

· 综述 ·

颈动脉粥样硬化狭窄性疾病筛查与治疗新进展

杨亦敏 韩同磊 竺挺 郭大乔 符伟国

复旦大学附属中山医院血管外科 复旦大学血管外科研究所 国家放射与治疗临床医学研究中心, 上海 200032

通信作者: 竺挺, Email: zhu_ting@126.com

【摘要】 颈动脉粥样硬化斑块是导致缺血性脑卒中发生的主要原因。影像学技术的持续革新和颈动脉斑块分型标准的不断完善, 为颈动脉斑块的性质判定, 临床医师的治疗决策, 以及围手术期血管评估提供了更有力的证据。超声是颈动脉狭窄类疾病首选的无创、简便筛查手段, 而 CT 血管造影、磁共振血管造影等检查适用于进一步评估动脉狭窄程度, 判断颈动脉斑块成分及稳定性, 指导手术决策, 对预防严重心脑血管不良事件的发生至关重要。颈动脉狭窄的治疗进展主要聚焦于新型血管介入器械及外科术式的改良创新, 包括双层密网支架、经颈动脉血运重建术等。随着科学技术的不断发展, 分子成像技术、更微创化的筛查与治疗手段将是未来发展方向。

【关键词】 颈动脉狭窄; 血管外科手术; 筛查; 诊断技术和方法; 血管介入; 微创治疗

基金项目: 国家自然科学基金(52376142); 上海市卫生健康委员会科研项目(202140273)

New progress in screening and treatment of carotid atherosclerotic stenosis

Yang Yimin, Han Tonglei, Zhu Ting, Guo Daqiao, Fu Weiguo

Department of Vascular Surgery, Zhongshan Hospital, Fudan University, National Clinical Medical Research Center for Radiation and Therapy, Institute of Vascular Surgery, Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: Zhu Ting, Email: zhu_ting@126.com

【Abstract】 Carotid atherosclerotic plaque is the main cause of ischemic stroke. In recent years, with the continuous innovation of novel imaging technologies, numerous classification standards for carotid plaques provide more powerful evidence for the features of carotid plaques and perioperative vascular assessment, as well as the reference for surgeons in choosing therapeutic decisions. Ultrasound is the preferred non-invasive and convenient screening tool for carotid stenosis. Invasive examinations such as CT angiography and magnetic resonance angiography are suitable for carotid stenosis patients to determine the plaque composition and stability, which can guide surgical decision-making and help to prevent serious cardiovascular and cerebrovascular adverse events. Advances in the treatment of carotid artery stenosis have focused on the improvement and innovation of vascular interventional devices and surgical procedures, including double-layer stents, coated stents and transcarotid artery revascularization. As technology continues to evolve, molecular imaging and more minimally invasive screening as well as therapies will be the way forward.

【Key words】 Carotid stenosis; Vascular surgical procedures; Screening; Diagnostic techniques and procedures; Vascular intervention; Minimally invasive treatment

Fund program: National Natural Science Foundation of China (52376142); Scientific Research Project of Shanghai Municipal Health Commission (202140273)

DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20240613-00295

收稿日期 2024-06-13 本文编辑 郑佳依

引用本文: 杨亦敏, 韩同磊, 竺挺, 等. 颈动脉粥样硬化狭窄性疾病筛查与治疗新进展[J]. 中华外科杂志, 2024, 62(11): 1064-1068. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20240613-00295.

