

主动脉：从血液通路到多功能器官

李庆国 Gabriele Piffaretti 马维国 Martin Czerny 孙立忠

基金项目：国家自然科学基金项目(82170503)

作者单位：210028 江苏省南京市，南京医科大学第二附属医院心血管外科(李庆国)；
意大利因苏布里亚大学瓦雷泽医院血管外科(Gabriele Piffaretti)；
美国康涅狄格州纽黑文市，耶鲁大学主动脉研究所(马维国)；
德国巴登-符腾堡州弗赖堡市，弗赖堡大学心血管外科(Martin Czerny)；上海德达医院心血管外科(孙立忠)

通信作者：李庆国，E-mail: liqg@njmu.edu.cn

【摘要】 主动脉疾病是一类可累及全身循环的高危心血管事件，其发生发展不仅是主动脉局部病理异常的结果，更与主动脉壁整体结构与功能失衡关系密切。主动脉作为连接心脏和身体各个器官组织的血液通路，承受着最高脉动压力与剪切力，其三层结构由多种组织成分构成，从近端至远端的胚胎学起源与力学特性存在差异。2023年，欧洲心胸外科学会和美国胸外科医师协会(EACTS/STS)主动脉指南首次提出“主动脉器官”概念，近年来研究表明，主动脉不仅是血液通路，更是集机械缓冲、精密调节、信号分泌和免疫代谢等不同功能于一体的多功能器官。将主动脉视为一个人体器官，不仅是理论上的进步，更会在临床实践、研究范式和患者管理等各个方面产生深远影响。在此基础上，我们提出主动脉医学(Aortic Medicine)或主动脉病学(Aortology)这一学科概念，在器官/学科视角下改变现行的诊疗模式。本文围绕“主动脉器官”的异质性基础与核心功能，综述其临床意义与研究范式转变，展望基于高质量临床证据、多组学/单细胞空间图谱、生物力学与人工智能融合的精准分层与个体化干预方向，以期为主动脉疾病的机制研究与器官导向管理策略提供参考。

【关键词】 主动脉器官；主动脉医学；多功能器官；研究范式；精准治疗；主动脉夹层

doi: 10.3969/j.issn.1672-5301.2026.01.001

中图分类号 R543.1 文献标识码 A 文章编号 1672-5301(2026)01-0001-04

The aorta: From a blood access to a multifunctional organ

LI Qing-guo, Gabriele PIFFARETTI, MA Wei-guo, Martin CZERNY, SUN Li-zhong. Department of Cardiovascular Surgery, The Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, 210028 Nanjing, China (LI Qing-guo); Department of Medicine and Surgery, University of Insubria, Varese University Hospital, 21100 Varese, Italy (Gabriele PIFFARETTI); Yale Aortic Institute, Yale University School of Medicine, 06511 New Haven, USA (MA Wei-guo); Clinic for Cardiovascular Surgery, Faculty of Medicine, University of Freiburg, 79106 Freiburg, Germany (Martin CZERNY); Department of Cardiovascular Surgery, DeltaHealth Hospital · Shanghai, 201300 Shanghai, China (SUN Li-zhong)

Corresponding author: LI Qing-guo, E-mail: liqg@njmu.edu.cn

【Fund program】 National Natural Science Foundation of China(82170503)

【Abstract】 Aortic diseases encompass a group of high-risk cardiovascular conditions that may compromise systemic circulation. Their initiation and progression are determined not only by focal anatomic abnormalities but also by global imbalance in the structure and function of the aortic wall. As the vascular conduit subject to the highest levels of pulsatile pressure and shear stress within the cardiovascular system, the aorta consists of multiple tissue constituents organized into the intima, media, and adventitia, and it exhibits marked proximodistal heterogeneity in embryological origin and biomechanical properties. The 2023 European Association for Cardio Thoracic Surgery/The Society of Thoracic Surgeon (EACTS/STS) guideline first introduced the concept of the “aortic organ”, underscoring that the aorta functions not merely as a passive blood conduit but as a multifunctional organ capable of mechanical buffering, precise regulation, signal secretion, and serving as an immunometabolic interface. Investigating the aorta as an organ represents not only a theoretical advancement

but also one with substantial implications for clinical practice, research frameworks, and patient management. We further propose the concepts of Aortic Medicine and Aortology, aiming to reshape current diagnostic and therapeutic models from an organ-based perspective. This review summarizes the heterogeneity and core functions of the aortic organ, discusses its clinical implications along with the associated paradigm shift in research, and highlights future directions for precision stratification and individualized interventions driven by high-quality clinical evidence, multi-omics / single-cell spatial atlases, and the integration of biomechanics with artificial intelligence. The ultimate goal is to inform mechanistic studies and develop organ-oriented management strategies for aortic diseases.

