

· 综述 ·

## 颈动脉血管周围脂肪组织的影像学研究进展

李雯漪, 李 澄, 周 丹\*

南京医科大学附属明基医院放射科, 江苏 南京 210019

**[摘要]** 颈动脉血管周围脂肪组织(perivascular adipose tissue, PVAT)是一种特殊类型的脂肪组织,其与颈动脉外膜在解剖结构上紧密相连,并具有独特的组织学特征和生理功能特性。与普通脂肪组织不同,PVAT通过内分泌和旁分泌机制释放多种生物活性分子,与邻近的血管壁细胞相互作用,参与调控局部炎症反应和血管稳态。PVAT的炎症状态与颈动脉粥样硬化斑块的形成、进展及易损性密切相关,同时也在脑血管病变的发生发展中发挥重要作用。近年来,随着影像学技术的快速发展,无创评估PVAT的炎症状态成为可能。这些技术的应用为早期识别脑血管疾病高风险患者提供了新的工具,并有望优化脑血管疾病的预防策略和个性化治疗。文章系统综述了颈动脉PVAT的病理生理机制、影像学评估技术的最新进展及其在临床中的应用价值。

**[关键词]** 血管周围脂肪组织;颈动脉CT血管成像;动脉粥样硬化;脑血管疾病

**[中图分类号]** R814.42

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2025)07-1042-09

**doi:** 10.7655/NYDXBNSN250222

### Imaging research advances in carotid artery perivascular adipose tissue

LI Wenyi, LI Cheng, ZHOU Dan\*

Department of Radiology, the Affiliated BenQ Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210019, China

**[Abstract]** Perivascular adipose tissue (PVAT) of the carotid artery is a specialized type of adipose tissue closely adjacent to the arterial adventitia, possessing unique anatomical and functional characteristics. Unlike ordinary adipose tissue, PVAT releases a variety of bioactive molecules through endocrine and paracrine mechanisms, interacting with adjacent vascular wall cells and participating in the regulation of local inflammatory responses and vascular homeostasis. The inflammatory status of PVAT is closely associated with the formation, progression, and vulnerability of carotid atherosclerotic plaques, while also playing a critical role in the development and progression of cerebrovascular diseases. In recent years, with the rapid advancement of imaging technologies, non-invasive assessment of PVAT inflammation has become feasible. These techniques provide new tools for early identification of high-risk patients with cerebrovascular diseases and hold promise for optimizing preventive strategies and personalized treatment. This article systematically reviews the pathophysiological mechanisms of carotid PVAT, the latest advances in imaging assessment techniques, and their clinical application value.

**[Key words]** perivascular adipose tissue; carotid CT angiography; atherosclerosis; cerebrovascular disease

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(07): 1042-1050]

脑卒中是我国成年居民死亡及残疾的首位病因<sup>[1]</sup>,发病率总体保持稳定,患病率呈上升趋势<sup>[2]</sup>,动脉粥样硬化是其主要的病理机制<sup>[3]</sup>。缺血性脑卒

中是最常见的脑卒中亚型,占我国新发卒中的69.6%~72.8%<sup>[4]</sup>,大动脉粥样硬化是其主要病因,其中颅外段颈动脉粥样硬化占比15%~20%<sup>[5]</sup>。炎症在颈动脉粥样硬化中发挥着重要作用,血管周围脂肪组织(perivascular adipose tissue, PVAT)是一种特殊的脂肪结构,兼具内分泌和旁分泌功能,已被证实血管炎症中起重要作用<sup>[6]</sup>。与传统的血清炎症

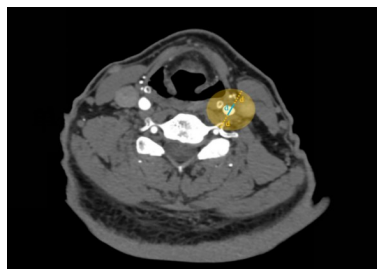
**[基金项目]** 南京市卫生科技发展专项资金(ZKX24064)

\*通信作者(Corresponding author), E-mail: Danny.zhou@Benq-medicalcenter.com(ORCID: 0000-0002-8961-5276)

标志物不同,对PVAT的评估可将炎症定位到靶血管。近年来,关于PVAT的研究逐渐受到关注,基于冠状动脉PVAT的相关研究已经证实PVAT的CT衰减值增加与炎症状态和斑块易损性密切相关<sup>[7-8]</sup>。颈动脉PVAT的影像学特征,也被逐步发现与颈动脉斑块易损性存在相关性,影响颈动脉粥样硬化的发生发展,因此笔者从颈动脉PVAT的定义和生物学作用机制、影像学技术发展及相关影像学的临床应用方面进行综述。

## 1 颈动脉PVAT的定义和生物学作用机制

PVAT是与血管外膜紧密相连的脂肪组织,与血管外膜没有解剖间隙,与邻近颈动脉血管壁之间形成一个相对独立的结构单元,存在于除脑血管外的大部分血管周围<sup>[9]</sup>。Antonopoulos等<sup>[10]</sup>进一步将PVAT定义为与血管管腔直径相等距离内的脂肪组织,这一定义适用于管腔直径 $<2\text{ cm}$ 的任何动脉,而对于管腔直径 $>2\text{ cm}$ 的动脉,则将PVAT按照惯例定义为血管外壁周围 $2\text{ cm}$ 范围内的脂肪组织<sup>[11]</sup>。颈动脉管腔直径一般 $<8\text{ mm}$ ,由此而来颈动脉PVAT可定义为颈动脉周围与管腔直径相等距离内的脂肪组织(图1)。



The luminal diameter of the carotid artery is defined as  $d$  (indicated by the blue line in the figure). PVAT is characterized as the adipose tissue surrounding the vessel wall, confined within a region extending to a maximum distance of  $d$  from the vessel wall (depicted by the yellow annular area in the figure).

