

人工智能在腹主动脉瘤疾病中的应用

贺紫灵, 杨超*

暨南大学第二临床医学院(深圳市人民医院)心脏外科, 广东 深圳

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月5日

摘要

目的: 综述人工智能(AI)在腹主动脉瘤(AAA)破裂风险预测中的研究进展。方法: 检索近5年国内外AI在AAA中的应用文献, 从影像分割、瘤体生长预测、破裂风险评估及生物力学分析等方面总结AI方法的技术原理与临床效果。结果: 深度学习在CT影像自动分割中显著提升主动脉外壁、腔内血栓识别精度, Dice系数普遍 >0.9 ; 机器学习模型可融合形态学、血流动力学与分子组学特征, 破裂风险预测AUC达 $0.85\sim 0.90$ 。AI模型在EVAR术后内漏检测与并发症预测中亦表现优异。结论: AI可显著提升AAA破裂风险预测的精准度与个体化水平, 但仍受限于数据标准化、模型可解释性及临床转化。未来应整合多模态信息并建立多中心协作平台, 以实现智能化、可推广的风险评估体系。

关键词

腹主动脉瘤, 人工智能, 机器学习, 深度学习, 破裂风险预测

Applications of Artificial Intelligence in Abdominal Aortic Aneurysm

Ziling He, Chao Yang*

Department of Cardiovascular Surgery, The Second Clinical Medical College of Jinan University (Shenzhen People's Hospital), Shenzhen Guangdong

Received: January 3, 2026; accepted: January 28, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Objective: To review recent advances in the application of Artificial Intelligence (AI) for predicting the rupture risk of Abdominal Aortic Aneurysm (AAA). **Methods:** Literature published within the past five years regarding AI applications in AAA was systematically reviewed. Technical principles and clinical efficacy were analyzed across imaging segmentation, aneurysm growth prediction, rupture risk assessment, and biomechanical analysis. **Results:** Deep learning significantly improves CT-

*通讯作者。

based segmentation accuracy for aortic wall and intraluminal thrombus (Dice > 0.9). Machine learning models integrating morphological, hemodynamic, and omics features achieved AUCs of 0.85~0.90 for rupture prediction. AI systems also perform well in detecting endoleak and postoperative complications after EVAR. Conclusion: AI enhances precision and individualization in AAA rupture risk prediction; however, limitations persist regarding data standardization, model interpretability, and clinical translation. Future efforts should focus on multimodal data integration and multicenter cooperation to achieve intelligent and generalizable risk assessment frameworks.

Keywords

Abdominal Aortic Aneurysm, Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, Rupture Risk Prediction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

腹主动脉瘤(Abdominal Aortic Aneurysm, AAA)是一种常见的退行性血管疾病,其隐匿性强、破裂后死亡率高[1]。研究显示,破裂性AAA患者的30天病死率可超过20%,5年生存率不足50% [2],因此早期识别高风险患者具有重要临床意义。目前临床主要依据瘤体最大直径判断干预时机[3],但该指标无法充分反映个体解剖结构、瘤壁应力分布及生长速率的差异[4],导致部分患者虽直径较小仍发生破裂,而部分大直径患者长期稳定。如何实现更精准、个体化的破裂风险评估,成为AAA管理的重要挑战[5][6]。

人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术近年来在医学领域快速发展,尤其是机器学习(Machine Learning, ML)和深度学习(Deep Learning, DL)方法在影像识别、疾病预测与决策支持中展现出显著优势。通过对多模态医学数据的高维特征提取与模式识别[7][8],AI为AAA的影像自动分析[9]、风险建模及预后评估提供了新的解决思路[10],其能够整合形态学、血流动力学、临床与分子组学等多源信息,从而实现动脉瘤演变过程的精准刻画和破裂风险的个体化预测。

