

Research Progress on the Correlation between Vulnerable Carotid Plaque Imaging Features and Ischemic Stroke

Zhansen Wang Tiemin Hu

Affiliated Hospital of Chengde Medical College, Chengde, Hebei, 067000, China

Abstract

Ischemic stroke is a major disease affecting the health of residents worldwide and is one of the leading causes of mortality and disability. The key to the occurrence of ischemic stroke is the formation of carotid plaques and the rupture of vulnerable plaques, leading to vessel stenosis or occlusion, which results in brain tissue ischemia. Magnetic resonance imaging, computed tomography angiography (CTA), ultrasound examination, and positron emission tomography (PET) are the main non-invasive imaging techniques used to assess the stability of carotid artery plaques. This article analyzes the technical characteristics of the aforementioned imaging examinations and discusses the connection between carotid vulnerable plaque features and cerebral ischemic events.

Keywords

carotid artery plaque; vulnerability; ischemic stroke

颈动脉易损性斑块影像学特征与缺血性脑卒中相关性的研究进展

王占森 呼铁民

承德医学院附属医院, 中国·河北承德 067000

摘要

在全球范围内,缺血性脑卒中是影响居民健康的主要疾病,更是导致人群致死和致残的主要原因之一。缺血性脑卒中发生的关键因素是颈动脉斑块的形成和易损斑块的破裂,导致血管狭窄或闭塞,造成脑组织缺血。磁共振成像、计算机断层扫描血管造影(CTA)、超声血管检查和正电子发射断层成像(PET)是主要几种用于评估颈部动脉斑块特征的非侵入性成像技术。论文就上述影像学检查的技术特点进行分析,并对颈动脉易损性斑块特征与脑缺血性事件之间的联系展开论述。

关键词

颈动脉斑块; 易损性; 缺血性脑卒中

1 引言

脑卒中是全球影响人类健康的主要疾病之一,其中80%由脑缺血性损伤引起^[1]。作为大脑主要的供血动脉,颈动脉的狭窄或闭塞是导致缺血性脑卒中发生的主要因素。研究表明,大约有20%~30%的缺血性脑卒中由颈动脉斑块破裂导致的动脉栓塞引起^[2]。目前,颈动脉狭窄程度被认为是划分颈动脉粥样硬化严重程度的唯一影像学标准^[3]。然而更多的研究显示,相对于狭窄程度而言,对颈动脉斑块特征的认识在预测脑卒中事件方面提供了更为准确的信息^[4]。与卒中风险密切相关的斑块被称为易损斑块。是否存在易损斑

块是预测卒中风险的关键因素,因此,对于预防缺血性脑卒中,准确识别易损斑块显得尤为重要。

目前,血管超声成像、CT血管成像、磁共振成像和正电子发射断层扫描等影像学技术已被应用于颈动脉斑块的检测。这些技术能够揭示斑块的形态、成分构成以及斑块的代谢活动,对疾病的准确诊断及治疗提供了直接证据。

论文就不同影像学技术在颈动脉易损斑块评估中的应用进行分析,并探讨易损性斑块的特征与缺血性脑卒中之间的相关性,论述如下。

2 颈动脉斑块的易损性

颈动脉粥样硬化是多种原因导致的颈动脉壁慢性炎症反应,其致病特征主要在于斑块的发展。颈动脉斑块可分为稳定斑块和不稳定斑块(易损斑块)。目前,易损斑块^[5]主要有:斑块内出血(Intraplaque Hemorrhage, IPH),富含脂质的坏死核心(Lipid-rich Necrotic Core, LRNC)、

【作者简介】王占森(1998-),男,中国河北承德人,在读硕士,从事脑血管疾病研究。

【通讯作者】呼铁民(1974-),男,中国河北承德人,硕士,主任医师,从事脑血管疾病研究。

薄或破裂的纤维帽 (Thinned Ruptured Fibrous Cap, TRFC), 钙化、斑块表面不规则或溃疡、斑块内新生血管及炎症反应。易损斑块与脑血管事件的发生密切相关。

