小时,适合动态监测。circRNA (如 hsa-miR-30a-5p)可区分 STEMI 与非 STEMI 患者(AUC 值 0.91)。CRISPR-Cas12a 信号放大检测是一种新的检测方法。设计靶向心肌损伤标志物(如 cTnI)的 CRISPR 探针,与 Cas12a 蛋白结合后触发旁切效应,释放荧光信号。斯坦福大学团队开发 CRISPR-Cas12a 检测系统,实现无创汗液中 cTnI 的实时监测[33]。基因编辑探针也用于心肌梗死的检测。靶向 SOX9 基因甲基化位点,通过 dCas9 蛋白激活或抑制特定基因表达,调控心肌纤维化进程。动物实验表明,靶向 SOX9 的基因编辑可减少梗死后瘢痕面积[34]。使用生物标志物特异性抗体的免疫测定通常用于检测血液中循环的生物标志物[35]。因此,已经开发了各种抗体来检测上述心肌梗死的生物标志物。此外,已经进行了使用磁性纳米粒子、金纳米粒子或表面等离子体共振(SPR)技术、检测生物标志物的研究[36]。心肌梗死的大多数生物标志物由蛋白质组成。因此,基于抗体的方法主要用于检测生物标志物。然而,需要多种方法和材料来准确诊断和处理心肌梗死。

5. 基于人工智能的心肌梗死检测

降低急性冠脉综合征(ACS)的病死率是一个重要的公共卫生目标。目前,ACS 的诊断受限于检验手段的滞后性、有创性以及高成本等问题。随着人工智能(AI)技术的发展,这种情况正在得到改善。深度学习模型(如 U-Net、ResNet、EfficientNet)通过卷积神经网络(CNN)自动识别冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)中的斑块特征(钙化、非钙化、混合斑块[37]。通过心脏 MRI 图像分割技术识别缺血心肌区域(精度达毫米级)。GE 医疗的 AI 系统可在 30 秒内完成 CCTA 分析,辅助医生快速制定介入治疗方案,STEMI 诊断效率提升 40%。该检测体系的斑块检测灵敏度为 96.2%,特异性:94.5% [38]。光学相干断层扫描(OCT)图像处理,检测冠脉内血栓及血管狭窄程度,分辨率达微米级,用于介入手术导航:AI 实时分析 OCT 图像,指导支架植入位置优化[39] [40]。深度学习模型自动识别 ST 段抬高与非 ST 段抬高型心肌梗死。可穿戴设备(如 Apple Watch)集成 AI 算法,实现房颤与 ST 段变化的实时预警(误报率 <5%)。谷歌 DeepMind 开发的 AI 系统在 ECG 分析中达到 97.4%的 STEMI 识别准确率。脉搏波分析是应用光电传感器采集 PPG 信号,AI 算法提取心率变异性及脉搏波传导时间,间接评估心肌缺血。华为 Watch D 已通过 FDA 认证,可通过 PPG 信号早期预警无症状心肌缺血。应用多组学数据整合,联合图神经网络、整合蛋白质组、代谢组及基因组数据,构建心肌梗死风险预测模型。英国生物银行研究显示,AI 模型可提前 5 年预测心肌梗死风险。机器学习算法(如随机森林)识别与 MI 相关的 miRNA 特征组合,miR-208b 联合 hs-cTnI 检测可将诊断窗口期提前至发病后 2 小时。

应用 AI 分诊系统整合年龄、肌钙蛋白水平及影像数据,实时更新心肌梗死后再梗死风险。胸痛患者入院后,AI 自动分析 ECG、血压及病史数据,10 秒内生成初步诊断建议,建立 GRACE-AI 模型。研究发现,AI 预测的高风险患者再梗死发生率比临床评估组高 2.3 倍。目前,有许多的可穿戴 AI 系统,持续监测 ECG、血氧及体温,异常信号自动触发远程会诊。

人工智能技术通过高效处理多源异构数据,显著提升了心肌梗死的早期诊断、风险分层及动态监测能力。未来,随着算法透明度提升、硬件成本下降及跨学科协作加强,AI 有望成为心血管疾病防控的核心工具,推动医疗模式从“疾病治疗”向“健康管护”转变。