本综述将结合各类AI概念,系统总结AI在腹主动脉瘤中的应用现状及研究进展,并分析现有方法的优势与局限性,以期人工智能在相关疾病中的研究和发

2. 方法

本研究为叙述性综述。检索2019年1月至2025年12月期间发表的文献,数据库包括PubMed、中国知网(CNKI)等。检索词涵盖“Abdominal Aortic Aneurysm”、“Artificial Intelligence”、“Machine Learning”、“Deep Learning”等。纳入人工智能(AI)在腹主动脉瘤(AAA)影像分析、风险评估、分子组学及生物力学建模中的研究。剔除动物实验、会议摘要及综述。由研究者独立筛选并提取信息,包括研究类型、AI模型类别、数据来源及性能指标(如准确率、AUC、Dice系数等),经一致性核查后纳入分析。最终将研究按应用方向分为影像分割、瘤体生长预测、破裂风险评估及预后、多组学与生物力学分析四类,综合比较其技术方法与临床价值。

3. 人工智能在腹主动脉瘤中的应用现状

当前,多层螺旋CT(Multi-Detector Row Computed Tomography, MSCT)凭借亚毫米级空间分辨率及多

期相动态成像能力,已成为腹主动脉瘤(AAA)筛查、随访与术前评估的“金标准”。一次扫描即可同时捕获全段腹主动脉、分支血管及毗邻脏器的解剖与功能信息,为后续定量分析奠定数据基础。然而,从上千层的CT图像数据中精准提取瘤体、管壁、附壁血栓及分支血管等感兴趣区域(Region of Interest, ROI),仍是制约后续影像组学特征挖掘、三维形态学建模和流体力学仿真计算的瓶颈。传统人工勾画耗时费力且一致性差,难以满足临床与科研对高通量、可重复数据的迫切需求。近年来,深度学习(Deep Learning, DL)以其压倒性优势成为图像分类、目标检测等传统计算机视觉任务中公认的最优解。卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)是深度神经网络的一个分支,其原理是仿照动物视觉皮层的局部感受野与重叠覆盖机制设计:单神经元仅响应视野局部刺激,众神经元层层交叠,最终完整捕获全域信息。

3.1. 影像分割与结构识别的智能化进展

腹主动脉瘤(AAA)CT自动化分割的核心难题是精准区分外壁、管腔与附壁血栓(ILT)。

全卷积网络(Fully Convolutional Network, FCN)是CNN在语义分割领域的改进分支,其核心是移除全连接层、以卷积层贯穿并结合上采样。Abdolmanafi [11]团队利用ResNet-18的全卷积网络(FCN)实现了可以全自动分割这三种结构的模型,通过先提取主动脉整体ROI、再细分管腔与ILT/外壁、最后分类钙化区域的顺序,以56例患者的6030个CT切片为训练集,19例独立影像做泛化评估,6例其他中心影像行外部验证,最终训练集主动脉分割准确率达 0.99 ± 0.01 、管腔 0.98 ± 0.01 ;外部验证集管腔准确率达 0.98 ± 0.02 ,为AAA精准分析提供了可靠的支撑。

深度卷积神经网络(Deep Convolutional Neural Network, DCNN)是CNN的深化拓展分支,核心原理是靠多层卷积与池化堆叠模拟视觉感知层级:由单卷积层响应局部特征,再经过多卷积层逐步抽象出高级语义(如物体部件、类别),最后通过池化层压缩尺寸保留关键信息,多层次协作最终完整捕获全域图像的复杂特征,实现更精准的图像分析任务。López-Linares等[12]提出一种基于深度卷积神经网络(DCNN)的全自动分割方法,可在CTA图像中直接提取腹主动脉瘤附壁血栓区域,无需人工干预即可完成体积定量;其自动分割结果与“金标准”的平均相对体积差异落在经验丰富观察者间的变异范围内。然而,该策略仍需大量精细标注的CTA图像来完成网络训练,临床落地受限。为此,同一团队进一步以合成形状模型生成仿真图像替代真实标注数据[13],在仅含少量真实样本的情境下仍实现瘤体自动分割,显著降低了大规模标注数据库的构建成本。现相关团队已研发出基于类U-Net卷积神经网络的全自动体积分割软件PRAEVAorta,用于精准评估EVAR术后的AAA瘤囊演变。Caradu [14]用48例患者的CT扫描(13,708层)作为验证集对该软件进行测试,结果显示该软件可在2.5 min内完成管腔、血栓及整体瘤体分割,速度较人工提升9倍;Dice相似系数0.873~0.973, Pearson相关系数 > 0.99 ,证明其可作为EVAR术后随访高效且可重复的影像评估工具。