图1 颈动脉PVAT范围示意图

Figure 1 Schematic illustration of the PVAT region surrounding the carotid artery

常规的脂肪组织包括白色脂肪、棕色脂肪和米色脂肪,而人类的PVAT作为一种特殊的脂肪组织,兼具白色脂肪和棕色脂肪的组织学特征,更具有独特的细胞组成和功能特征<sup>[12]</sup>。PVAT的脂肪细胞体积更小,分化程度更低,能够分泌更多的细胞因子<sup>[13]</sup>。因此,PVAT在功能上也与常规脂肪组织不同,PVAT不仅能够起到基本的支撑动脉管壁结

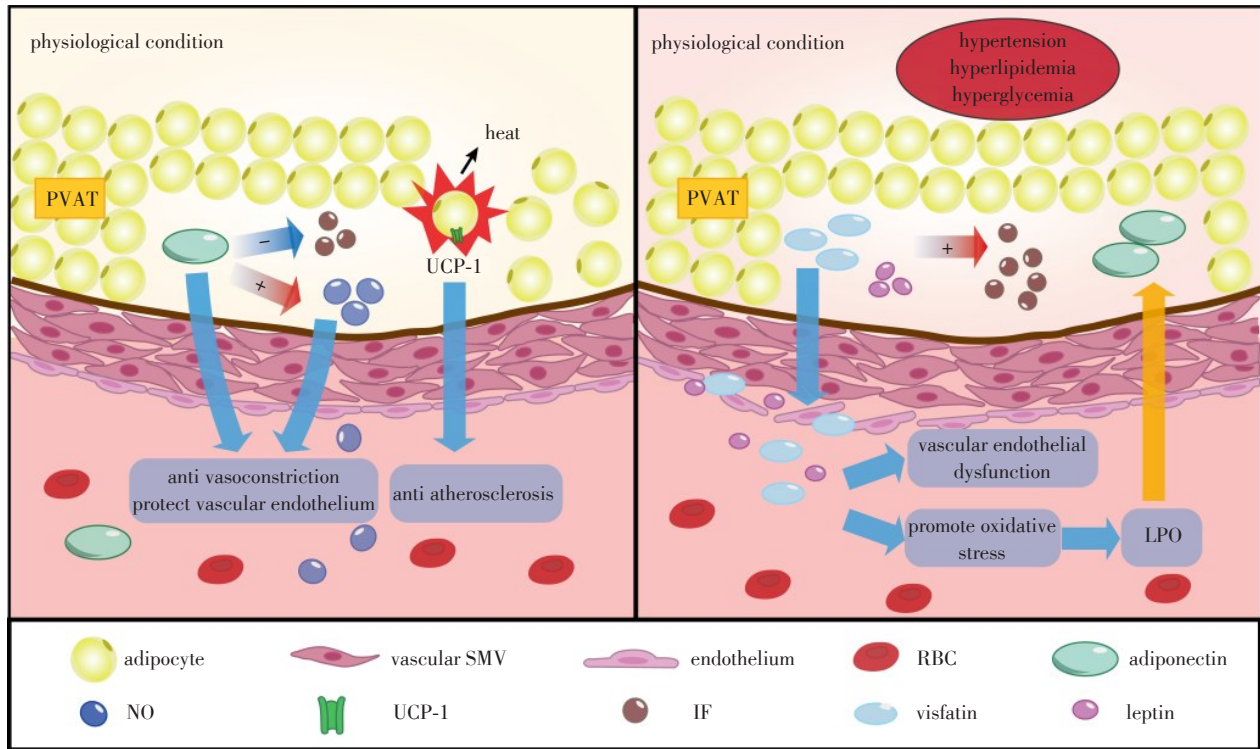
构的作用,还具备特殊的内分泌及旁分泌功能,可释放一系列生物活性分子,帮助调节血管功能,在炎症反应及代谢过程中发挥重要作用<sup>[14]</sup>。PVAT的分泌功能对血管稳态的调节具有“两面性”(图2)。在生理状态下,PVAT主要分泌一系列血管保护性因子如一氧化氮、脂联素等,发挥抗血管收缩、抗炎、抗氧化的保护作用<sup>[15]</sup>。棕色脂肪中特异性表达的解偶联蛋白-1(uncoupled protein-1,UCP-1)在PVAT中也可以表达,UCP-1产热消耗脂肪细胞,起到抗动脉粥样硬化作用,并且UCP-1还会减少活性氧(reactive oxygen species,ROS)的产生,起到抗氧化应激的效果<sup>[16]</sup>。而在病理条件下,高血压、高血脂、高血糖等会刺激PVAT,使之分泌功能失衡,内脂素<sup>[17]</sup>、瘦素<sup>[18]</sup>等炎症因子和趋化因子比例增加,反而加剧炎症反应,诱导动脉粥样硬化发生发展。PVAT除了通过分泌各种生物活性分子作用于血管壁“由外向内”地影响血管功能以外,多项研究已指出PVAT与邻近血管壁之间还存在“由内向外”的信号传递,即PVAT接受来自于血管的旁分泌信号,然后PVAT会改变自身的形态和脂肪因子的分泌以做出回应,从而将旁分泌作用重新施加到血管壁上,例如在病理状态下,血管壁分泌脂质过氧化产物扩散到周围的PVAT,激活过氧化物酶体增殖物激活受体信号转导通路,进而引发脂联素分泌水平上调,发挥抗炎、抗氧化作用<sup>[19]</sup>。总之,PVAT与其邻近血管壁之间是以复杂的“双向信号通信”的方式相互影响的。

炎症是颈动脉易损斑块发生发展的核心<sup>[20]</sup>。当血管炎症过程中产生的介质扩散到PVAT中时,会诱导脂肪组织分解并抑制脂肪合成,增加微血管通透性,引起血管周围水肿,最终导致PVAT的脂肪组成和密度发生变化<sup>[21]</sup>。颈动脉PVAT的变化在不同的影像学检查中具有不同的表现,可作为颈动脉血管炎症的血管外标志,实现对炎症的定位和量化。

