

血管组学: 从精准测量 走向临床前沿

● 本报记者 张思玮 ● 李春雨

组学思维革新血管研究范式

血管系统作为人体最庞大、最复杂的功能网络之一,贯穿各个器官与组织,在物质运输、能量供应、免疫调控以及细胞信号转导等关键生理过程中发挥核心作用。几乎所有重大疾病,包括动脉粥样硬化、脑卒中、肝硬化、肾小球硬化、恶性肿瘤乃至糖尿病等代谢性疾病,都与血管结构异常或功能障碍密切相关。

全球疾病负担数据显示,心血管疾病每年导致约 1941 万人死亡,占全球总死亡人数的 29%;恶性肿瘤相关死亡约 988 万(占 15%);肝病约 321 万(占 5%);糖尿病约 165 万(占 2%);肾脏病约 153 万(占 2%)。当前严峻的血管相关疾病负担状况反映了目前诊疗手段在应对复杂血管病变时的局限性,也凸显了血管相关研究在医学领域的重要价值。

中国科学院院士滕皋军在致辞中指出,学界普遍认同血管与多种疾病密切相关,但对血管整体性的理解仍显不足。近年来成像技术的进步使无创、微创观察血管成为可能,但现有研究多是零散的,缺乏系统性。

近年来,“组学”思维在医学研究中的普及,为血管学研究提供了新的突破口。从基因组学、蛋白质组学到代谢组学、影像组学等,研究者逐渐认识到,只有将不同层面的数据进行系统整合,才能真正把握生物体系的整体

规律。在这一背景下,血管组学应运而生,旨在整合不同器官和疾病的血管研究,为临床和基础科学提供统一的分析框架。

今年 3 月 6 日, *Cut* 在线发表的 *Vasomics of the Liver* 一文首次提出了血管组学概念,并系统阐述了其在肝脏疾病中的应用潜力。文章指出,血管组学以多模态、跨尺度的血管表征为核心研究对象,融合生物学、基础医学、临床医学与计算机科学等多学科力量,构建可解释模型,以系统解析血管的结构、功能及其在疾病发生发展中的动态变化。其最终目标是推动血管相关疾病在预防、诊断及治疗中的范式创新。

上述工作由 CHESS 肝脏健康联盟创始人祁小龙发起,数字医学工程全国重点实验室提供学术支持,复旦大学人类表型组研究院副研究员王成彦担任第一作者,滕皋军等多位国内外院士专家共同参与。

研究团队将肝脏血管表征划分为五类——解剖学、生物力学、生物化学、病理生理学及复合表征,其中复合表征能够更全面地反映疾病相关的血管变化。通过整合多模态影像、血管功能评估、病理图像及多组学数据,该研究揭示了血管在疾病发生、进展及治疗中的关键作用,为临床提供了新的诊疗思路。

在具体临床应用方面,多中心门静脉高压研究为血管组学提供了典型示例。祁小龙团队联合王成彦团队基于 973 例患者数据构建了血管组学模型,可在 CT 及 MRI 影像中实现高精度诊断。

据王成彦介绍,该模型在内部测试中准确率达 0.9,外部验证中心测试准确率约为 0.85,显示出较强的泛化性和鲁棒性。模型分析揭示了门脉高压患者特有的血管表型特征,包括远端血管丰富度增加、入肝处血管僵直

当前,超声血流成像技术不断发展,一系列新方法相继涌现,以应对传统彩色多普勒超声在临床应用中的诸多局限。传统彩超虽然在临床中应用广泛,但存在无法显示血流方向、对细小血管分辨率和灵敏度较低,以及无法对复杂血流进行定量测量等问题。为弥补这些不足,深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司超声影像团队先后研发了超声向量血流成像、超微血流成像、显微造影成像,并逐步推动其临床应用。

据该团队成员杜宜纲介绍,首先是 2015 年发展的超声向量血流成像技术。该技术通过多角度速度分量计算生成速度向量,实现血流的方向性可视化,并能进一步定量分析血管壁剪切应力、血流离散度等参数,这对于动脉粥样硬化及血流异常评估具有重要意义。与传统彩超相比,向量血流成像在复杂血流环境下提供了更加精确的定量信息,并已在颈动脉狭窄评估等临床研究中显示出优于传统方法的诊断精度。

其次是以超微血流成像技术为代表的微血管可视

中国工程院院士陈香美在会议总结时强调:“血管是人体器官中最为重要的组成部分之一。”

血管结构和功能的异常与多种疾病密切相关。解剖学层面,血管壁的增厚、扩张或狭窄等病理性重塑可导致血管结构失稳或器官灌注异常;生物力学层面,血流异常剪切应力和湍流等流体动力学紊乱通过机械转导影响内皮功能,促进炎症因子释放、氧化应激及细胞外基质重构;病理生理学层面,血管可通过黏附分子表达、白细胞募集等免疫调控参与血管相关炎症的发生。

及密度降低等,同时结合 30 余个关键指标的机器学习建模,在研究阶段实现了对传统有创测量的无创替代,为临床手术及药物治疗提供了可参考的决策依据。

王成彦表示,尽管血管组学在疾病诊断、疗效评估及健康管理中展现出广阔应用前景,但其发展仍面临若干挑战。首先,基础设施建设仍不足,包括数据库、标准化术语体系及分析工具不完善;其次,多模态测量及数据整合存在技术复杂性,需要跨学科协作解决时空

化进展。主要针对微小血管如肾脏叶间动脉和小叶间动脉,实现高分辨率血流可视化。该技术结合平面波多角度发射与时空滤波处理,可在多个位置同时进行脉冲多普勒测量,显著提高微血管血流的灵敏度和定量精度。