在2D CT切片中进行分割的基础上, Siriapisith等人[15]提出在体素强度与体素梯度两个三维搜索空间中交替迭代两种不同分割策略,实现腹主动脉瘤的三维可变邻域搜索分割。该3D分割技术的分割精度表现优异,平均骰子相似系数(Dice Similarity Coefficient, DSC)达91.88%。

U-Net是面向医学图像分割的经典卷积神经网络,得名于其“编码-解码”对称架构呈现的“U”形结构。将其融入仅聚焦医学图像局部病灶或组织特征的自动适配机制后,就有了自适应医学图像分割网络(Neural Network U-Net, nnU-Net)。借助nnU-Net模型, Ginzburg [16]实现了腹主动脉瘤血管周围脂肪组织(PVAT)的全自动分割。该研究探讨了CT影像中PVAT密度作为AAA血管炎症标志物的价值,纳入100例AAA患者与100例匹配图像对照,用nnU-Net技术测量主动脉不同距离PVAT的CT值(HU),并计算 $HU\Delta$ 和 $HUratio$ 。结果显示,AAA患者瘤体段 $HU\Delta$ 更高、 $HUratio$ 更低(均 $p < 0.01$),且瘤体段与自身非瘤体段差异显著($p < 0.001$)。在这项研究中, AI的分割Dice系数达0.977,为AAA无创炎症评估

提供了新方向。

3.2. 瘤体生长预测与动态监测模型

根据现行临床指南, 腹主动脉瘤(AAA)的手术干预指征包括: 出现相关症状、动脉瘤破裂、动脉瘤快速扩张($>5\text{ mm}/6\text{ 个月}$)或最大直径超过 5.5 cm 。机器学习(Machine Learning, ML)作为人工智能(AI)的核心分支, 能够通过大规模数据训练自动学习规律、优化模型, 从而实现复杂临床问题的智能预测与决策支持。近年来, ML 推动腹主动脉瘤(AAA)破裂风险预测向着精准化、个性化迈进, 通过从医学影像中高通量地提取定量特征, 构建预测模型, 实现临床决策的辅助[17]-[20]。

在 AAA 生长预测方面, 研究者已取得重要进展。Lee 等[19]融合基线 AAA 直径与血流介导的扩张功能(FMD)生物标志物, 采用非线性支持向量回归模型预测 AAA 直径变化, 其 12 个月和 24 个月预测误差 $\leq 2\text{ mm}$ 的准确率分别达 85%和 71%。Hirata 等[18]基于 CT 影像的 9 项形态学特征构建极限梯度提升模型, 预测快速生长($> 4\text{ mm}/\text{年}$)的 AUC 达 0.86。Wang 等[21]从增强 CT 中提取瘤内血栓(ILT)与血管壁的 7 项纹理特征, 基于逻辑回归模型预测快速生长($> 0.25\text{ cm}/\text{年}$)的 AUC 为 0.78, 显著优于单纯直径指标。上述模型分别从生物标志物、形态学及影像组学层面切入, 均表现出优于传统标准的预测效能, 为 AAA 风险分层及临床干预提供了新方法。