## 2 颈动脉PVAT影像学技术发展

### 2.1 颈动脉CT血管成像(CT angiography, CTA)

颈动脉CTA广泛应用于颈动脉疾病的无创评估。CTA图像上颈动脉周围脂肪密度(pericarotid adipose tissue,PFD)升高已被证实与炎症有关,主要机制为炎症以旁分泌的形式驱动邻近血管周围脂肪组织内的脂肪细胞聚集减少,PVAT由亲脂性变为亲水性<sup>[22]</sup>。为了定量的表现这一现象,Antonopoulos等<sup>[10]</sup>提出了一种创新的影像学指标——脂



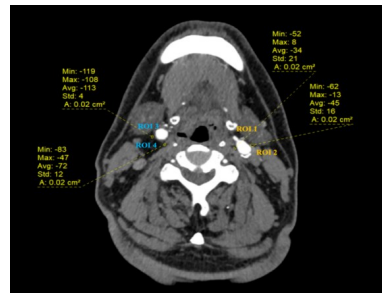
PVAT: perivascular adipose tissue; UCP-1: uncoupled protein-1; LPO: Lipid peroxidation; SMV: smooth muscle cell; RBC: red blood cell; NO: nitric oxide; IF: inflammation factor.

图2 PVAT分泌功能的两面性

Figure 2 The dual role of PVAT secretory function

肪衰减系数(fat attenuation index, FAI),该指标通过量化脂肪组织中脂质含量和细胞大小的变化,有效反映脂质相与水相之间的动态平衡状态,实现对血管炎症的定位及定量。FAI的测量可围绕动脉的任意节段,简而言之,FAI就是指所放置的感兴趣区内脂肪组织的平均CT衰减系数。基于Baradaran等<sup>[23]</sup>的测量方法,研究者通常使用医学影像归档与通信系统(picture archiving and communication system, PACS)对颈动脉CTA源图像进行分析,首先将窗宽固定设置为500 HU,窗位固定设置为100 HU,并在病变所在层面放置多个感兴趣区,每个感兴趣区要求面积相等,且避开邻近血管壁及其他软组织结构,最后计算各感兴趣区所测出CT衰减系数的平均值作为最终结果。图3以颈动脉斑块研究为例,具体展示了PFD的测量方法。目前暂无软件可实现PFD的自动化测量,主要依靠研究者肉眼基于脂肪组织CT衰减系数范围以及定义划分的PVAT范围进行人工测量,受主观性影响较大,因此,在测量时推荐多名研究者多次测量取平均值以确定最终PFD数值。

在常规颈动脉CTA成像过程中,由于高浓度对比剂的存在,容易产生较强的X线束硬化伪影,会



The axial slice with the largest carotid artery plaque area and the most severe luminal stenosis was selected. After setting a fixed window width and window level (500 HU and 100 HU, respectively), regions of interest (ROIs) were placed on the plaque side (left side) as ROI1 and ROI2. The PFD on the plaque side was calculated as the average of ROI1 and ROI2, expressed as  $PFD_{\text{plaque side}} = (ROI1 + ROI2) / 2$ . Similarly, ROIs were placed on the non-plaque side (right side) as ROI3 and ROI4, and the PFD on the non-plaque side was calculated as the average of ROI3 and ROI4, expressed as  $PFD_{\text{non-plaque side}} = (ROI3 + ROI4) / 2$ .

图3 PFD的测量方法:以颈动脉斑块研究为例

Figure 3 Measurement methodology of PFD: a case study on carotid artery plaque

影响血管内成分及血管周围组织的显影,从而影响图像质量及后续诊断的准确性。延迟扫描技术可改善图像质量、更加准确测量CT值,并保持颅内血

管的动脉期显影良好<sup>[24]</sup>。陈喜花等<sup>[25]</sup>通过对比分析颈动脉CTA常规动脉期及延迟扫描期图像发现,有症状者的颈动脉PVAT在两期扫描中均表现出比无症状者更高的强化率。此外,该研究还证实PVAT的强化率与斑块强化率也具有相关性。

## 2.2 双能CT

双能CT(dual-energy CT, DECT)是一种通过1次扫描可获得2种不同能级下图像的CT扫描技术。相比传统颈动脉CTA,双能CT具有独特的虚拟平扫功能(virtual non-contrast, VNC),可增加软组织碘剂的对比度,改善动脉可视化,更清楚地显示血管内及周围组织特征<sup>[26]</sup>。双能CT可以提供一种新的脂肪定量参数——颈动脉血管周围脂肪分数(perivascular fat fraction, PVFF)<sup>[27]</sup>,再结合常规双能CT定量参数特征,如碘浓度、有效原子序数、能谱曲线斜率、电子密度、双能指数,可帮助显示PVAT内部物质成分及其变化。张何等<sup>[28]</sup>利用双能CTA技术,对颈动脉PVAT特征进行深入分析,利用定量参数构建了预测模型,该模型能够有效预测急性脑卒中事件发生,这一研究为脑卒中的早期风险评估又提供了一种新型工具。

## 2.3 影像组学

影像组学是一种通过自动化算法从医学影像图像中提取感兴趣区域的数据,并将其转化为高分辨率、可挖掘的特征空间数据的技术。影像组学最终转化出的定量数据能够详细描述病变的特征及其空间复杂性,为医学诊断和研究提供有力支持<sup>[29]</sup>,补充了FAI无法揭示PVAT内部细微结构成分的不足,提供更全面精准的信息为临床实践提供决策支持。王伟康等<sup>[30]</sup>从颈动脉PVAT图像中提取了大量影像组学特征,基于多种机器学习算法对这些特征进行深度分析,发现颈动脉PVAT影像组学在预测急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)方面展现出了极为显著的应用价值,有助于临床医生早期发现AIS潜在风险,及时采取干预措施,改善患者预后。