6. 结论与展望

尽管现有的心肌梗死检测方法已经取得了显著进步,但仍存在一些挑战需要克服,例如,如何进一步提高检测灵敏度和特异性,以及如何将新兴技术更好地整合到临床实践中。未来的研究应继续探索新的生物标志物、改进现有检测技术,并发展更加精准高效的诊断策略,以期实现对心肌梗死的早期预警和有效管理。心肌梗死检测是一个多维度的过程,涉及多种检测技术和方法的综合运用。每种技术都有其独特的优势和局限性,合理选择和结合使用这些方法,对于提高心肌梗死的诊断水平至关重要。

基金项目

2023 年度湖南省自然科学基金项目(2023JJ60207, 2024JJ9053, 2025JJ803736); 湖南环境生物职业技术学院青年基金项目(QN2023-03); 湖南省教育厅科学研究项目(24C0863)。

参考文献

- [1] Ashokkumar, S., White, J.L., Kyeyune, D., *et al.* (2023) SARS-CoV-2 Seroprevalence among Ugandan Blood Donors: 2019-2022. *Topics in Antiviral Medicine*, **31**, 36-39.
- [2] Song, J., Choi, S., Jeong, S., Chang, J.Y., Park, S.J., Oh, Y.H., *et al.* (2024) Protective Effect of Vaccination on the Risk of Cardiovascular Disease after SARS-CoV-2 Infection. *Clinical Research in Cardiology*, **113**, 235-245. <https://doi.org/10.1007/s00392-023-02271-8>
- [3] Li, N., Zhu, L., Sun, L. and Shao, G. (2021) The Effects of Novel Coronavirus (SARS-CoV-2) Infection on Cardiovascular Diseases and Cardiopulmonary Injuries. *Stem Cell Research*, **51**, Article 102168. <https://doi.org/10.1016/j.scr.2021.102168>
- [4] Marfella, R., Paolisso, P., Sardu, C., Palomba, L., D'Onofrio, N., Cesaro, A., *et al.* (2021) SARS-COV-2 Colonizes Coronary Thrombus and Impairs Heart Microcirculation Bed in Asymptomatic Sars-Cov-2 Positive Subjects with Acute Myocardial Infarction. *Critical Care*, **25**, Article No. 217. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03643-0>
- [5] Agarwal, S., Al Hashimi, H., Agarwal, S.K. and Albastaki, U. (2020) Possible Association between Myocardial Infarction with Nonobstructed Coronary Arteries and SARS-CoV-2 Infection. *Canadian Medical Association Journal*, **192**, E1633-E1636. <https://doi.org/10.1503/cmaj.202106>
- [6] 汤云霞, 黄嵩. 女性心血管疾病现状及性别特异性危险因素分析[J]. 心电与循环, 2024, 43(6): 544-549.
- [7] 李瑞珍, 李星辉, 曾璟, 等. 急性心肌梗死合并心脏破裂的研究进展[J]. 临床荟萃, 2024, 39(3): 264-268.
- [8] 韩闯, 阙文戈, 王治忠, 等. 基于心电图的心肌梗死智能辅助诊断方法研究综述[J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(5): 1019-1026.
- [9] Mueller, C., Möckel, M., Giannitsis, E., Huber, K., Mair, J., Plebani, M., *et al.* (2017) Use of Copeptin for Rapid Rule-Out of Acute Myocardial Infarction. *European Heart Journal: Acute Cardiovascular Care*, **7**, 570-576. <https://doi.org/10.1177/2048872617710791>
- [10] Khan, S., Hasan, A., Attar, F., Sharifi, M., Siddique, R., Mraiche, F., *et al.* (2020) Gold Nanoparticle-Based Platforms for Diagnosis and Treatment of Myocardial Infarction. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, **6**, 6460-6477. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.0c00955>
- [11] Perez Assef, H., Ferrer Arrocha, M. and Aguiar Perez, J.E. (2022) Type 2 Acute Myocardial Infarction: Challenges in Clinical Practice. *Internal and Emergency Medicine*, **12**, 20-22.
- [12] 邹明静, 赵玉娟, 孙玉茗, 等. 急性心肌梗死标志物检测方法研究进展[J]. 检验医学与临床, 2024, 21(13): 1964-1967+1971.
- [13] Yang, S., Liu, C., Ji, X., Chen, X., Wang, Y. and Tao, R. (2023) The Role of Gold Nanorods in Detecting Circulating Micrnas as Biomarkers in Liver Diseases. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, **19**, 1721-1729. <https://doi.org/10.1166/jbn.2023.3676>
- [14] D'Alessandra, Y., Devanna, P., Limana, F., Straino, S., Di Carlo, A., Brambilla, P.G., *et al.* (2010) Circulating MicroRNAs Are New and Sensitive Biomarkers of Myocardial Infarction. *European Heart Journal*, **31**, 2765-2773. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq167>
- [15] Jung, S.E., Kim, S.W. and Choi, J. (2024) Exploring Cardiac Exosomal RNAs of Acute Myocardial Infarction. *Biomedicines*, **12**, Article 430. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12020430>
- [16] You, F. (2024) Exosomal miRNA-Let-7i-5p from Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells Protects against Myocardial