3 颈动脉易损斑块的影像学评价

3.1 血管超声成像

血管超声因其无创伤、花费低等优势常作为评估颈动脉粥样硬化斑块的首选检查方式。但其检查结果也常受操作者水平和血管变异等因素的影响。随着医学影像技术的发展, 对比增强超声 (Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS) 已经成为评估颈动脉易损斑块的有力工具。CEUS 可以准确描绘颈动脉斑块的不规则性, 通过静脉注射微气泡对比剂, 颈动脉斑块内新生血管的情况也可以被准确评估。一项研究显示, CEUS 检测到的斑块内新生血管是缺血性卒中患者卒中复发的重要且独立的预测因子^[6]。血管内虚拟组织学超声 (Intravascular Ultrasound-Based Virtual Histology, IVUS-VH) 是一种新型超声分析仪器, 可通过不同的颜色代表斑块内不同的成分。研究表明, VH-IVUS 对斑块成分的诊断准确率高达 72%~92%^[7]。此外, VH-IVUS 技术还可以在颈动脉支架置入术中提供额外的影像信息, 帮助医生更准确地选择支架尺寸和种类, 评估支架的置入效果, 并对可能出现的并发症及时发现和处理, 这可能进一步降低术后的风险^[8]。

3.2 CT 血管成像 (CTA)

CTA 具有较高的空间分辨率及较短的图像采集时间, 提供了血管狭窄程度的良好信息, 同时它还能清楚地显示出颈动脉斑块的形态。斑块成分可以根据不同的 CT 值进行分类。钙化很容易通过其高密度 (平均约 250 HU) 来识别, 有研究表明 CTA 对钙化的识别优于磁共振成像及超声检查。但对斑块内出血的诊断还存在争议, 有研究显示斑块内出血的 CT 值较低, 介于 -17~+31 之间^[9]; 而不同的观点则认为斑块内出血的密度与结缔组织相似^[10]。虽然 CTA 在颈动脉斑块成分的评估上有显著的价值, 但也有一些局限性: 如辐射暴露、注射碘化造影剂和血管血流动力学评估。未来的研究将进一步应用 CTA 评估药物对斑块的治疗效果, 以及预测缺血性卒中中发生的风险。

3.3 磁共振成像

近年来, 高分辨磁共振血管壁成像 (HR-VWI) 技术的发展, 为深入研究颈动脉斑块提供了一个全新的视角。HR-MRI 可以准确的显示血管狭窄程度和斑块成分, 从而有效识别易损斑块^[11]。陈蓓蓓等^[12]通过对比术前 HR-MRI 检查与术后病理结果发现, 两者对于易损斑块的检测具有高度一致性。大量研究也表明^[13], HR-MRI 较超声、CTA 等对于易损斑块成分的检出具有明显的优势。因其独特的优势, 被认为是检测颈动脉斑块的金标准^[14]。尽管已有众多研究证实了 HR-VWI 在评估颈动脉斑块特征以及预测发生缺血性

脑卒中风险方面具有重要作用。但仍需要进行更多的前瞻性研究来进行验证。

3.4 正电子发射断层成像 (PET)

PET 成像能够无创性地识别颈动脉斑块内的炎症程度, 这是易损斑块的关键特征之一。使用 18- 氟脱氧葡萄糖 (FDG) 作为示踪剂, ¹⁸F-FDG 能在激活的巨噬细胞中选择性聚积, 从而显示出活跃的炎症反应^[15], 进而识别不稳定斑块。研究表明, 易损斑块患者较稳定斑块患者会积累更多的 ¹⁸F-FDG, 因此可通过 ¹⁸F-FDG 来判断斑块的稳定性^[16]。PET 与磁共振成像 (MRI) 的结合, 即 PET-MRI, 提供了一种新的成像模式, 斑块的形态和代谢信息可以被同时获得。这种结合利用了 PET 在分子水平上的高灵敏度和 MRI 在软组织对比度方面的优势, 有助于更加的全面评估斑块特征^[17]。