3.3. 破裂风险评估与预后模型

为突破传统直径标准在 AAA 破裂风险评估中的局限, 研究者尝试融合多维特征构建 AI 模型。Alloisio 等[22]整合几何、生物力学与临床数据, 基于逻辑回归算法开发破裂风险预测模型, 在 $\leq 70\text{ mm}$ 的关键临床人群中预测准确率达 82.5%, 显著优于传统直径标准(44.2%)。Mohamed 等[23]则分析了动脉钙化分布对 AAA 破裂的预测价值。该研究通过半自动化分割 CT 影像, 获取了钙化相关(体积、数量、欧氏距离)及临床、形态学特征, 结合 XGBoost 机器学习算法与 LASSO 回归分析, 结果表明破裂 AAA 的钙化灶更趋集中。Skovbo 等[24]研究团队开发了名为 SHAPFire 的人工智能工具, 从动脉瘤直径、血压等指标中筛选出 20 项关键特征, 构建了 AAA 破裂风险预测模型。该模型的 AUC 达到 0.86, 显著优于传统基于直径的单一判断标准(AUC = 0.74), 且其性能与包含全部 68 项特征的综合模型相当, 为 AAA 破裂风险评估提供了更精准的方案。

目前 AAA 的手术干预方式主要为传统的开放式血管置换术和血管内腹主动脉支架隔绝修复术(Endovascular Aortic Aneurysm Repair, EVAR)。EVAR 术后主要并发症为发生内漏。Sage 等[17]利用 334 例 CTA 影像开发深度学习算法, 可自动检测内漏并测量动脉瘤体积, 显著提高诊断准确性并减少人工差异。van Rijswijk 等[25]纳入 1000 例 EVAR 术后患者的多中心数据, 同时整合临床、影像及生物力学数据构建多模态 AI 模型, 用于预测术后 1 年 AAA 缩小情况。该模型可筛选低缩小风险人群以优化术前及随访策略。在开放修复术后并发症预测方面, 研究者[20]利用 ML 对 3620 例择期开放修补术后患者建立 XGBoost 模型, 预测 30 天主要心血管不良事件(MACE)的 AUC 达 0.90, 模型校准良好(Brier = 0.03)。Chung 等[26]基于人工智能构建了腹主动脉瘤预后分类器(APC), 可有效预测腹主动脉瘤稳定、需修复及破裂三种结局, 显著优于传统最大直径标准。

3.4. 多组学与生物力学建模的 AI 整合策略

AI 技术不仅可基于影像组学进行风险预测建模, 还可延伸至分子水平, 通过多组学数据整合揭示关键调控分子与信号通路, 为 AAA 的发病机制解析与靶向治疗提供新视角。Li 等[27]结合单细胞测序、组学数据与机器学习方法, 识别出 FOSB 和 JUNB 等核心生物标志物(AUC = 0.989), 揭示了 T 淋巴细胞命

运失衡在 AAA 免疫微环境紊乱中的作用。Han 等[28]整合多组单细胞与外周血单个核细胞(PBMC)转录组数据, 利用多算法发现 PIM1 基因与铜/铁死亡相关, 并通过调控单核/巨噬细胞功能促进 AAA 发生。Zhang 等[29]则融合临床、影像及免疫学数据, 基于 AI 算法实现 AAA 患者亚型识别, 成功区分出临床表型更严重的高风险人群, 并确定 CXCL1 为核心靶点, 其过表达可激活 NF- κ B 通路, 促进中性粒细胞活化与病变进展, 从而推动 AAA 的进展。总体而言, 这些研究充分展示了 AI 驱动的多组学整合在揭示 AAA 分子机制与精准诊断中的应用潜力。