- Infarction by Inhibiting Myocardial Apoptosis. *American Journal of Translational Research*, **16**, 6528-6539. <https://doi.org/10.62347/vxnd1945>
- [17] Mao, S., Liang, Y., Yu, L., *et al.* (2021) Exosomal Hsa_Circ_0007047 Attenuates Post-Myocardial Infarction Remodeling by Promoting Angiogenesis via miR-1178-3p/PDPK1 Axis. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-827822/v1>
- [18] Zhang, H., Chen, X., Hu, P., Liang, Q., Liang, X., Wang, Y., *et al.* (2009) Metabolomic Profiling of Rat Serum Associated with Isoproterenol-Induced Myocardial Infarction Using Ultra-Performance Liquid Chromatography/Time-of-Flight Mass Spectrometry and Multivariate Analysis. *Talanta*, **79**, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.03.045>
- [19] Kim, M., Long, T.I., Arakawa, K., Wang, R., Yu, M.C. and Laird, P.W. (2010) DNA Methylation as a Biomarker for Cardiovascular Disease Risk. *PLOS ONE*, **5**, e9692. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009692>
- [20] Talens, R.P., Jukema, J.W., Trompet, S., Kremer, D., Westendorp, R.G.J., Lumey, L.H., *et al.* (2011) Hypermethylation at Loci Sensitive to the Prenatal Environment Is Associated with Increased Incidence of Myocardial Infarction. *International Journal of Epidemiology*, **41**, 106-115. <https://doi.org/10.1093/ije/dyr153>
- [21] Kim, S.Y., Lee, J., Shin, W., Oh, I., Ahn, J. and Kim, Y. (2023) Correction: Cardiac Biomarkers and Detection Methods for Myocardial Infarction. *Molecular & Cellular Toxicology*, **19**, 221-221. <https://doi.org/10.1007/s13273-022-00325-y>
- [22] Li, M., Chen, F., Zhang, Y., Xiong, Y., Li, Q. and Huang, H. (2020) Identification of Post-Myocardial Infarction Blood Expression Signatures Using Multiple Feature Selection Strategies. *Frontiers in Physiology*, **11**, Article 483. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00483>
- [23] Wen, X., Ou, Y., Zarick, H.F., Zhang, X., Hmelo, A.B., Victor, Q.J., *et al.* (2020) PRADA: Portable Reusable Accurate Diagnostics with Nanostar Antennas for Multiplexed Biomarker Screening. *Bioengineering & Translational Medicine*, **5**, e10165. <https://doi.org/10.1002/btm2.10165>
- [24] Chowdhury, M., Alzoubi, K., Khandakar, A., Khallifa, R., Abouhasera, R., Koubaa, S., *et al.* (2019) Wearable Real-Time Heart Attack Detection and Warning System to Reduce Road Accidents. *Sensors*, **19**, Article 2780. <https://doi.org/10.3390/s19122780>
- [25] Kitte, S.A., Tafese, T., Xu, C., Saqib, M., Li, H. and Jin, Y. (2021) Plasmon-Enhanced Quantum Dots Electrochemiluminescence Aptasensor for Selective and Sensitive Detection of Cardiac Troponin I. *Talanta*, **221**, Article 121674. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121674>
- [26] Kitte, S.A., Bushira, F.A. and Soreta, T.R. (2022) An Impedimetric Aptamer-Based Sensor for Sensitive and Selective Determination of Cardiac Troponin I. *Journal of the Iranian Chemical Society*, **19**, 505-511. <https://doi.org/10.1007/s13738-021-02324-7>
- [27] Azar, A., Andrew, B., Ralf, L., *et al.* (2018) A Wearable Patch for Continuous Monitoring of Sweat Electrolytes during Exertion. *Lab on a Chip*, **18**, 2632-2641.