中华医学杂志社
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究



颈动脉粥样硬化斑块是导致缺血性脑卒中发生的主要原因^[1]。近年来,伴随动脉粥样硬化相关的基础、临床研究不断深入,更加细致的斑块分类、分型方法对治疗方案的制定更具临床指导意义。此外,随着影像学技术与手术器械的创新发展,不断有新的影像学筛查手段和手术方式出现并被应用于临床。本文就颈动脉斑块分型、影像学筛查技术与治疗进展予以综述。

一、颈动脉斑块分类与分型

动脉粥样硬化斑块通常随年龄增加而不断进展。根据颈动脉斑块发生部位可分为颈总动脉型、颈内动脉型及颈总-颈内动脉型;其性质可分为稳定性与不稳定性^[2];根据斑块成分变化及病理学特征可将其进一步分为纤维型、钙化型、内出血型、脂核型和破裂型^[3-4]。目前常用的组织学分型由美国心脏协会提出,从最初的脂质点,演变成粥样斑块、复杂斑块、钙化斑块及纤维斑块等共 8 种类型^[5]。随着影像学检查水平的提高,斑块的影像学表现也成为了评估斑块分型的重要手段^[6]。2023 年,有学者基于影像学表现对斑块成分和其他特征进行分类(Plaque-RADS),以评估斑块的组成和形态,并预测脑血管事件的发生风险^[7]。虽然颈动脉斑块分类方法众多,但斑块稳定性依然是对临床手术决策最具意义的指标。纤维、钙化、内出血、脂核、破裂等组织病理学的细致划分既有利于对斑块稳定性的判断,又有利于推动病因学相关的基础研究。

二、颈动脉斑块的筛查与评估

颈动脉影像学早期筛查与疾病严重程度评估,对明确颈动脉狭窄程度并制定后续治疗方案极为重要。2022 年美国血管外科学会(Society for Vascular Surgery, SVS)指南提出,适合颈动脉筛查的无症状高危人群包括:(1)下肢外周动脉疾病患者;(2)有冠状动脉旁路移植术史;(3)年龄 ≥ 55 岁且有 2 个及以上传统动脉粥样硬化危险因素;(4)年龄 ≥ 55 岁的吸烟者;(5)糖尿病、高血压或冠心病患者;(6)脑影像学检查发现临床隐匿性脑梗死患者^[8]。目前常用的筛查手段包括颈动脉超声,磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA),CT 血管成像(CT angiography, CTA)和数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)等。为了进一步明确支架置入的即刻效果及预后,识别复杂病变,近年来光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT)也被推荐应用于外周血管领域^[9]。侵入性检查在高准确率的同时也为患者带来了经济负担及造影剂相关风险,临床上应结合患者的症状、狭窄程度等特征进行综合考量。2022 年,美国 SVS 指南提出不建议在无症状且无高危因素的人群中实施颈动脉狭窄的常规筛查。而对于已明确形成颈动脉斑块但并未达到手术指征的患者,建议 1~2 年进行一次颈动脉彩超检查,存在严重狭窄病变或出现神经系统症状,则建议进一步行 CTA、MRI 等检查评估狭窄程度及手术方案^[9]。

(一)非介入性检查手段

颈动脉超声是简便可行的早期筛查手段。可实时观察

血管管腔、内膜情况,早期发现颈动脉病变,明确斑块位置、大小及性质,评估斑块的稳定性,准确测量颈动脉狭窄程度,直观显示颈动脉血流动力学变化^[10]。CTA 可清晰显示血流,从侧面反映血管管腔以及血管解剖走形,是临床最常用的评估血管狭窄程度的检查方法。但 CTA 对斑块成分的判别效力不及 MRI,怀疑有颈动脉中重度狭窄的患者,建议行脑灌注成像,进一步明确大脑半球缺血情况^[11]。目前除了标准多排 CTA 外,还可应用改良双能 CT 评估颈动脉斑块。该技术通过同时使用两个不同球管电压的 X 线球管对脑循环进行成像的血管造影检查,可提供更好的去骨图像,为测量富钙化病变的狭窄程度提供了新方法^[12]。MRI 是斑块成像的金标准,对于评估易损斑块有重要价值。MRA 可量化评估管腔狭窄程度及管壁厚度、斑块管腔面形态,分析管壁及斑块成分,但对狭窄程度的评估存在一定夸大效应,所以并不能作为判定狭窄程度的重要依据^[13]。近年来,分子成像技术为疾病评估提供了新的手段,有研究报道 PET/CT 能从分子层面观察颈动脉粥样硬化斑块的炎症进展,实现在体细胞代谢活性的可视化,对判断斑块易损性有重要价值^[14-15]。作为前沿成像技术, PET/MRI 能在分析评估动脉斑块的组织成分的同时进行细胞分子水平成像,为评估钙化、炎症病变提供了有力证据^[16-17]。