## 2.4 磁共振(magnetic resonance, MR)

与CTA相比,MR具有更高的软组织分辨率,这可能有利于PVAT的表征,同时能够避免CTA成像中的辐射暴露,并且,高分辨率MR血管壁成像技术还可对动脉粥样硬化斑块内部的成分及结构进行更加细微、直观的显示<sup>[3]</sup>,故MR在评估PVAT炎症状态方面具有很大的潜力。Yu等<sup>[31]</sup>利用多对比度MR血管壁成像技术对血管壁进行了高分辨率成

像,在动脉造影TOF-MRA图像上测量出多个层面颈动脉PVAT的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和对比度噪声比(contrast-to-noiseratio, CNR),同时依据T1WI、T2WI、TOF-MRA及增强图像评估颈动脉粥样硬化斑块的多项易损特征,分析结果发现TOF-MRA图源测量的颈动脉PVAT的SNR与斑块内出血(intraplaque hemorrhage, IPH)显著相关,CNR与富含脂质的坏死核心(lipid-rich necrotic core, LRNC)、钙化的存在显著相关,提示颈动脉PVAT的信号强度可能是预测易损斑块的可靠指标。然而TOF-MRA图像血流饱和和效应较为明显,可能会对邻近的PVAT信号产生影响,对脂肪组织的范围划分可能不够准确,未来如能够实现MR图像上对PVAT的定量成像如利用Dixon技术,可能能够更好地确定PVAT的炎症状态。

## 3 颈动脉PVAT影像学的临床应用

### 3.1 颈动脉PVAT与颈动脉粥样硬化斑块

PVAT与动脉粥样硬化发生发展有关<sup>[15, 32-33]</sup>。在临床实践中,颈动脉斑块所致血管狭窄程度一直是评估颈动脉粥样硬化以及预测缺血性事件风险的关键指标。毛玲群等<sup>[34]</sup>发现患者颈动脉狭窄侧的PFD高于对侧,且狭窄侧PFD随狭窄严重程度加重而增加。并且,进一步研究发现在狭窄侧,有症状组患者的PFD也比无症状组高。这可能是因为颈动脉狭窄处局部血流动力学发生改变,影响了邻近PVAT的代谢和炎症状态。Liu等<sup>[35]</sup>结合PFD和管腔狭窄程度构建出了联合模型,该模型可以有效预测中度及以上狭窄患者未来卒中的发生风险。

目前对颈动脉粥样硬化斑块的研究重点已从斑块所致管腔狭窄转移到易损斑块上<sup>[36]</sup>。易损斑块的主要影像学特征包括:①IPH;②LRNC和纤维帽变薄或破裂(thinning or rupture of the fibrous cap, TRFC);③斑块炎症和斑块内新生血管形成;④斑块强化;⑤管腔正性重构<sup>[3]</sup>。

炎症是易损斑块发展的核心机制<sup>[37]</sup>,临床评估炎症水平主要依靠于血清炎症标志物,用于多种疾病的监测和治疗,如高敏C反应蛋白(hypersensitive C-reactive protein, hs-CRP)是心血管疾病的重要危险标志物,其水平升高提示动脉粥样硬化斑块内存在炎症活动<sup>[38]</sup>;并且,一项针对女性患者的研究显示hs-CRP水平升高,卒中事件的累积发生率也越高,在长达30年的预测期内具有风险预测能力<sup>[39]</sup>。但是,传统的血清炎症标志物反映的是全身炎症的

整体情况,无法做到特异性地反映特定血管局部的炎症状态,与动脉粥样硬化斑块易损特征的相关性也较弱。Mao等<sup>[40]</sup>发现PFD与炎症循环标志物有关,颈动脉PVAT炎症可认为是全身循环炎症的一部分,且与颈动脉易损斑块及其所造成的局部管腔狭窄相关,正好弥补了上述不足。炎症细胞的侵袭诱发了血管的初期损伤,这一过程促使斑块内部的新生血管发生破裂,进而引发IPH<sup>[41]</sup>。IPH被认为是与脑卒中发生相关性最强的影像学参数<sup>[42]</sup>。多项研究已证实PFD与颈动脉IPH独立相关,可作为新的识别颈动脉IPH和风险分层的标志物,预示PVAT可能在IPH的发生中起关键作用<sup>[43-46]</sup>。LRNC是脑卒中发生风险的预测指标之一<sup>[47]</sup>,而TRFC是同侧急性脑梗死的独立预测因子<sup>[48]</sup>。LRNC体积越大,纤维帽越容易破裂,斑块破裂风险越高<sup>[49]</sup>。Yu等<sup>[44]</sup>证实PFD与TRFC显著相关;除PFD以外,徐含波等<sup>[45]</sup>在斑块所致管腔最狭窄层面上还勾画出颈部皮下脂肪密度(cervical subcutaneous fat density, CSFD),最终发现LRNC及TRFC组的PFD/CSFD值更低,与斑块易损性增加相关。在影像学检查中,颈动脉斑块的强化现象具有重要的临床价值。斑块强化往往表明斑块内部存在较为活跃的炎症反应,提示斑块的易损性,并且与脑卒中发生独立相关<sup>[49]</sup>。在对100例颈动脉PVAT的CT值及斑块特征进行分析后,Saba等<sup>[50]</sup>发现斑块强化程度与颈动脉PVAT的CT衰减增加呈正相关,这一研究结果说明颈动脉PVAT的CT衰减可作为易损斑块的潜在影像学标志物。正性重构是指在动脉粥样硬化病变进展过程中,随着斑块体积的增加,血管的外弹力膜的横断面面积相应扩大,以延缓斑块所致的血管管腔狭窄的代偿性现象。颈动脉的正性重构可能是易损斑块的独立预测指标<sup>[51]</sup>,Kashiwazaki等<sup>[52]</sup>研究表明PFD与管腔正性重构也存在相关性,且在轻度狭窄的症状性斑块中,重构指数越高,PFD越高。