人工智能在腹主动脉瘤(AAA)生物力学领域研究中也极具应用潜力。Lindquist 等[30]整合 AAA 几何与生物力学特征, 构建了基于机器学习算法的多参数预测模型。该模型在判断患者 4 年内是否达到手术指征时预测效果更优(AUC 提升至 0.85), 且对动脉瘤生长趋势的预测准确度明显提高。同时还证明了管腔直径与峰值壁应力(PWS)与破裂或症状性 AAA 密切相关。Chung 等[31]提出了一种基于深度学习的 AI 框架, 以自动化方式完成 CT 影像分割、三维重建及壁应力预测。该方法结合 U-Net 与树状管道优化(TPOT)算法, 显著缩短了计算流程(单例分析约 20 秒), 且 AI 预测的峰值及平均壁应力与有限元分析结果高度一致($R^2 = 0.84\sim 0.99$), 为大规模临床影像数据的高通量生物力学分析提供了可行途径。Mostafa 等[32]则进一步比较了层流与大涡模拟(LES)在计算流体力学(CFD)中的性能差异, 结果显示两者在预测 AAA 生长状态时的壁面切应力(WSS)与流速变量表现相当, 且三种机器学习分类器(SVM、KNN、GLM)的预测准确性差异均小于 2% ($p > 0.05$)。研究指出, 在小型 AAA 的血流动力学建模中, 流动模型选择对整体预测性能影响有限。以上代表性研究显示, AI 结合几何建模、有限元分析与 CFD 模拟, 不仅提升了 AAA 壁面应力与血流动力学特征的自动化定量精度, 也推动了从影像到力学的综合风险评估, 为 AAA 个体化干预与精准手术决策提供了更有效率的计算工具与理论支撑。

此外, Zhou 等[33]在 B 型主动脉夹层 TEVAR 术后远端扩张预测中, 应用弹性网回归与神经网络模型(AUC = 0.773~0.876)筛选关键危险因素, 其特征筛选与建模逻辑对腹主动脉瘤 EVAR 术后远端扩张预判具有直接参考价值。陈广新等[34]聚焦颅内动脉瘤, 经 MIMICS 重建与 Fluent 仿真提取 35 项形态学及血流动力学特征, 随机森林模型(AUC 0.81、准确率 78.66%)展现良好效能, 其多模态特征融合策略为 AAA 破裂风险建模提供了可迁移的分析框架, 助力构建精准评估模型。

4. 挑战与局限

尽管人工智能在腹主动脉瘤研究中展现出广阔前景, 其临床应用仍面临多重挑战。首先, AAA 本身的诊断与风险评估存在固有难点, 包括影像技术的固有局限、多中心长期随访数据不足、风险评估模型的预测能力受限, 以及临床决策中个体化因素考虑不足。其次, AI 技术层面面临算法可解释性差、模型泛化能力弱、跨机构适用性不足, 以及生物力学模拟与深度学习计算复杂度高、小样本条件下易过拟合等问题。此外, 在临床转化过程中, 患者数据隐私保护、AI 诊断责任界定等伦理和法规因素, 以及医师对 AI 工具的接受度和培训需求, 进一步增加了落地难度。综合表明, AAA 人工智能研究在数据、算法、临床和技术层面均存在制约, 需要在数据整合、模型可解释性、临床适应性和算法优化等方面持续探索, 以推动其安全可靠的临床应用。

5. 未来与展望

未来研究应整合生物力学、基因组学和多中心随访数据, 开发稳健、透明且可推广的风险评估和 AI 决策工具, 探索多模态数据融合、实时决策支持及闭环管理系统。通过学术界、产业界和临床机构的共同努力, 人工智能有望在 AAA 的预防、诊断和治疗中发挥核心作用, 实现个体化监测与干预, 并最终降低疾病的发病率与死亡率。

6. 总结与讨论

人工智能在腹主动脉瘤(AAA)研究中展现出巨大潜力,可以帮助医生更准确地评估破裂风险、分析影像数据,并为术前决策提供参考,从而推动个体化治疗和精准医疗的发展。然而,目前研究仍面临数据量有限、不同医院和设备间差异大,以及模型决策不够透明等问题,一定程度上限制了AI在临床的广泛应用。

6.1. 模型的泛化能力与跨中心验证

目前AI模型在AAA影像分析与风险预测中多基于单中心数据,泛化能力(Generalizability)仍有限。当模型应用于不同医院或CT机型时,成像参数和噪声异常导致性能下降。为提升跨设备一致性,研究者尝试采用迁移学习(Transfer Learning)与域适应(Domain Adaptation)方法,并开展多中心再训练。多源数据库(如VASC-Data、AneurysmNet)的建设为外部验证提供基础。未来应重视模型在多场景数据下的稳健性评估,通过跨中心验证与前瞻性研究确保临床可推广性。