4 颈动脉斑块易损性与缺血性脑卒中的关系

4.1 斑块负荷

斑块负荷 (Plaque Burden) 是指动脉粥样硬化斑块在血管内所占的面积或体积比例, 可以更好的反映动脉粥样硬化的严重程度。在过去, 卒中的风险评估主要基于管腔狭窄程度, 而深入研究发现, 随着颈动脉斑块体积的增大, 为了保持大脑足够的供血量, 相应的动脉管腔也会适当的扩张。此时与狭窄程度相比, 斑块负荷更能反映疾病的严重程度^[18]。且有研究表明, 相对于血管狭窄程度, 斑块负荷可以提供更多的关于动脉粥样硬化程度的信息^[19]。Luo 等人^[20]研究结果显示, 颈动脉斑块负荷的体内 MRI 测量值与相应的离体 MRI 测量值高度一致。Zhao 等人^[21]研究报道, 颈动脉斑块负荷与同侧急性脑梗死体积显著相关, 而与颈动脉狭窄程度无关。最近的一项关于斑块负荷的研究发现, 当颈动脉斑块厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ 时, 患者容易出现急性脑卒中^[22]。Lu 等人^[23]的一项研究显示, 相对于短暂性脑缺血患者, 缺血性脑卒中患者的斑块负荷更大。因此, 在临床治疗中, 准确识别和评估斑块负荷对于预防和管理缺血性脑卒中极为关键。

4.2 IPH

IPH 被视为评估斑块脆弱性的核心影像学参数, 在 IPH 中, 由于病理条件导致的红细胞渗漏和局部铁质沉积, 使斑块变得十分脆弱, 同时 IPH 加速了 LRNH 的进展, 从而使斑块变得更加脆弱^[24]。Yang 等人^[25]的研究表明, T1 加权图像上颈动脉斑块内出血的信号强度与急性脑梗死相关。同时, 组织病理学研究也证实 IPH 是未来缺血事件的有力预测因子^[26]。Schindler 等人的一项 Meta 分析显示: 基线时 IPH 的存在均增加了同侧卒中的风险, 并且独立于狭窄程度^[27]。除此之外, 一篇关于颈动脉支架术后新发同侧缺血性病变更的研究显示, 术前大量的斑块内出血还与术后新的同侧缺血性病变更有关^[28]。近期的一项研究显示^[29], IPH 的存在与卒中的发生相关, 且 IPH 有望成为亚临床动脉粥样硬化健康人

群易损斑块的标志物。这些研究均表明 IPH 与斑块的进展有关，是缺血性脑卒中的预测因素。

4.3 LRNC 和 TRFC

LRNC 和 TRFC 的存在增加了斑块的易损性。LRNC 是由胆固醇晶体和凋亡细胞的坏死碎片组成的，TRFC 则是分隔内部结构的一层纤维结缔组织^[30]。这两项指标对卒中的发生均有一定的预测价值。一项前瞻性研究显示，当颈动脉斑块 LRNC 体积 > 40% 时，明显增加卒中的风险^[31]。同时，最近的一项研究也表明，LRNC 面积若超过血管壁面积 40% 则可提示斑块破裂的高风险，从而增加卒中风险^[32]；FC 的破裂使 LRNC 暴露于腔内血液，从而进一步加重卒中的发生。研究发现，FCR 的存在使缺血性脑血管事件的风险增加了近 6 倍^[33]。

4.4 CA

在动脉粥样硬化的研究中，钙化 (CA) 的角色一直备受讨论。一种观点认为钙化是易损斑块中的一个“保护性”成分，它可能有助于防止斑块的破裂^[34]。一项针对包括 2239 条颈动脉和 9 项研究的 Meta 分析^[35]显示，颈动脉斑块中钙化的存在减少了同侧脑缺血性事件的发生概率。然而随着检测技术的进步，众多研究开始挑战旧有理论，指出钙化的存在可能会对斑块稳定性造成影响。Barrett 等人的一项研究显示，微钙化、点状钙化可导致斑块破裂，导致脑缺血性事件的发生^[36]。一项病理学研究也得出了相似的结论^[37]，在稳定斑块中片状钙化更常见，而微钙化，碎片状，结节状和点状钙化常见于不稳定斑块中。此外，Xu 等人^[38]研究表明，多发钙化还与斑块内出血独立相关，可进一步加速了脑缺血性事件的发生。

4.5 斑块溃疡和表面不规则

颈动脉斑块的表面形态，主观上可分为光滑、不规则或溃疡的斑块^[39]，溃疡型斑块的定义为宽度大于 1mm 的内膜缺损，暴露斑块的坏死核心^[40]。斑块溃疡会增加斑块易损性，导致脑缺血性事件的发生。一项研究结果显示，存在溃疡的颈动脉斑块使卒中发生概率增加 2.2 倍^[41]。不规则的斑块形态可能导致血流紊乱，血流的持续冲击致斑块破裂，导致卒中的发生。王勤粒等人^[42]的研究也证实了这一观点，认为斑块表面不规则与脑缺血性事件相关。