### 3.2 颈动脉PVAT与脑卒中

因动脉局部缺血导致的持续时间>24 h的神经功能障碍发作被视为脑卒中,否则称为短暂脑缺血发作(transient ischemic attack, TIA)<sup>[53]</sup>。Baradaran等<sup>[23]</sup>发现与无症状的颈内动脉相比,发生脑卒中或TIA的同侧颈内动脉的PFD明显更高,且无症状斑块的狭窄侧PFD也高于非狭窄侧,这一研究结果为未来利用颈动脉PVAT特征预测脑卒中的首发及复发提供了理论依据。

脑卒中亚型中最常见的是AIS,颈动脉粥样硬

化是其重要的危险因素<sup>[3]</sup>。余苗等<sup>[54]</sup>观察到AIS患者的PFD较健康对照组升高,且在梗死发生侧的PFD较对侧非梗死侧升高,这说明动态监测PFD可能会为急性脑血管事件的预测提供一定帮助。在AIS的早期阶段,再灌注治疗可以快速恢复病变区域的脑血流,帮助改善患者的神经功能,主要包括静脉溶栓和机械取栓。静脉注射组织型纤溶酶原激活剂(intravenous tissue plasminogen activator, IV-tPA)进行溶栓是治疗AIS的有效方法,推荐药物是阿替普酶,但这一方法在我国的使用率并不高,主要原因是担心严重的治疗后并发症影响术后患者脑功能恢复<sup>[55]</sup>。Gencer等<sup>[56]</sup>在实验中纳入仅使用IV-tPA进行溶栓治疗的AIS患者,在病变同侧及对侧的颈动脉测量PFD的平均值和最大值,发现急诊CTA测量的病变同侧PFD的最大值越高,IV-tPA治疗后患者功能预后越差,且病变同侧PFD的最大值是治疗后患者脑功能恢复的独立预测因子。证明PFD在IV-tPA治疗的AIS患者的预后预测中具有实用价值。机械取栓也具有良好的治疗效果,尤其适用于前循环大血管闭塞和基底动脉闭塞,对于发病时间在24 h内但超过静脉溶栓时间窗的患者,也可考虑直接进行机械取栓。Jin等<sup>[57]</sup>针对因前循环大血管闭塞而接受机械取栓治疗的患者展开研究,评估了术前PFD对术后脑血流再灌注、脑功能恢复及病死率的影响,发现机械取栓术前PFD增高是AIS患者术后脑动脉血运重建较差、脑功能恢复较差的预测指标,且最终死亡患者的PFD高于存活患者。

经标准检查方法仍无法查明病因,即TOAST分型无法归因于大动脉粥样硬化、小动脉粥样硬化及心源性栓塞的脑卒中称之为不明原因栓塞性卒中(embolic strokes of undetermined source, ESUS)<sup>[58]</sup>,ESUS目前无明确且有效的二级预防措施,早期诊断尤其重要。Hu等<sup>[59]</sup>发现在ESUS中也存在梗死同侧PFD高于非梗死侧,且危险因素与大动脉粥样硬化型卒中相似。

### 3.3 颈动脉PVAT与脑小血管病(cerebral small-vessel disease, CSVD)

颈动脉PVAT的炎症状态与动脉粥样硬化密切相关,而动脉粥样硬化又是CSVD的重要危险因素,PFD与CSVD之间也可能存在相关性。Zhang等<sup>[60]</sup>证实PFD升高与CSVD中血管源性腔隙的存在、脑白质高信号的分级都具有相关性,虽然这可能与肥胖相关因素介导有关,但在调整了糖尿病、血脂异常等临床参数后,PFD与CSVD仍然具有显著的相关性。

### 3.4 颈动脉 PVAT 与高血压

高血压是脑卒中等脑血管病变发生及复发的共同危险因素,炎症和高血压之间互为因果,炎症可导致高血压的发生和发展,而高血压本身也可通过机械损伤和氧化应激进一步激活炎症反应。Liu 等<sup>[61]</sup>发现在同样存在颈动脉斑块的前提下,高血压组的斑块侧 PFD 比非高血压组的 PFD 更高,且动脉增强期的净增强值更高,说明 PVAT 炎症与高血压密切相关。

总之,颈动脉 PVAT 参与多种脑血管病变的发生发展,为脑血管病变的病理机制解读提供了新的视角,并可为相应脑血管病变的风险监测及预后预测提供重要临床价值。颈动脉 PVAT 与多项脑血管病变之间的种种连续或许可以用泛血管疾病的理论来解释。广义的泛血管疾病包括小血管、微血管、静脉以及肿瘤、糖尿病和免疫性血管疾病,以动脉粥样硬化为共同特征。动脉粥样硬化是一种系统性疾病,对全身多个血管床都会产生影响,但会因部位、结构的差异,在不同血管床内具有不同的表现<sup>[62]</sup>。研究发现不同部位血管床疾病常合并存在,且在颈动脉或下肢动脉疾病患者中出现多血管疾病的概率更高,并且,受累血管床数量增加,发生不良心血管事件的风险也增加<sup>[63]</sup>。因此,对于动脉粥样硬化患者,除了已明确诊断的病变血管床以外,也应关注到其他血管床病变及高危因素的早期诊断、筛查。

## 4 小结与展望

综上所述,颈动脉 PVAT 通过其独特的内分泌和旁分泌功能,在调节局部炎症反应和维持血管稳态中发挥着重要作用。颈动脉 PVAT 与邻近血管壁的相互作用不仅参与了颈动脉粥样硬化易损斑块的形成和演变,更与脑血管病变的发生和发展密切相关。这一发现为理解脑血管疾病的病理生理机制提供了新的视角。

通过先进的影像学技术无创评估颈动脉 PVAT 的炎症状态,有望帮助实现早期识别脑卒中高风险患者,还可能为个体化治疗方案的制定提供重要依据。这种基于 PVAT 炎症状态的评估方法有望成为优化脑血管病变预防和治疗策略的新型生物标志物,为临床决策提供有力支持。虽然 PVAT 影像学研究在心血管风险评估中具有较大潜能,但其仍面临多项挑战和局限性:①不同影像学检查技术之间的结果差异。在 CT 检查中,颈动脉 PVAT 主要基于