6.2. 可解释性AI与临床可视化应用

除泛化能力外,模型的可解释性(Explainable AI, XAI)也是临床应用的关键。基于显著性图(Saliency Map)和梯度加权类激活映射(Grad-CAM)的可视化方法,可突出模型关注的高风险区域;而SHAP值(Shapley Additive Explanations)则可用于量化各个特征对预测结果的贡献程度。此类方法有助于医生理解AI决策逻辑,增强信任与模型优化,为AAA风险评估的临床落地奠定基础。

AI在AAA领域潜力巨大,但临床落地需多中心标准化数据、跨学科协作,并重点提升模型的泛化能力与可解释性,以实现从风险预测到个体化干预的闭环应用。

参考文献

- [1] Ullery, B.W., Hallett, R.L. and Fleischmann, D. (2018) Epidemiology and Contemporary Management of Abdominal Aortic Aneurysms. *Abdominal Radiology*, **43**, 1032-1043. <https://doi.org/10.1007/s00261-017-1450-7>
- [2] Lieberg, J., Pruks, L.-L., Kals, M., Paapstel, K., Aavik, A. and Kals, J. (2017) Mortality after Elective and Ruptured Abdominal Aortic Aneurysm Surgical Repair: 12-Year Single-Center Experience of Estonia. *Scandinavian Journal of Surgery*, **107**, 152-157. <https://doi.org/10.1177/1457496917738923>
- [3] Jeong, J., Kim, J., Kim, N., Cho, J., Kim, J., Oh, J., *et al.* (2016) Risk Diagnosis Based on Diameter of Abdominal Aortic Aneurysm. *Technology and Health Care*, **24**, S569-S575. <https://doi.org/10.3233/thc-161183>
- [4] Murali Krishna, S., Morton, S.K., Li, J. and Golledge, J. (2020) Risk Factors and Mouse Models of Abdominal Aortic Aneurysm Rupture. *International Journal of Molecular Sciences*, **21**, Article No. 7250. <https://doi.org/10.3390/ijms21197250>
- [5] Gasser, T.C. (2016) Biomechanical Rupture Risk Assessment—A Consistent and Objective Decision-Making Tool for Abdominal Aortic Aneurysm Patients. *Aorta*, **4**, 42-60. <https://doi.org/10.12945/j.aorta.2016.15.030>
- [6] Golledge, J., Norman, P.E., Murphy, M.P. and Dalman, R.L. (2017) Challenges and Opportunities in Limiting Abdominal Aortic Aneurysm Growth. *Journal of Vascular Surgery*, **65**, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2016.08.003>
- [7] Sidik, A.I., Komarov, R.N., Gawusu, S., Moomin, A., Al-Ariki, M.K., Elias, M., *et al.* (2024) Application of Artificial Intelligence in Cardiology: A Bibliometric Analysis. *Cureus*, **16**, e66925. <https://doi.org/10.7759/cureus.66925>
- [8] Xiang, Y., Zhao, L., Liu, Z., Wu, X., Chen, J., Long, E., *et al.* (2020) Implementation of Artificial Intelligence in Medicine: Status Analysis and Development Suggestions. *Artificial Intelligence in Medicine*, **102**, Article ID: 101780. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101780>
- [9] Chen, D., Krycia, M., Avondo, J. and Cavallo, J. (2025) Performance Assessment of an Artificial Intelligence Algorithm for Opportunistic Screening of Abdominal Aortic Aneurysms. *Clinical Imaging*, **125**, Article ID: 110550. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2025.110550>
- [10] Guo, J., Lareyre, F., Lee, R., Teraa, M., Delingette, H. and Raffort, J. (2025) Artificial Intelligence and Machine Learning for Risk Prediction of Abdominal Aortic Aneurysm Growth and Rupture. *Angiology*.