【Keywords】 Aorta organ; Aortic medicine; Multifunctional organ; Research paradigm; Precision therapy; Aortic dissection

2023 年 10 月, 欧洲心胸外科学会和美国胸外科医师协会(EACTS/STS)共同发布了由德国弗莱堡大学心脏中心的 Martin Czerny 教授执笔的急慢性主动脉器官综合征诊断和治疗指南^[1], 首次明确提出将主动脉视为一个人体器官。提出这一概念的理论基础是器官的定义, 即作为生物体中典型自成一体且承担特定生命功能的部分(part of an organism which is typically self-contained and has a specific vital function)。指南从主动脉发育的整体视角阐述了主动脉作为独立器官的异质性基础, 即从近端到远端(次级心脏区、神经嵴和中胚层)的胚胎学起源, 主动脉根部源自次级心脏原基细胞, 升主动脉和部分主动脉弓起源于神经嵴, 而主动脉远端部分则具有间充质来源^[2], 同时存在近端至远端弹性纤维数量递减的现象。本文将从多个角度, 进一步阐述主动脉不仅是连接心脏和身体各器官组织的通路, 也是具备多种功能的一个人体器官。

1 主动脉具备器官的核心特点

在解剖学与生理学范畴中, 人体器官(organ)是指由两种或两种以上不同类型的组织(tissue)按照特定结构规律有机结合, 共同执行某一或多种明确、关键生理功能的结构单位, 是人体结构与功能的核心载体, 也是构成系统(system)的基本单元。

①主动脉具备组织构成的多样性: 单层内皮细胞及内皮下层构成的内膜; 多层弹力纤维和胶原纤维以及血管平滑肌细胞等构成的中膜; 结缔组织、神经组织以及成纤维细胞构成的外膜。

②具有明确的形态和结构: 呈独特的弓形管道, 管壁主要由 40~70 层板层样结构高度特化形成, 具有明确的解剖边界。

③明确的生理功能: 除了血液运送功能, 主动脉还具有多种重要的其他生理功能。

④独立的病理与临床意义: 能够独立发生疾病, 其功能障碍会导致独特、可诊断的临床综合征,

如动脉瘤、主动脉夹层、动脉炎症等。

2 主动脉的其他功能

除了血液通路, 主动脉还具备多种其他功能。

2.1 血流动力学功能

①Windkessel 效应: 心脏收缩期扩张储存部分血流和势能, 舒张期弹性回缩释放, 将心脏的搏动性射血转化为平稳的持续血流, 维持舒张期血压和冠状动脉灌注^[3]。

②其顺应性可缓冲心脏收缩产生的压力波, 保护下游脆弱的微循环(如脑、肾)免受高压脉动的直接冲击。且通过分支结构和自身张力, 优化分配各器官系统的血流。

2.2 内分泌与信号功能

①内皮细胞持续释放一氧化氮、前列环素等, 实时调节血管张力、抑制血小板聚集, 维持血管稳态^[4]。

②作为产生肾素-血管紧张素系统的器官之一, 能分泌血管紧张素原等活性物质, 参与全身血压和水盐平衡的远程调节^[5,6]。

③主动脉在人类 30 岁左右即出现显著蛋白质稳态偏移, 是最早发生衰老相关变化的器官之一, 2025 年 10 月, Ding 等^[7]的研究提示, 动脉是分泌型衰老促进蛋白(称为衰老蛋白)的主要来源, 能放大全身衰老信号, 证明了其“衰老枢纽”的定位。

2.3 免疫与代谢界面功能

①主动脉内皮层是重要的免疫屏障, 调节白细胞黏附和迁移^[8], 外膜是活跃的免疫生态位。主动脉慢性炎症是动脉粥样硬化和动脉瘤等疾病的始动因素^[9]。

②血管平滑肌细胞和周围脂肪组织具有活跃的脂质代谢、糖代谢功能, 是血管壁健康的直接影响因素^[10]。

2.4 解剖结构功能 为冠状动脉、头臂血管等提供稳固的解剖起源和锚定点。主动脉形态的稳定性

是循环系统架构的基础^[1]。

总之,主动脉绝非被动的血液通道,而是一个集机械缓冲器、精密调节器、信号分泌器和免疫代谢平台于一体的多功能器官。

3 设立主动脉医学专业的重要意义

将主动脉作为一个独立的人体器官对待,设立主动脉医学专业的意义重大,不仅是理论上的进步,更会在临床实践、研究范式和患者管理等方面产生深远影响。

3.1 临床诊疗变革

①推动亚专业建立:促使主动脉医学(Aortic Medicine)或主动脉病学(Aortology)成为独立专业,集中心血管外科、心血管内科、影像、介入治疗、康复、遗传、生物力学、材料等多学科专业进行终身、系统化管理。