4.6 新生血管与炎症

既往研究表明，动脉粥样硬化斑块的发展过程中，斑块内新生血管和炎症反应是两个关键因素，它们与缺血性脑卒中的发生、发展和预后有很大的关系^[43]。斑块内新生血管可导致斑块破裂，造成缺血性脑卒中发作。炎症反应会使血管内皮细胞受损，出现功能障碍，诱发脑血管病。研究表明钆对比剂增强磁共振成像可用于显示斑块微血管，目前认为斑块的强化可能与新生血管形成及血管通透性增加有关。斑块内炎症的检出主要依靠 PET 影像技术。18F-FDG 经常作为炎症的替代标记物。Chaker 等人^[44]的一项 Meta

分析显示，颈动脉 18F-FDG 摄取增加与近期的同侧脑缺血相关。此外，近期的一项研究探讨了颈动脉斑块炎症的 PET 显像与 5 年再发卒中的关系。该研究发现，基线时斑块的 18F-FDG 摄取可以独立预测 5 年内同侧复发性缺血性卒中^[45]。因此，有效的评估斑块内炎症和新生血管对于预防脑缺血性事件的发生具有重要意义。

5 结论与展望

本综述分析了不同影像学技术在颈动脉斑块易损性评估中的应用，并探讨了易损性斑块特征与缺血性脑卒中之间的相关性。影像学技术的发展，对斑块成分的识别变得更加精准，这对于预测缺血性脑卒中的发生至关重要。未来，多模态血管成像技术将提供更加全面的信息。影像组学与人工智能的结合，可以进一步提高斑块特征的识别和分析效率，实现对斑块特征的自动化和定量化分析，更精准的预测卒中风险。

颈动脉斑块易损性的影像学评估在卒中预防和管理中具有重要价值。随着影像学技术的发展和研究的不断深入，我们期待能够更加准确的识别卒中高风险患者，制定更有效的预防和治疗策略。

参考文献

- [1] Herrington W, Lacey B, Sherliker P, et al. Epidemiology of atherosclerosis and the potential to reduce the global burden of atherothrombotic disease[J]. *Circulation research*, 2016, 118(4): 535-546.
- [2] 沈艳昌,王琳,殷旭华.多层螺旋CTA评估缺血性脑血管病患者颈动脉粥样硬化斑块形态特征的价值[J].*中国现代神经疾病杂志*,2020,20(10):886-892.
- [3] Abbott A L. Medical (nonsurgical) intervention alone is now best for prevention of stroke associated with asymptomatic severe carotid stenosis: results of a systematic review and analysis[J]. *Stroke*, 2009, 40(10): e573-e583.
- [4] Ntaios G, Swaminathan B, Berkowitz S D, et al. Efficacy and safety of rivaroxaban versus aspirin in embolic stroke of undetermined source and carotid atherosclerosis[J]. *Stroke*, 2019, 50(9): 2477-2485.
- [5] Naghavi M, Libby P, Falk E, et al. From vulnerable plaque to vulnerable patient: a call for new definitions and risk assessment strategies: Part I[J]. *Circulation*, 2003, 108(14): 1664-1672.
- [6] Huang Z, Cheng XQ, Liu YN, Bi XJ, Deng YB. Value of Intraplaque Neovascularization on Contrast-Enhanced Ultrasonography in Predicting Ischemic Stroke Recurrence in Patients With Carotid Atherosclerotic Plaque. *Korean J Radiol*. 2023 Apr;24(4):338-348.
- [7] Murray S W, Stables R H, Hart G, et al. Defining the magnitude of measurement variability in the virtual histology analysis of acute coronary syndrome plaques[J]. *European Heart Journal-*