CT 值进行定量分析,结果会受到辐射剂量、扫描参数、图像重建算法等影响。并且,当颈动脉斑块含较大钙化成分时,较重的钙化伪影也会影响 PVAT 的 CT 值测量。此外,当 PVAT 体积较小时,精准放置感兴趣区也会比较困难,影响结果的评估。而 MRI 检查虽然有更优的软组织对比度,但容易受运动伪影干扰,MRI 的脂肪信号阈值也缺乏共识。所以,不同研究对 PVAT 体积、密度/信号特征的测量可能不一致,导致研究结果之间难以直接比较。②PVAT 标准化评估方法的缺乏。PVAT 与周围其他脂肪组织(如皮下脂肪)的解剖边界难以精确分割,尤其当存在纤维化或炎症浸润时。目前颈动脉 PVAT 自动化分割测量工具的准确性和可重复性尚未得到验证,依赖于研究者的手动测量,人为偏差较大。未来需要通过多中心协作、检查技术改进与创新、推动标准化评估方案建立等,解决这些实际问题,才能使颈动脉 PVAT 成为可实际广泛应用于临床的可靠的影像学标志物。

未来的研究应当着重关注以下几个方向:首先,深入阐明颈动脉 PVAT 在脑血管病变中的具体分子机制,特别是其与血管壁细胞(如内皮细胞、平滑肌细胞)的相互作用机制;其次,探索 PVAT 炎症状态与不同脑血管病变亚型(如缺血性卒中、出血性卒中、动脉硬化、血管性痴呆等)之间的特异性关联;最后,通过更多研究数据建立起标准化的 PVAT 炎症评估体系,并将其整合到现有的脑血管病风险评估模型中,有望显著提高脑血管疾病的早期预警能力,开发针对 PVAT 炎症调控的新型治疗靶点,最终改善患者预后。另外,若能开发相关人工智能软件实现对 PFD 的自动化测量,将大大提高结果的准确性和可重复性,为开展更多大规模前瞻性队列研究提供有力的技术支持。

总之,颈动脉 PVAT 的研究为脑血管疾病的防治开辟了新的途径,随着对其病理生理机制的深入理解和评估技术的不断进步,基于颈动脉 PVAT 的精准医学策略有望在未来脑血管疾病的预防、诊断和治疗中发挥重要作用。

#### 利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

#### Conflict of Interests:

The authors have declared that no competing interests exist.

#### 作者贡献声明:

李雯漪负责文献收集、资料分析、论文撰写与修改;李澄、周丹负责研究方向指导、论文修改。

**Author's Contributions:**

LI Wenyi was responsible for literature collection, data analysis, and manuscript writing and revision; LI Cheng and ZHOU Dan were responsible for research direction guidance and manuscript revision.

## [参考文献]

- [1] ZHOU M, WANG H, ZENG X, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990-2017: a systematic analysis for the global burden of disease study 2017[J]. *Lancet*, 2020, 396(10243): 26
- [2] 《中国脑卒中防治报告》编写组.《中国脑卒中防治报告2021》概要[J]. *中国脑血管病杂志*, 2023, 20(11): 783-793  
Report on Stroke Prevention and Treatment in China Writing Group. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2021 [J]. *Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases*, 2023, 20(11): 783-793
- [3] SABA L, SAAM T, JÄGER H R, et al. Imaging biomarkers of vulnerable carotid plaques for stroke risk prediction and their potential clinical implications [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(6): 559-572
- [4] MA Q, LI R, WANG L, et al. Temporal trend and attributable risk factors of stroke burden in China, 1990-2019: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet Public Health*, 2021, 6(12): e897-e906
- [5] MAC GRORY B, YAGHI S, CORDONNIER C, et al. Advances in recurrent stroke prevention: focus on antithrombotic therapies[J]. *Circ Res*, 2022, 130(8): 1075-1094
- [6] KOENEN M, HILL M A, COHEN P, et al. Obesity, adipose tissue and vascular dysfunction [J]. *Circ Res*, 2021, 128(7): 951-968
- [7] GOELLER M, ACHENBACH S, CADET S, et al. Pericoronary adipose tissue computed tomography attenuation and high-risk plaque characteristics in acute coronary syndrome compared with stable coronary artery disease [J]. *JAMA Cardiol*, 2018, 3(9): 858-863
- [8] OIKONOMOU E K, ANTONOPOULOS A S, SCHOTTLANDER D, et al. Standardized measurement of coronary inflammation using cardiovascular computed tomography: integration in clinical care as a prognostic medical device [J]. *Cardiovasc Res*, 2021, 117(13): 2677-2690
- [9] ADACHI Y, UEDA K, NOMURA S, et al. Being of perivascular adipose tissue regulates its inflammation and vascular remodeling[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5117
- [10] ANTONOPOULOS A S, SANNA F, SABHARWAL N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat [J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(398): eaal2658
- [11] ANTONIADES C, TOUSOULIS D, VAVLUKIS M, et al. Perivascular adipose tissue as a source of therapeutic targets and clinical biomarkers[J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(38): 3827-3844
- [12] MAZITOVA A M, MÁRQUEZ-SÁNCHEZ A C, KOLTSOVA E K. Fat and inflammation: adipocyte - myeloid cell crosstalk in atherosclerosis[J]. *Front Immunol*, 2023, 14: 1238664
- [13] IACOBELLIS G. Epicardial adipose tissue in contemporary cardiology[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2022, 19(9): 593-606
- [14] NAPPI F, FIORE A, MASIGLAT J, et al. Endothelium-derived relaxing factors and endothelial function: a systematic review[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(11): 2884
- [15] CHENG C K, DING H, JIANG M, et al. Perivascular adipose tissue: fine-tuner of vascular redox status and inflammation[J]. *Redox Biol*, 2023, 62: 102683
- [16] CHEN J Y, WU Y P, LI C Y, et al. PPAR $\gamma$  activation improves the microenvironment of perivascular adipose tissue and attenuates aortic stiffening in obesity [J]. *J Biomed Sci*, 2021, 28(1): 22
- [17] ZHOU Y, LI H, XIA N. The interplay between adipose tissue and vasculature: role of oxidative stress in obesity[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 650214
- [18] LIU L, SHI Z, JI X, et al. Adipokines, adiposity, and atherosclerosis[J]. *Cell Mol Life Sci*, 2022, 79(5): 272
- [19] SAXTON S N, WITHERS S B, HEAGERTY A M. Perivascular adipose tissue anticontractile function is mediated by both endothelial and neuronal nitric oxide synthase isoforms[J]. *J Vasc Res*, 2022, 59(5): 288-302
- [20] KONG P, CUI Z Y, HUANG X F, et al. Inflammation and atherosclerosis: signaling pathways and therapeutic intervention[J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2022, 7(1): 131
- [21] 张文娜, 朱浩, 王晓东. 血管周围脂肪与心血管疾病的研究进展[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(5): 725-731  
ZHANG W N, ZHU H, WANG X D. Research progress of perivascular adipose tissue and cardiovascular disease[J]. *Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences)*, 2023, 43(5): 725-731
- [22] LIU X, WU F, JIA X, et al. Pericarotid adipose tissue computed tomography attenuation distinguishes different stages of carotid atherosclerotic disease: a cross-sectional study [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(12): 8247-8258
- [23] BARADARAN H, MYNENI P K, PATEL P, et al. Association between carotid artery perivascular fat density and cerebrovascular ischemic events[J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7(24): e010383