②革新治疗理念:从“处理局部病变”转向“维护整个器官功能”。例如,手术指征不仅参考直径,更要综合评估形态、生长速度、生物力学、机械应力及生物标志物。

③制定器官导向指南:2023年EACTS/STS指南明确提出了将主动脉作为器官进行诊疗,可以进一步制定更加细化、针对各种主动脉疾病诊治的指南。

3.2 研究范式升级

①探索独特的生理病理机制:主动脉是血管生物学的“天然模型”,健康的主动脉壁是精密的多层结构,承受着人体内最高的脉动压力与剪切力。主动脉夹层是主动脉壁结构衰败的“终极表现”,意味着这种结构的“灾难性失效”。通过研究这个“失效模型”,我们可以进一步了解血压、血流剪切力如何影响血管壁;细胞外基质(如胶原蛋白、弹性蛋白)的合成与降解平衡;血管平滑肌细胞的功能与凋亡机制等所有血管疾病(包括冠心病、周围血管病)的基础乃至血管生物学的基本规律。

②寻找新型生物标志物:寻找反映整个“主动脉器官健康状态”的标志物谱,而非单一病变指标。

③构建多维度研究模型:从分子、细胞到器官整体力学,进行系统性整合研究。

3.3 患者管理优化

①全程管理:确立从风险筛查、定期监测、择期干预到术后长期随访的全程管理路径。

②精准风险评估:利用分子生物学指标结合计算流体力学、人工智能等工具进行个体化风险预测,实现干预时机精准化。

③预防关口前移:重视危险因素控制、遗传咨询等一级预防,对高风险患者进行早期干预。

将主动脉定义为器官,将促使我们对主动脉的理解,从“心血管系统的一个被动部分”,转变为人体中一个功能多样、结构复杂且至关重要的独立功能单位。这种视角代表着心血管医学领域一次重要的范式变革。

4 主动脉研究的进一步探讨

4.1 构建高质量的临床证据体系 数十年以来,主动脉夹层等疾病发病率逐步上升,但相对于冠心病这样的高发疾病而言仍属“少见病”。在当前主动脉疾病的诊疗指南中,很多建议是基于低质量的证据(C级),主要来自小规模回顾性研究和专家意见^[1]。未来最紧迫的任务是开展大规模、前瞻性或回顾性、多中心临床研究^[12],以提供高质量证据。同时,亟需构建标准化的生物样本库与数据库,整合影像、基因组、临床结局等多方面的数据。

4.2 深入探索分子与细胞生物学 从“器官”视角出发,对主动脉壁的各层细胞及其微环境进行精细化研究。

①细胞图谱与细胞间对话:利用单细胞RNA测序、空间转录组学等技术,绘制健康与病变主动脉中所有细胞的分子图谱,研究平滑肌细胞、内皮细胞、免疫细胞等之间的相互作用^[13]。

②关注“被忽视”的微环境:深入研究血管外膜滋养血管、血管周围脂肪组织在主动脉稳态和疾病中的作用^[14],它们可能是新的治疗靶点。

4.3 实现多维度的机制解析与预测 这是连接基础研究与临床应用的桥梁,整合不同维度的信息是核心目标。

①结构-功能关联研究:利用多模态实验,同步获取主动脉组织的微观结构(如胶原、弹性蛋白排列)与其宏观力学行为,构建能预测疾病进展的数学模型^[15]。

②数据驱动的机制发现:应用机器学习从海量影像(如主动脉CT或核磁)和基因组数据中自动提取特征,发现新的表型-基因关联,揭示新的疾病通路^[13]。

4.4 开创精准治疗新模式

①构建人群危险分层体系:从年龄、性别等人口学资料到心血管疾病危险因素再到体液指标、影像数据、遗传特征、力学特性等,逐层识别出主动脉疾病高危人群并进行随访观察。

②构建个体化“主动脉时钟”:解码主动脉的分

子节律^[16,17];利用纵向数据建立主动脉直径、形态等生理病理状态与时间的关系模型^[18],寻找指示“时钟加速”(疾病快速进展)的生物标志物^[19],结合患者风险预测模型,最终构建一个多维度的融合模型,为风险人群提供综合全面且个体化的“主动脉健康指数”或“风险时间线”。

③对高危主动脉疾病患者的精准干预:基于“精确诊断”(基因、影像、生物力学)、通过“精细决策”(疗法、时机),实现“精心管理”(手术、药物、随访)。精准干预的实现有赖于多学科协作、先进技术评估和以患者为中心的个体化策略,目标是最大程度地延长患者生命、提高生活质量,并预防不良心血管事件的发生。