(二)介入性检查手段

DSA 是明确血管狭窄、评估血流灌注的金标准,常用于进一步确认 CTA、MRA 无法明确的颈动脉近闭塞病变,以制定后续手术方案。然而导丝导管操作时也可能导致脑卒中等神经系统相关并发症,其总发病率约为 1.7%^[18-19]。因此,对于拟行 DSA 检查的患者需首先评估主动脉、颈动脉节段动脉粥样硬化、附壁血栓、钙化情况并慎重操作。OCT 可观察到斑块破裂、薄纤维帽、附壁血栓,并对钙化病变的角度、长度、分布等进行定量分析。既往研究报道, OCT 还有望被用于判定颈动脉斑块性质、选择治疗策略,评价不同支架置入后效果,并用于术后长期随访等,是对颈动脉狭窄介入检查与治疗方式的全新探索^[20-21]。Fujii 等^[22]报告了 OCT 可在术中显示颈动脉钙化斑块和漂浮血栓的形态,其分辨率是血管内超声的 10 倍,分辨精度可达 10 μm ,弥补了 DSA 血管造影在评估颈动脉疾病方面的局限性。

此外,血管内超声等也可用于评估斑块性质和特点,制定合适的预处理策略,并在术后观察有无支架相关并发症等,且目前已在冠状动脉粥样硬化患者中广泛应用,未来在颈动脉领域也有望提供术中辅助功能。随着人工智能、计算流体力学及虚拟手术等领域的开拓发展,计算颈动脉狭窄程度、随访疾病进展、分析术后疗效等工作将更为个性化、精准化^[23-24]。

三、颈动脉斑块成分的生物信息学分析

国内外学者对颈动脉斑块的成分进行了深入的生物信息学分析,试图获取斑块发生发展的调控因素。基因表达方面,2020 年 Alencar 等^[25]通过单细胞 RNA 和染色质免疫沉淀测序技术筛查了人类和小鼠动脉硬化斑块标本和动脉



粥样硬化标本中的基因表达,结果表明,干细胞多能性基因 *Klf4* 上调可致平滑肌细胞表型变化,从而加重斑块钙化及不稳定性。2022 年,一项研究通过质谱流式细胞术联合转录组学技术对 34 例有症状及 26 例无症状晚期动脉粥样硬化患者的颈动脉斑块标本进行分析,筛选差异性表达结果发现 *IRF5* 上调促使 $CD11c^{+}$ 巨噬细胞增多,可加重血管炎症,导致斑块破裂^[26]。蛋白水平方面,2023 年 Sun 等^[27]通过空间转录组测序比较了人颈动脉斑块近端、最狭窄区域和远端区域内的特异性位点表达情况,结果发现斑块破裂区域基质金属蛋白酶-9 表达明显升高,受磷蛋白表达明显下降。免疫细胞层面,2022 年发表的一项研究分析了美国国立生物技术信息中心的高通量测序数据库中,稳定和不稳定颈动脉粥样硬化斑块中的 22 种免疫细胞特异性标志物,利用机器学习筛选差异表达基因,结果显示稳定和不稳定斑块中的免疫细胞类型存在明显差异。不稳定斑块中 M0、M1 和 M2 巨噬细胞的比例高于稳定斑块, $CD8^{+}$ T 细胞和自然杀伤细胞的比例低于稳定斑块,提示 M1 型巨噬细胞的聚集是导致斑块不稳定的重要因素^[28]。2023 年一项研究通过单细胞 RNA 测序,比较了 10 例有症状与 10 例无症状患者的颈动脉斑块和外周血单核细胞,鉴定结果发现, $CD8^{+}C3$ 、 $CD8^{+}C4$ 和 $CD4^{+}C5$ 的斑块特异性 T 细胞亚群的活化和耗竭可导致颈动脉粥样硬化进展;此外,单核细胞-巨噬细胞动力学主导了先天免疫反应, $EREG^{+}$ 单核细胞增多可提高脑血管事件的发生率,而 $C3^{+}$ 单核细胞具有抗炎作用,可稳定斑块^[29]。生物信息学研究为探明动脉硬化斑块的形成与进展的关键基因及潜在机制提供了宝贵信息,有望为延缓斑块进展及预防脑血管事件发生开辟新途径。