- <https://doi.org/10.1177/00033197251379127>
- [11] Abdolmanafi, A., Forneris, A., Moore, R.D. and Di Martino, E.S. (2023) Deep-Learning Method for Fully Automatic Segmentation of the Abdominal Aortic Aneurysm from Computed Tomography Imaging. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article ID: 1040053. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.1040053>
- [12] López-Linares, K., Aranjuelo, N., Kabongo, L., Maclair, G., Lete, N., Ceresa, M., *et al.* (2018) Fully Automatic Detection and Segmentation of Abdominal Aortic Thrombus in Post-Operative CTA Images Using Deep Convolutional Neural Networks. *Medical Image Analysis*, **46**, 202-214. <https://doi.org/10.1016/j.media.2018.03.010>
- [13] López-Linares, K., Stephens, M., García, I., Macía, I., González Ballester, M.Á. and José Estepar, R.S. (2019) Abdominal Aortic Aneurysm Segmentation Using Convolutional Neural Networks Trained with Images Generated with a Synthetic Shape Model. In: Liao, H.E., *et al.*, Eds., *Machine Learning and Medical Engineering for Cardiovascular Health and Intravascular Imaging and Computer Assisted Stenting*, Springer International Publishing, 167-174. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33327-0_20
- [14] Caradu, C., Pouncey, A., Lakhlifi, E., Brunet, C., Bérard, X. and Ducasse, E. (2022) Fully Automatic Volume Segmentation Using Deep Learning Approaches to Assess Aneurysmal Sac Evolution after Infraarenal Endovascular Aortic Repair. *Journal of Vascular Surgery*, **76**, 620-630.e3. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2022.03.891>
- [15] Siriapisith, T., Kusakunniran, W. and Haddawy, P. (2019) 3D Segmentation of Exterior Wall Surface of Abdominal Aortic Aneurysm from CT Images Using Variable Neighborhood Search. *Computers in Biology and Medicine*, **107**, 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.01.027>
- [16] Ginzburg, D., Nowak, S., Attenberger, U., Luetkens, J., Sprinkart, A.M. and Kuetting, D. (2024) Computer Tomography-Based Assessment of Perivascular Adipose Tissue in Patients with Abdominal Aortic Aneurysms. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 20512. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71283-9>
- [17] Hahn, S., Perry, M., Morris, C.S., Wshah, S. and Bertges, D.J. (2020) Machine Deep Learning Accurately Detects Endoleak after Endovascular Abdominal Aortic Aneurysm Repair. *JVS-Vascular Science*, **1**, 5-12. <https://doi.org/10.1016/j.jvssci.2019.12.003>
- [18] Hirata, K., Nakaura, T., Nakagawa, M., Kidoh, M., Oda, S., Utsunomiya, D., *et al.* (2020) Machine Learning to Predict the Rapid Growth of Small Abdominal Aortic Aneurysm. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **44**, 37-42. <https://doi.org/10.1097/rct.0000000000000958>
- [19] Lee, R., Jarchi, D., Perera, R., Jones, A., Cassimjee, I., Handa, A., *et al.* (2018) Applied Machine Learning for the Prediction of Growth of Abdominal Aortic Aneurysm in Humans. *EJVES Short Reports*, **39**, 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.ejvsr.2018.03.004>
- [20] Li, B., Aljabri, B., Beaton, D., Al-Omran, L., Hussain, M.A., Lee, D.S., *et al.* (2025) Predicting Outcomes Following Open Abdominal Aortic Aneurysm Repair Using Machine Learning. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 14362. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98573-0>
- [21] Wang, Y., Xiong, F., Leach, J., Kao, E., Tian, B., Zhu, C., *et al.* (2023) Contrast-Enhanced CT Radiomics Improves the Prediction of Abdominal Aortic Aneurysm Progression. *European Radiology*, **33**, 3444-3454. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09490-7>
- [22] Alloisio, M., Siika, A., Roy, J., Zerwes, S., Hyhlik-duerr, A. and Gasser, T.C. (2024) Merging Geometrical, Biomechanical, and Clinical Data to Assess the Rupture Risk of Abdominal Aortic Aneurysms. *EJVES Vascular Forum*, **62**, S21. <https://doi.org/10.1016/j.ejvsf.2024.07.034>
- [23] Mansouri, M., Therasse, E., Montagnon, E., Zhan, Y.O., Lessard, S., Roy, A., *et al.* (2023) CT Analysis of Aortic Calcifications to Predict Abdominal Aortic Aneurysm Rupture. *European Radiology*, **34**, 3903-3911. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10429-1>
- [24] Skovbo, J.S., Andersen, N.S., Obel, L.M., Laursen, M.S., Riis, A.S., Houliind, K.C., *et al.* (2025) Individual Risk Assessment for Rupture of Abdominal Aortic Aneurysm Using Artificial Intelligence. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, **69**, e244. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2025.02.023>
- [25] Rijswijk, R.E., Bogdanovic, M., Roy, J., *et al.* (2025) Multimodal Artificial Intelligence Model for Prediction of Abdominal Aortic Aneurysm Shrinkage after Endovascular Repair (the ART in EVAR Study). *Journal of Endovascular Therapy*.
- [26] Chung, T.K., Gueldner, P.H., Aloziem, O.U., Liang, N.L. and Vorp, D.A. (2024) An Artificial Intelligence Based Abdominal Aortic Aneurysm Prognosis Classifier to Predict Patient Outcomes. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 3390. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53459-5>
- [27] Li, D., Zhang, G., Du, P., Cao, C., He, X., Lv, Y., *et al.* (2025) Machine Learning Combined with Omics-Based Approaches Reveals T-Lymphocyte Cellular Fate Imbalance in Abdominal Aortic Aneurysm. *BMC Biology*, **23**, Article No. 280. <https://doi.org/10.1186/s12915-025-02400-x>
- [28] Han, Z., Lu, X., He, Y., Zhang, T., Zhou, Z., Zhang, J., *et al.* (2024) Integration of Bulk/scRNA-seq and Multiple Machine