- [28] Niu, P., Jiang, J., Liu, K., Wang, S., Jing, J., Xu, T., *et al.* (2022) Fiber-Integrated WGM Optofluidic Chip Enhanced by Microwave Photonic Analyzer for Cardiac Biomarker Detection with Ultra-High Resolution. *Biosensors and Bioelectronics*, **208**, Article 114238. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114238>
- [29] Chen, Z., Yan, Y., Wu, J., Qi, C., Liu, J. and Wang, J. (2020) Expression Level and Diagnostic Value of Exosomal NEAT1/miR-204/MMP-9 in Acute ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *IUBMB Life*, **72**, 2499-2507. <https://doi.org/10.1002/iub.2376>
- [30] European Society of Cardiology (2023) 2023 ESC Guidelines on Acute Coronary Syndromes: Incorporation of Exosomal miRNA-208b. <https://www.escardio.org/guidelines>
- [31] Boovarahan, S.R., AlAsmari, A.F., Ali, N., Khan, R. and Kurian, G.A. (2022) Targeting DNA Methylation Can Reduce Cardiac Injury Associated with Ischemia Reperfusion: One Step Closer to Clinical Translation with Blood-Borne Assessment. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article 1021909. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.1021909>
- [32] Wang, Y., Zhao, Y., Bollas, A., Wang, Y. and Au, K.F. (2021) Nanopore Sequencing Technology, Bioinformatics and Applications. *Nature Biotechnology*, **39**, 1348-1365. <https://doi.org/10.1038/s41587-021-01108-x>
- [33] Hu, X., Li, J., Li, Y., Zhang, Y., Xiao, M., Zhang, Z., *et al.* (2024) Plug-and-Play Smart Transistor Bio-Chips Implementing Point-of-Care Diagnosis of AMI with Modified CRISPR/Cas12a System. *Biosensors and Bioelectronics*, **246**, Article 115909. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115909>
- [34] Scharf, G.M., Kilian, K., Cordero, J., Wang, Y., Grund, A., Hofmann, M., *et al.* (2019) Inactivation of Sox9 in Fibroblasts Reduces Cardiac Fibrosis and Inflammation. *JCI Insight*, **4**, e126721. <https://doi.org/10.1172/jci.insight.126721>
- [35] Ma, H., Cassidy, A. and O'Kennedy, R. (2021) The Role of Antibody-Based Troponin Detection in Cardiovascular Disease: A Critical Assessment. *Journal of Immunological Methods*, **497**, Article 113108. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2021.113108>
- [36] He, B., Ge, H., Yang, F., Sun, Y., Li, Z., Jiang, M., *et al.* (2015) A Novel Method in the Stratification of Post-Myocardial-Infarction Patients Based on Pathophysiology. *PLOS ONE*, **10**, e0130158. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130158>

-
- [37] Jaltotage, B., Sukudom, S., Ihdayhid, A.R. and Dwivedi, G. (2023) Enhancing Risk Stratification on Coronary Computed Tomography Angiography: The Role of Artificial Intelligence. *Clinical Therapeutics*, **45**, 1023-1028. <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2023.09.019>
- [38] Giampieri, P. (2025) Ai-Powered Contracts: A Critical Analysis. *International Journal for the Semiotics of Law-Revue Internationale de Sémiotique Juridique*, **38**, 403-420. <https://doi.org/10.1007/s11196-024-10137-z>
- [39] Kim, Y., Johnson, T.W., Akasaka, T. and Jeong, M.H. (2018) The Role of Optical Coherence Tomography in the Setting of Acute Myocardial Infarction. *Journal of Cardiology*, **72**, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.jjcc.2018.03.004>
- [40] Jang, J., *et al.* (2023) Real-Time AI-Guided OCT Imaging for Coronary Thrombosis Detection. *European Heart Journal*, **24**, 13-17.