- [24] YUAN D, LI L, ZHANG Y, et al. Image quality improvement in head and neck CT angiography: individualized post-trigger delay versus fixed delay [J]. *Eur J Radiol*, 2023, 168: 111142
- [25] 陈喜花, 陈尧, 樊树峰, 等. 基于计算机断层血管造影探讨颈动脉血管周围脂肪组织强化与斑块易损特征之间的关系[J]. *心脑血管病防治*, 2024, 24(4): 10-14  
CHEN X H, CHEN Y, FAN S F, et al. Relationship between enhancement of perivascular adipose tissue and vulnerable plaque characteristics in carotid arteries explored by computed tomographic angiography [J]. *Cardio-Cerebrovascular Disease Prevention Treatment*, 2024, 24(4): 10-14
- [26] XU Y K, CHAI T T, WANG J W, et al. Optimal virtual monochromatic images for assessing metastatic lateral cervical lymph nodes in patients with papillary thyroid carcinoma using dual-layer spectral detector computed tomography [J]. *Eur J Radiol*, 2024, 178: 111623
- [27] WU Z J, HIPPE D S, ZAMORA D A, et al. Accuracy of dual-energy computed tomography techniques for fat quantification in comparison with magnetic resonance proton density fat fraction and single-energy computed tomography in an anthropomorphic phantom environment [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2021, 45(6): 877-887
- [28] 张何, 龙娟, 王晨子, 等. 构建急性脑卒中事件发生的双能量颈动脉血管周围脂肪组织预测模型[J]. *临床放射学杂志*, 2025, 44(1): 53-58  
ZHANG H, LONG J, WANG C Z, et al. Development of a dual-energy carotid artery perivascular adipose tissue prediction model for acute stroke events [J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2025, 44(1): 53-58
- [29] KOLOSSVÁRY M, KELLERMAYER M, MERKELY B, et al. Cardiac computed tomography radiomics: a comprehensive review on radiomic techniques [J]. *J Thorac Imaging*, 2018, 33(1): 26-34
- [30] 王伟康, 陈炜越, 赵挺, 等. 基于颈动脉周围脂肪组织影像学预测急性缺血性卒中[J/OL]. *温州医科大学学报*, 2025 [2025-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1386.R.20241231.1541.012.html>  
WANG W K, CHEN W Y, ZHAO T, et al. Prediction of acute ischemic stroke based on radiomics of carotid adipose tissue: a multicenter and multi classifier study [J/OL]. *Journal of Wenzhou Medical University*, 2025 [2025-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1386.R.20241231.1541.012.html>
- [31] YU S, HUO R, QIAO H, et al. Carotid artery perivascular adipose tissue on magnetic resonance imaging: a potential indicator for carotid vulnerable atherosclerotic plaque [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(12): 7695-7705
- [32] LIN A, DEY D, WONG D T L, et al. Perivascular adipose tissue and coronary atherosclerosis: from biology to imaging phenotyping [J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2019, 21(12): 47
- [33] CAI M, ZHAO D, HAN X, et al. The role of perivascular adipose tissue-secreted adipocytokines in cardiovascular disease [J]. *Front Immunol*, 2023, 14: 1271051
- [34] 毛玲群, 何欣威, 瞿曼, 等. 颈动脉周围脂肪密度与颈动脉狭窄以及预后的关系[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2024, 32(3): 211-216  
MAO L Q, HE X W, QU M, et al. Association between carotid artery perivascular fat density and carotid artery stenosis, prognosis [J]. *Chinese Journal of Arteriosclerosis*, 2024, 32(3): 211-216
- [35] LIU Y, ZHAO Y, GUO Z, et al. A novel predictive model based on pericarotid adipose tissue and lumen stenosis for stroke risk in patients with asymptomatic carotid stenosis [J]. *J Investig Med*, 2024, 72(3): 270-278
- [36] BARADARAN H, EISENMENGER L B, HINCKLEY P J, et al. Optimal carotid plaque features on computed tomography angiography associated with ischemic stroke [J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(5): e019462
- [37] LIBBY P. The changing landscape of atherosclerosis [J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 524-533
- [38] CEDERSTRÖM S, LUNDMAN P, ALFREDSSON J, et al. Association between high-sensitivity C-reactive protein and coronary atherosclerosis in a general middle-aged population [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 12171
- [39] RIDKER P M, MOORTHY M V, COOK N R, et al. Inflammation, cholesterol, lipoprotein (a), and 30-year cardiovascular outcomes in women [J]. *N Engl J Med*, 2024, 391(22): 2087-2097
- [40] MAO L, CHEN L, QU M, et al. Pericarotid adipose tissue is associated with circulatory markers of inflammation and carotid atherosclerosis [J]. *Angiology*, 2024, doi: 10.1177/00033197241248776
- [41] MICHEL J B, VIRMANI R, ARBUSTINI E, et al. Intra-plaque haemorrhages as the trigger of plaque vulnerability [J]. *Eur Heart J*, 2011, 32(16): 1977-1985
- [42] SAKAMOTO A, SUWA K, KAWAKAMI R, et al. Significance of intra-plaque hemorrhage for the development of high-risk vulnerable plaque: current understanding from basic to clinical points of view [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(17): 13298
- [43] ZHANG S, GU H, YU X, et al. Association between carotid artery perivascular fat density and intraplaque hemorrhage [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 735794