综上所述,将主动脉视为人体器官,设立主动脉医学专业,是一个从经验医学迈向精准系统医学的深刻变革,其核心路径是基于临床、影像和实验室数据,结合多组学、生物工程、力学、材料、人工智能等技术,从多维度解码这个复杂器官,最终建立基于高级别证据、个体化的全生命周期管理策略。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

5 参考文献

- [1] Czerny M, Grabenwoger M, Berger T, et al. EACTS/STS Guidelines for diagnosing and treating acute and chronic syndromes of the aortic organ[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2024, 65: ezad426.
- [2] ten Dijke P, Arthur HM. Extracellular control of TGFbeta signaling in vascular development and disease[J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2007, 8: 857-869.
- [3] Bader H. Dependence of wall stress in the human thoracic aorta on age and pressure[J]. *Circ Res*, 1967, 20: 354-361.
- [4] Mitchell JA, Ali F, Bailey L, et al. Role of nitric oxide and prostacyclin as vasoactive hormones released by the endothelium[J]. *Exp Physiol*, 2008, 93: 141-147.
- [5] Julien E, Biasch K, El Omar R, et al. Renin-angiotensin system is involved in embryonic emergence of hematopoietic stem/progenitor cells[J]. *Stem Cells*, 2021, 39: 636-649.
- [6] Cassis LA, Lynch KR, Peach MJ. Localization of angiotensinogen messenger RNA in rat aorta[J]. *Circ Res*, 1988, 62: 1259-1262.
- [7] Ding Y, Zuo Y, Zhang B, et al. Comprehensive human proteome profiles across a 50-year lifespan reveal aging trajectories and signatures[J]. *Cell*, 2025, 188: 5763-5784, e26.
- [8] Schuster L, Zaradzki M, Janssen H, et al. Heme oxygenase-1 modulates CD62E-dependent endothelial cell-monocyte interactions and mitigates HLA-I-induced transplant vasculopathy in mice[J]. *Front Immunol*, 2025, 16: 1447319.
- [9] Wagenhäuser MU, Mulorz J, Krott KJ, et al. Crosstalk of platelets with macrophages and fibroblasts aggravates inflammation, aortic wall stiffening, and osteopontin release in abdominal aortic aneurysm[J]. *Cardiovasc Res*, 2024, 120: 417-432.
- [10] Chen X, Chen R, Wu Y, et al. FABP5+ macrophages contribute to lipid metabolism dysregulation in type A aortic dissection[J]. *Int Immunopharmacol*, 2024, 143: 113438.
- [11] Ho SY, Sheppard MN. The aorta: Embryology, anatomy, and pathology. //Boudoulas H, Stefanadis C, Vlachopoulos. The aorta: Structure, function, dysfunction and diseases [J]. NY: Informa Healthcare, 2008: 6-21.
- [12] Ma WG, Chen Y, Chen SW, et al. Frozen elephant trunk for acute type A aortic dissection: Long-term outcomes over two decades [J]. *Eur Heart J*, 2026: ehaf1117.
- [13] Raghavan A, Pirruccello JP, Ellinor PT, et al. Using genomics to identify novel therapeutic targets for aortic disease [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2024, 44: 334-351.
- [14] Villacorta L, Chang L. The role of perivascular adipose tissue in vasoconstriction, arterial stiffness, and aneurysm [J]. *Horm Mol Biol Clin Investig*, 2015, 21: 137-147.
- [15] Pukaluk A, Sommer G, Holzapfel GA. Multimodal experimental studies of the passive mechanical behavior of human aortas: Current approaches and future directions [J]. *Acta Biomater*, 2024, 178: 1-12.
- [16] Reilly DF, Curtis AM, Cheng Y, et al. Peripheral circadian clock rhythmicity is retained in the absence of adrenergic signaling [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2008, 28: 121-126.
- [17] Nonaka H, Emoto N, Ikeda K, et al. Angiotensin II induces circadian gene expression of clock genes in cultured vascular smooth muscle cells[J]. *Circulation*, 2001, 104: 1746-1748.
- [18] Ng J, Ewe SH, Tan JL, et al. Longitudinal analysis of thoracic aortic expansion in non-syndromic real-world patients [J]. *Heliyon*, 2023, 9: e15823.
- [19] Song W, Fu G, Li Q, et al. BMAL1 insufficiency increases the risk of thoracic aortic aneurysm and dissection [J]. *Cardiovasc Res*, 2025: cvaf259.

(收稿日期:2025-12-25)