- Cardiovascular Imaging, 2013, 14(2): 167-174.
- [8] 袁杰宏.血管内超声在颈动脉支架置入术中应用的研究进展[J]. 临床医学进展,2024,14(4):1205-1211.
- [9] Ajduk M, Bulimbasic S, Pavic L, et al. Comparison of multidetector-row computed tomography and duplex Doppler ultrasonography in detecting atherosclerotic carotid plaques complicated with intraplaque hemorrhage[J]. Collegium antropologicum, 2013, 37(1): 213-219.
- [10] Wintermark M, Jawadi S S, Rapp J H, et al. High-resolution CT imaging of carotid artery atherosclerotic plaques[J]. American Journal of Neuroradiology, 2008, 29(5): 875-882.
- [11] Porcu M, Anzidei M, Suri J S, et al. Carotid artery imaging: The study of intra-plaque vascularization and hemorrhage in the era of the “vulnerable” plaque[J]. Journal of Neuroradiology, 2020, 47(6): 464-472.
- [12] 陈蓓蕾,徐俊,叶靖,等.有症状颈动脉狭窄患者颈动脉斑块的稳定性:高分辨率磁共振成像研究[J].国际脑血管病杂志,2017, 25(2):127-133.
- [13] 刘一江,张雪峰,彭昌勇,等.评估颈动脉易损斑块核心类型高分辨率MRI的价值[J].分子影像学杂志,2021,44(2):355-358.
- [14] McNally J S, Kim S E, Mendes J, et al. Magnetic resonance imaging detection of intraplaque hemorrhage[J]. Magnetic Resonance Insights, 2017, 10: 1178623X17694150.
- [15] Weng S T, Lai Q L, Cai M T, et al. Detecting vulnerable carotid plaque and its component characteristics: Progress in related imaging techniques[J]. Frontiers in Neurology, 2022, 13: 982147.
- [16] Peeters W, Moll F L, Vink A, et al. Collagenase matrix metalloproteinase-8 expressed in atherosclerotic carotid plaques is associated with systemic cardiovascular outcome[J]. European heart journal, 2011, 32(18): 2314-2325.
- [17] 方婷,孟楠,白岩,等.颈动脉粥样硬化斑块PET-MRI技术的研究进展[J].磁共振成像,2021,12(7):105-109.
- [18] 祝琳,白海威,米小昆,等.颈动脉易损斑块:影像学评价和缺血性卒中风险预测[J].国际脑血管病杂志,2020,28(2):140-144.
- [19] Zhao X, Underhill H R, Zhao Q, et al. Discriminating carotid atherosclerotic lesion severity by luminal stenosis and plaque burden: a comparison utilizing high-resolution magnetic resonance imaging at 3.0 Tesla[J]. Stroke, 2011, 42(2): 347-353.
- [20] Luo Y, Polissar N, Han C, et al. Accuracy and uniqueness of three in vivo measurements of atherosclerotic carotid plaque morphology with black blood MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 2003, 50(1): 75-82.
- [21] Zhao H, Zhao X, Liu X, et al. Association of carotid atherosclerotic plaque features with acute ischemic stroke: a magnetic resonance imaging study[J]. European Journal of Radiology, 2013, 82(9): e465-e470.
- [22] Liu Y, Wang M, Zhang B, et al. Size of carotid artery intraplaque hemorrhage and acute ischemic stroke: a cardiovascular magnetic resonance Chinese atherosclerosis risk evaluation study[J]. Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance, 2019, 21(1): 36.
- [23] Lu M, Zhang L, Yuan F, et al. Comparison of carotid atherosclerotic plaque characteristics between symptomatic patients with transient ischemic attack and stroke using high-resolution magnetic resonance imaging[J]. BMC Cardiovascular Disorders, 2022, 22(1): 190.
- [24] 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]. The Lancet Neurology, 2019, 18(6): 559-572.
- [25] Yang D, Liu Y, Han Y, et al. Signal of carotid intraplaque hemorrhage on MR T1-weighted imaging: association with acute cerebral infarct[J]. American Journal of Neuroradiology, 2020, 41(5): 836-843.
- [26] Brinjikji W, DeMarco J K, Shih R, et al. Diagnostic accuracy of a clinical carotid plaque MR protocol using a neurovascular coil compared to a surface coil protocol[J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2018, 48(5): 1264-1272.
- [27] Schindler A, Schinner R, Altaf N, et al. Prediction of stroke risk by detection of hemorrhage in carotid plaques: meta-analysis of individual patient data[J]. Cardiovascular Imaging, 2020, 13(2 Part_1): 395-406.
- [28] Sun YM, Xu HY, Wang S, Wang ZJ, Zhou Y, Yu W. Carotid massive intraplaque hemorrhage, lipid-rich necrotic core, and heavy circumferential calcification were associated with new ipsilateral ischemic cerebral lesions after carotid artery stenting: high-resolution magnetic resonance vessel wall imaging study. Cardiovasc Diagn Ther. 2023 Apr 28;13(2):355-366.
- [29] Bos D, Arshi B, van den Bouwhuisen Q J A, et al. Atherosclerotic carotid plaque composition and incident stroke and coronary events[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2021, 77(11): 1426-1435.
- [30] Baradaran H, Gupta A. Carotid vessel wall imaging on CTA[J]. American Journal of Neuroradiology, 2020, 41(3): 380-386.
- [31] Xu D, Hippe D S, Underhill H R, et al. Prediction of high-risk plaque development and plaque progression with the carotid atherosclerosis score[J]. JACC: Cardiovascular Imaging, 2014, 7(4): 366-373.
- [32] Porambo M E, DeMarco J K. MR imaging of vulnerable carotid plaque[J]. Cardiovascular diagnosis and therapy, 2020, 10(4): 1019.
- [33] Gupta A, Baradaran H, Schweitzer A D, et al. Carotid plaque MRI and stroke risk: a systematic review and meta-analysis[J]. Stroke,