四、颈动脉狭窄的治疗

(一)术式的选择

对于颈动脉狭窄患者的术式选择,国内指南建议无创检查提示狭窄率 $\geq 70\%$,或血管造影显示狭窄率 $> 50\%$ 的有临床症状的颈动脉狭窄,为颈动脉内膜剥脱术(carotid endarterectomy, CEA)的绝对适应证;对于颈动脉解剖位置不适宜行开放手术、放射性损伤引起的颈动脉狭窄、CEA 术后再次狭窄以及患者自身条件无法耐受开放手术的患者,则建议行颈动脉支架植入术(carotid artery stenting, CAS)^[30]。美国 SVS 指南提出,狭窄率 $> 50\%$ 的有临床症状的颈动脉狭窄患者首选 CEA;当 CEA 并发症发生率较高或存在颈部条件不良和严重心脏疾病首选 CAS^[8]。

根据近年来更新的文献数据,以下几类无症状颈动脉狭窄患者可考虑在适当情况下接受手术干预:(1)无症状颈动脉狭窄病变快速进展,即患者间隔 1 年用同一影像学筛查手段(包括超声、MRI 等),提示血管狭窄明显加重(轻度发展为中度狭窄,或由中度发展为重度狭窄);(2)重度无症状颈动脉狭窄患者(狭窄率 $> 70\%$);(3)无症状颈动脉狭窄病变合并对侧短暂性一过性缺血发作,或既往有卒中史;(4)合并隐匿性脑梗死病灶(皮质梗塞、皮质下梗塞、基底神经节梗塞);(5)经颅多普勒超声发现颅内自发性栓子;

(6)脑血管反应性受损。2023 年最新欧洲血管外科学会指南指出,对于手术风险一般、颈动脉狭窄率为 60%~99% 的无症状患者,如果发现 1 个或多个可能与晚期卒中风险增加相关的影像学或临床特征,在保证患者术后 30 d 内卒中及病死率均 $< 3\%$,且患者预期寿命 > 5 年的前提下,应考虑行 CEA^[31]。2021 年 ACST-2 研究纳入了 2008—2020 年 130 个中心的 3 625 例无症状严重颈动脉狭窄患者,随机分配至 CEA 组和 CAS 组,平均随访 5 年,结果显示患者术后严重并发症发生率较低,且两组患者长期随访中的致死或致残性脑卒中的发生率相当^[32]。

(二)手术注意事项

CEA 作为颈部的开放性手术,需要警惕颈部血管神经的损伤及碎片化斑块脱落后栓塞远端颅内血管的风险以及术后并发症的发生。2021 年一项随机对照研究纳入了 790 例颈动脉狭窄患者,其中 511 例行颈动脉内膜剥脱补片成形术(patch carotid endarterectomy, p-CEA)、232 例行标准颈动脉内膜剥脱术(conventional carotid endarterectomy, c-CEA)、47 例行外翻式颈动脉内膜剥脱术(eversion carotid endarterectomy, e-CEA),随访结果表明 3 种手术方式术后 1 年颈动脉再狭窄(狭窄率 $\geq 50\%$)的累积发生率分别为 18.9%、26.1% 和 17.7%;术后 5 年累积发生率分别为 25.9%、37.2% 和 30.0%;组间比较发现 p-CEA 组和 e-CEA 组间无差异($P=0.77$),c-CEA 组的再狭窄率明显高于未使用补片的 p-CEA 组($P=0.019$),推荐 p-CEA 为预防再狭窄的首选术式^[33]。