- Learning Algorithms Identifies PIM1 as a Biomarker Associated with Cuproptosis and Ferroptosis in Abdominal Aortic Aneurysm. *Frontiers in Immunology*, **15**, Article ID: 1486209. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1486209>
- [29] Zhang, L., Yang, H., Zhou, C., Li, Y., Long, Z., Li, Q., *et al.* (2024) Artificial Intelligence-Driven Multiomics Predictive Model for Abdominal Aortic Aneurysm Subtypes to Identify Heterogeneous Immune Cell Infiltration and Predict Disease Progression. *International Immunopharmacology*, **138**, Article ID: 112608. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2024.112608>
- [30] Lindquist Liljeqvist, M., Bogdanovic, M., Siika, A., Gasser, T.C., Hultgren, R. and Roy, J. (2021) Geometric and Biomechanical Modeling Aided by Machine Learning Improves the Prediction of Growth and Rupture of Small Abdominal Aortic Aneurysms. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 18040. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96512-3>
- [31] Chung, T.K., Liang, N.L. and Vorp, D.A. (2022) Artificial Intelligence Framework to Predict Wall Stress in Abdominal Aortic Aneurysm. *Applications in Engineering Science*, **10**, Article ID: 100104. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2022.100104>
- [32] Rezaeitalahmahalleh, M., Lyu, Z., Mu, N., Wang, M., Zhang, X., Rasmussen, T.E., *et al.* (2024) Computational Hemodynamics-Based Growth Prediction for Small Abdominal Aortic Aneurysms: Laminar Simulations versus Large Eddy Simulations. *Annals of Biomedical Engineering*, **52**, 3078-3097. <https://doi.org/10.1007/s10439-024-03572-3>
- [33] Zhou, M., Shi, Z., Li, X., Cai, L., Ding, Y., Si, Y., *et al.* (2021) Prediction of Distal Aortic Enlargement after Proximal Repair of Aortic Dissection Using Machine Learning. *Annals of Vascular Surgery*, **75**, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.02.039>
- [34] 陈广新, 才莹, 郭金兴, 等. 基于血流动力学与形态学特征融合的动脉瘤破裂风险机器学习预测研究[J]. 新一代信息技术, 2023, 6(23): 9-14.