- [44] YU M, MENG Y, ZHANG H, et al. Associations between pericarotid fat density and image-based risk characteristics of carotid plaque [J]. *Eur J Radiol*, 2022, 153: 110364
- [45] 徐含波, 余苗, 孟闫凯, 等. CTA源图像上颈动脉周围脂肪定量与斑块MRI易损特征的相关性研究[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2024, 30(1): 27-32
- XU H B, YU M, MENG Y K, et al. Associations between pericarotid fat quantification on CTA source image and MRI-Based characteristics of vulnerable plaque [J]. *Chinese Computed Medical Imaging*, 2024, 30(1): 27-32
- [46] 朱涵婷, 熊瑞芳, 李承毅, 等. 颈动脉周围脂肪密度与斑块内出血的相关性研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(7): 43-46
- ZHU H T, XIONG R F, LI C Y, et al. Associations between pericarotid fat density evaluated by CTA and intraplaque hemorrhage [J]. *Chinese Journal of CT and MRI*, 2024, 22(7): 43-46
- [47] TANG Y, ZHANG J, LIU W, et al. Analysis of carotid vulnerable plaque MRI high-risk features and clinical risk factors associated with concomitant acute cerebral infarction [J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2023, 23(1): 173
- [48] ZHOU D, LI J, LIU D, et al. Irregular surface of carotid atherosclerotic plaque is associated with ischemic stroke: a magnetic resonance imaging study [J]. *J Geriatr Cardiol*, 2019, 16(12): 872-879
- [49] CUI B, YANG D, ZHENG W, et al. Plaque enhancement in multi-cerebrovascular beds associates with acute cerebral infarction [J]. *Acta Radiol*, 2021, 62(1): 102-112
- [50] SABA L, ZUCCA S, GUPTA A, et al. Perivascular fat density and contrast plaque enhancement: does a correlation exist? [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(8): 1460-1465
- [51] YOSHIDA K, YANG T, YAMAMOTO Y, et al. Expansive carotid artery remodeling: possible marker of vulnerable plaque [J]. *J Neurosurg*, 2019, 133(5): 1435-1440
- [52] KASHIWAZAKI D, YAMAMOTO S, AKIOKA N, et al. Association between pericarotid fat density and positive remodeling in patients with carotid artery stenosis [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(13): 3892
- [53] SABA L, CHEN H, CAU R, et al. Impact analysis of different CT configurations of carotid artery plaque calcifications on cerebrovascular events [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2022, 43(2): 272-279
- [54] 中国卒中学会. 中国卒中学会急性缺血性卒中再灌注治疗指南2024 [J]. *中国卒中杂志*, 2024, 19(12): 1460-1478
- Chinese Stroke Association. Chinese stroke association guidelines on reperfusion therapy for acute ischemic stroke 2024 [J]. *Chinese Journal of Stroke*, 2024, 19(12): 1460-1478
- [55] GENCER E S, YILMAZ E, ARSAVA E M, et al. Carotid artery perivascular adipose tissue density and response to intravenous tissue plasminogen activator in acute ischemic stroke [J]. *Angiology*, 2024, 75(5): 472-479
- [56] JIN J, HUANG R, CHEN Q, et al. Carotid artery perivascular adipose tissue density relates to recanalization and clinical outcome after mechanical thrombectomy [J]. *Front Aging Neurosci*, 2021, 13: 761248
- [57] 余苗, 孟闫凯, 徐含波, 等. 颈动脉周围脂肪密度与急性缺血性脑卒中事件的相关性研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2023, 42(6): 910-914
- YU M, MENG Y K, XU H B, et al. Associations between perivascular fat density evaluated by CTA and acute cerebral infarction [J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2023, 42(6): 910-914
- [58] HART R G, DIENER H C, COUTTS S B, et al. Embolic strokes of undetermined source: the case for a new clinical construct [J]. *Lancet Neurol*, 2014, 13(4): 429-438
- [59] HU X, CHEN J, FU H, et al. Association between carotid artery perivascular fat density and embolic stroke of undetermined source [J]. *Front Neurol*, 2022, 12: 765962
- [60] ZHANG D H, JIN J L, ZHU C F, et al. Association between carotid artery perivascular fat density and cerebral small vessel disease [J]. *Aging (Albany NY)*, 2021, 13(14): 18839-18851
- [61] LIU Y, XU L, GU Y, et al. Impact of H-type hypertension on pericarotid adipose tissue and plaque characteristics based on computed tomography (CT) angiography: a propensity score matching study [J]. *Med Sci Monit*, 2021, 27: e933351
- [62] 中国医师协会心血管内科医师分会. 泛血管疾病抗栓治疗中国专家共识(2024版) [J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(12): 906-923
- Chinese College of Cardiovascular Physicians. Chinese expert consensus on antithrombotic therapy of panvascular diseases (2024 edition) [J]. *National Medical Journal of China*, 2024, 104(12): 906-923
- [63] ZHOU X, YU L, ZHAO Y, et al. Panvascular medicine: an emerging discipline focusing on atherosclerotic diseases [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(43): 4528-4531

[收稿日期] 2025-02-28

(本文编辑: 唐震)