再次是显微造影成像技术。近年来,其成为超声领域的前沿技术。该技术基于微泡定位原理,能够突破光学衍射极限,实现数十微米级别的微血管超分辨率成像,不仅可用于微血管结构分析,如血管密度、灌注指数及分形维数提取,还在对肝脏肿瘤及急性肾损伤等患者的治疗中显示出显著临床价值。例如,微血管密度与心肌酶水平呈显著负相关,为早期肾损伤的诊断与疗效评估提供了可靠依据。

最后是该团队正在研发的无造影剂成像技术。该技术通过红细胞定位替代微泡定位,实现不依赖造影剂的超高分辨率血管成像,预计不久将投入临床应用。

杜宜纲表示,这些技术能够覆盖不同尺度的血管表征。宏观血管可通过向量血流成像实现血流方向及

正因为血管在不同器官和疾病中扮演复杂多样的角色,单一学科已难以全面揭示其作用机制。祁小龙指出,血管组学的提出正是为应对这一挑战——它将基础研究、临床应用和技术工具整合在同一平台,通过汇聚多学科专家的智慧,血管组学能够系统性地解析血管特征与疾病发生、发展及治疗之间的关联,不仅为科学研究与临床实践提供战略支撑,也为未来技术推广与跨领域协作奠定坚实基础。

如何推进血管组学从理念走向实践?祁小龙表示,

特性、数据标准化及质量控制问题;最后,临床转化仍需验证模型在多中心、多设备及不同人群中的稳定性和可靠性。

滕皋军强调,血管组学的发展关键在于数据积累,其价值不仅依赖复杂算法或计算能力,更在于高质量的数据。精准的血管表征和充分的数据积累,是人工智能及大模型得以有效应用、推动学科发展的基础。这一观点得到与会专家认同,专家们认为,血管组学本质上

血管壁剪切应力的可视化,适用于颈动脉狭窄等大血管疾病的评估;微观血管则可借助超微血流和显微造影成像实现更高分辨率的观察,用于反映肝脏、肾脏等器官微循环及肿瘤血管生成情况。通过从宏观到微观的连续观察,这些技术实现了血流动力学与血管结构部分关键表征的可视化。

此外,越来越多的研究发现,几乎所有重大慢性疾病都伴随着血管的重构与功能障碍,通过对人体血管系统性建模,整合多模态、跨尺度血管数据,可以对疾病的发生发展机制和过程进行整体性的研究,从而推动慢病治理领域范式的革新。

然而,研究人员在对多模态、跨尺度血管组学特征进行研究的过程中,仍然存在着诸多难点:其一,以 CT、MR 为代表的血管成像方法数据量大、不同影像和部位血管特征异质性高、人工标注效率低且难以标准化;其二,血管三维结构走行复杂,缺乏自动化的表征体系;其三,对血管的系统性分析需要融合解剖结构、功能特性、病理生理表型等多模态跨尺度表征,缺乏有

未来血管组学专家组将聚焦三大核心方向:技术创新研发、临床应用转化、国际开放合作。团队将依托数字医学工程全国重点实验室建立内部项目平台,推动血管组学研究落地临床。此外,专家组还将积极开展科普宣传,提升公众与医务人员对血管研究的认知水平,并计划在血管健康日举办国际血管组学研讨会,扩大国内外影响力,推动血管科学与医学迈向新阶段。

陈香美指出,当前血管组学仍面临诸多技术挑战,尤其是深层脏器血管难以直接观测的问题。她举例说

是一门建立在精准测量基础上的学科,测量的准确性决定了其研究与应用的价值。

与会专家表示,在此基础上,结合大数据资源与人工智能技术,不仅可以优化算法和分析方法,还能够推动跨疾病应用队列的构建,促进研究成果向临床实践转化。这将极大拓展血管组学在肝脏及其他器官疾病的诊断、治疗、健康监测与个体化医疗中的应用潜能,为其在精准医学领域发挥更深入、更广泛的作用提供坚实支撑。

效的分析和应用工具。

为此,商汤医疗与 CHESS 合作,以其在 AI 领域的深厚积累赋能血管组学,构建 AI 驱动的血管表征和预测体系。该体系基于多模态医学基模型群,可以实现头、颈、胸、腹、盆、四肢等全身常见部位血管成像类型的全覆盖,并对图像中的血管结构进行体素级的高精度提取和命名。

在此基础上,该体系构建了自动化的血管表征体系,在数分钟内即可完成血管表征的全链路处理,包括质控、期相识别、组织定位、血管分割命名、血管特征提取,无缝融入临床工作流程。基于血管组学特征,该体系应用混合专家模型进行特征筛选和建模,实现多模态跨尺度的血管表征集成与优化,应用于多种临床下游任务,并对特征进行重要性评价和可解释性分析。此外,基于商汤医疗独有的大模型智慧中枢“大医”,结合血管组学体系和临床知识库,可构建血管组学大模型智能体,服务于血管组学的基础研究和临床转化。

明,眼科领域借助 OCTA 技术已能够清晰呈现视网膜毛细血管及微循环状态,甚至监测血流动力学变化,但肝脏、肾脏等深层器官的微血管成像仍存在技术瓶颈。她同时强调,血管组学既是科学研究的前沿阵地,也是临床实践的重要突破口。

陈香美期望,通过产学研用多方协同、国内外跨学科专家的深度参与以及企业的创新技术支撑,血管组学有望加速临床转化,服务于早期诊断、精准干预和个体化治疗,为中国学者在血管组学领域取得重大突破奠定基础。