随着高新材料、工程科学的发展,CAS 得到了普及。目前在临床上使用的支架可以根据结构分为开环和闭环支架;单层和双层支架;覆膜和裸支架等^[34-35]。开环支架柔顺性好,可穿越曲折的血管,很好地适应血管轮廓的同时不会缩短,设计上具有最佳贴壁性的先天优势,是治疗狭窄病变和弯曲血管的首选^[36]。但其网眼较闭环支架增加 1~3 倍,覆盖的目标病变较少,动脉粥样硬化物质可能通过支架支柱突出,从而导致较高的栓塞和支架内再狭窄风险,但在预防严重再狭窄和中远期卒中复发方面,开环与闭环支架疗效相当^[37]。而紧密编织的闭环支架材质更加坚硬,并提供更好的支架支持,但如果放置不当,也可能会扭曲或损伤血管^[38]。双层颈动脉支架在增加了斑块覆盖面积的同时,减少了支架植入时出现血栓事件发生。最新临床试验证实双层支架 Roadsaver(美国 MicroVention 公司)与传统支架相比可减少围手术期血管损伤的风险^[39],其在国内应用较少,尚待进一步观察。而覆膜支架可有效覆盖病变节段,避免了裸支架所致的弥漫性内膜增生,同时极大降低了支架折断率和斑块碎屑的脱落可能,但其目前在颈动脉狭窄类病变中并不常用。因此,术前、术中应充分评估患者的血管条件,以选择合适支架。

近年来,经颈动脉血运重建术(transcarotid artery revascularization, TCAR)作为一种新型复合手术在国外各大中心开展,外科医师可通过颈部横向小切口直接在颈动脉



中插入短动脉鞘进行操作。TCAR 的主要优势在于避免了导管在主动脉弓内的操作,有望在术中减少脑卒中等不良事件的发生,但不适用于距离锁骨或颅骨 ≤ 5 cm 的病变,也不适用于严重迂曲、小或严重钙化、存在血栓的病变^[40]。血管外科学会新版颅外脑血管疾病管理指南也指出,TCAR 的效果不亚于 CEA,总体数据显示 TCAR 结局优于 CAS。对于高风险患者(解剖和生理因素),TCAR 可能优于 CEA 和 CAS^[8]。2019 年 JAMA 发表了一项多中心回顾性队列研究,采用倾向性评分匹配的方法比较了 2016—2019 年行 TCAR (5 251 例)和经股动脉颈动脉支架植入术(6 640 例)的患者资料,匹配后两组患者各纳入 3 286 例,结果显示 TCAR 可明显降低患者脑卒中及死亡风险^[41]。2022 年的一项前瞻性、多中心、单臂临床试验,纳入了 155 例 TCAR 治疗的高风险颈动脉狭窄患者(无症状患者 119 例,有症状 36 例),结果显示围术期无脑卒中、心肌梗死等不良事件心血管发生,手术过程中神经损伤率仅为 1.3%,随访 1 年无患者出现同侧卒中,4 例患者出现非神经源性死亡(2.6%),可初步证实 TCAR 的安全性及有效性^[42]。尽管相关研究报道 TCAR 的应用前景良好,但迄今多数 TCAR 手术是在开放手术高风险或颈动脉解剖位置不适宜行开放手术的患者中进行的,国内也尚未开展大样本的临床研究报道。因此,目前不推荐对低手术风险的、有症状颈动脉狭窄患者行 TCAR,未来需要更多的临床随机对照试验进一步验证其临床获益。