- 2013, 44(11): 3071-3077.
- [34] Baradaran H, Al-Dasuqi K, Knight-Greenfield A, et al. Association between carotid plaque features on CTA and cerebrovascular ischemia: a systematic review and meta-analysis[J]. *American Journal of Neuroradiology*, 2017, 38(12): 2321-2326.
- [35] Shimoyama T, Gaj S, Nakamura K, et al. Quantitative CTA vascular calcification, atherosclerosis burden, and stroke mechanism in patients with ischemic stroke[J]. *Journal of the Neurological Sciences*, 2023, 449: 120667.
- [36] Barrett H E, Van der Heiden K, Farrell E, et al. Calcifications in atherosclerotic plaques and impact on plaque biomechanics[J]. *Journal of biomechanics*, 2019, 87: 1-12.
- [37] Jinnouchi H, Sato Y, Sakamoto A, et al. Calcium deposition within coronary atherosclerotic lesion: Implications for plaque stability[J]. *Atherosclerosis*, 2020, 306:85-95.
- [38] Xu X, Hua Y, Liu B, et al. Correlation between calcification characteristics of carotid atherosclerotic plaque and plaque vulnerability[J]. *Therapeutics and clinical risk management*, 2021: 679-690.
- [39] Rafailidis V, Li X, Sidhu P S, et al. Contrast imaging ultrasound for the detection and characterization of carotid vulnerable plaque[J]. *Cardiovascular diagnosis and therapy*, 2020, 10(4): 965.
- [40] 王丹妮,李康.颈动脉斑块易损性与缺血性卒中关系的影像学评价研究进展[J].*影像研究与医学应用*,2022,6(24):11-13.
- [41] Dilba K, van Dam-Nolen D H K, van Dijk A C, et al. Plaque composition as a predictor of plaque ulceration in carotid artery atherosclerosis: the plaque at RISK study[J]. *American Journal of Neuroradiology*, 2021,42(1):144-151.
- [42] 王勤粒,陈榔波.高分辨率MR管壁成像评估缺血性脑卒中患者血管斑块稳定性[J].*中国医学影像技术*,2021,37(10):1441-1445.
- [43] Ammirati E, Moroni F, Norata G D, et al. Markers of inflammation associated with plaque progression and instability in patients with carotid atherosclerosis[J]. *Mediators of inflammation*, 2015, 2015(1): 718329.
- [44] Chaker S, Al-Dasuqi K, Baradaran H, et al. Carotid plaque positron emission tomography imaging and cerebral ischemic disease[J]. *Stroke*, 2019.
- [45] McCabe J J, Camps-Renom P, Giannotti N, et al. Carotid plaque inflammation imaged by PET and prediction of recurrent stroke at 5 years[J]. *Neurology*, 2021, 97(23): e2282-e2291.