综上所述,颈动脉斑块的筛查及斑块性质的评估影响着临床决策,筛选无症状高危病变具有重要的临床意义。详细的影像学评估有助于制定个体化治疗方案,针对易损斑块的分子成像技术是未来发展方向。颈动脉狭窄病变的治疗方案已有成熟、明确的规范指南,对于已明确颈动脉狭窄的患者,系统性、规范化的药物治疗及手术干预对降低严重心脑血管不良事件的发生至关重要。越来越多精准化、微创化的筛查手段与治疗方法,将为颈动脉斑块的诊治提供新思路。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 杨亦敏、韩同磊:论文撰写、论文修改;竺挺、郭大乔、符伟国:行政支持、研究指导

参 考 文 献

- [1] Nardi V, Benson JC, Saba L, et al. Patients with carotid intraplaque hemorrhage have higher incidence of cerebral microbleeds[J]. Curr Probl Cardiol, 2023, 48(9): 101779. DOI:10.1016/j.cpcardiol.2023.101779.
- [2] Thammongkolchai T, Riaz A, Sundararajan S. Carotid stenosis: role of plaque morphology in recurrent stroke risk[J]. Stroke, 2017, 48(8): e197-e199. DOI: 10.1161/STROKEAHA.117.017779.
- [3] Brinjikji W, Huston J 3rd, Rabinstein AA, et al. Contemporary carotid imaging: from degree of stenosis to plaque vulnerability[J]. J Neurosurg, 2016, 124(1): 27-42. DOI:10.3171/2015.1.JNS142452.
- [4] Saba L, Nardi V, Cau R, et al. Carotid artery plaque calcifications: lessons from histopathology to diagnostic imaging[J]. Stroke, 2022, 53(1): 290-297. DOI: 10.1161/STROKEAHA.121.035692.
- [5] Cai JM, Hatsukami TS, Ferguson MS, et al. Classification of human carotid atherosclerotic lesions with in vivo multicontrast magnetic resonance imaging[J]. Circulation, 2002, 106(11): 1368-1373. DOI: 10.1161/01.cir.0000028591.44554.f9.
- [6] Bos D, van Dam-Nolen D, Gupta A, et al. Advances in multimodality carotid plaque imaging: AJR expert panel narrative review[J]. AJR Am J Roentgenol, 2021, 217(1): 16-26. DOI:10.2214/AJR.20.24869.
- [7] Saba L, Cau R, Murgia A, et al. Carotid Plaque-RADS: a novel stroke risk classification system[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2024, 17(1): 62-75. DOI: 10.1016/j.jcmg.2023.09.005.
- [8] AbuRahma AF, Avgerinos ED, Chang RW, et al. Society for Vascular Surgery clinical practice guidelines for management of extracranial cerebrovascular disease[J]. J Vasc Surg, 2022, 75(1S): 4S-22S. DOI: 10.1016/j.jvs.2021.04.073.
- [9] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 光学相干断层成像技术在冠心病介入诊疗中应用的中国专家共识[J]. 中华心血管病杂志, 2023, 51(2): 109-124. DOI:10.3760/cma.j.cn112148-20220602-00436.
- [10] Scoutt LM, Gunabushanam G. Carotid ultrasound[J]. Radiol Clin North Am, 2019, 57(3): 501-518. DOI: 10.1016/j.rcl.2019.01.008.
- [11] Saba L, Loewe C, Weikert T, et al. State-of-the-art CT and MR imaging and assessment of atherosclerotic carotid artery disease: the reporting-a consensus document by the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR)[J]. Eur Radiol, 2023, 33(2): 1088-1101. DOI: 10.1007/s00330-022-09025-6.
- [12] Baradaran H, Gupta A. Extracranial vascular disease: carotid stenosis and plaque imaging[J]. Neuroimaging Clin N Am, 2021, 31(2): 157-166. DOI: 10.1016/j.nic.2021.02.002.
- [13] Bonanno L, Marino S, Morabito R, et al. Evaluation of US and MRI techniques for carotid stenosis: a novel phantom approach[J]. Radiol Med, 2019, 124(5): 368-374. DOI: 10.1007/s11547-018-0971-7.
- [14] Castro SA, Muser D, Lee H, et al. Carotid artery molecular calcification assessed by ¹⁸F-fluoride PET/CT: correlation with cardiovascular and thromboembolic risk factors[J]. Eur Radiol, 2021, 31(10): 8050-8059. DOI: 10.1007/s00330-021-07917-7.
- [15] Patil S, Teichner EM, Subtirelu RC, et al. Bilateral carotid artery molecular calcification assessed by [18F] Fluoride PET/CT: correlation with cardiovascular and thromboembolic risk factors[J]. Life (Basel), 2023, 13(10): 2070. DOI:10.3390/life13102070.
- [16] Sahota A, Naidu S, Jacobi A, et al. Atherosclerosis inflammation and burden in young adult smokers and vapers measured by PET/MR[J]. Atherosclerosis, 2021, 325: 110-116. DOI:10.1016/j.atherosclerosis.2021.03.021.
- [17] Zhang Y, Cui B, Yang H, et al. Morphological feature and mapping inflammation in classified carotid plaques in symptomatic and asymptomatic patients: a hybrid ¹⁸F-FDG PET/MR study[J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1144248. DOI:10.3389/fnins.2023.1144248.



- [18] Kaufmann TJ, Huston J 3rd, Mandrekar JN, et al. Complications of diagnostic cerebral angiography: evaluation of 19,826 consecutive patients[J]. *Radiology*, 2007,243(3):812-819.DOI:10.1148/radiol.2433060536.
- [19] Tafelmeier S, Kessler E, Lancu AM, et al. Spectrum of complications and complication rates after diagnostic catheter angiography in neuroradiology[J]. *Clin Neuroradiol*, 2023,33(3): 763-768. DOI: 10.1007/s00062-023-01273-3.
- [20] 韩云飞,施璇,叶瑞东,等.应用光学相干断层成像对老年与中青年颈动脉粥样硬化性斑块特征的分析[J].*中国脑血管病杂志*, 2022,19(1):9-14.DOI:10.3969/j.issn.1672-5921.2022.01.002.
- [21] 刘震,李慧珠,高明康,等.血管内光学相干断层成像在颈动脉粥样硬化病变中的研究进展[J].*中国临床实用医学*, 2022, 13(4): 70-73. DOI: 10.3760/cma.j.cn115570-20220601-01298.
- [22] Fujii K, Kubo T, Otake H, et al. Expert consensus statement for quantitative measurement and morphological assessment of optical coherence tomography[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2020, 35(1): 13-18. DOI: 10.1007/s12928-019-00626-5.
- [23] 刘雨森,惠晶晶.影像组学结合人工智能诊断颈动脉斑块及缺血性卒中的进展[J].*国际医学放射学杂志*, 2024,47(2): 154-159.DOI:10.19300/j.2024.Z21097.
- [24] Domanin M, Bissacco D, Le Van D, et al. Computational fluid dynamic comparison between patch-based and primary closure techniques after carotid endarterectomy[J]. *J Vasc Surg*, 2018, 67(3): 887-897. DOI: 10.1016/j.jvs.2017.08.094.
- [25] Alencar GF, Owsiany KM, Karnewar S, et al. Stem cell pluripotency genes Klf4 and Oct4 regulate complex SMC phenotypic changes critical in late-stage atherosclerotic lesion pathogenesis[J]. *Circulation*, 2020, 142(21): 2045-2059. DOI:10.1161/CIRCULATIONAHA.120.046672.
- [26] Edsfeldt A, Swart M, Singh P, et al. Interferon regulatory factor-5-dependent CD11c+macrophages contribute to the formation of rupture-prone atherosclerotic plaques[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(19): 1864-1877. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab920.
- [27] Sun J, Singh P, Shami A, et al. Spatial transcriptional mapping reveals site-specific pathways underlying human atherosclerotic plaque rupture[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2023, 81(23): 2213-2227. DOI: 10.1016/j.jacc.2023.04.008.
- [28] Wang J, Kang Z, Liu Y, et al. Identification of immune cell infiltration and diagnostic biomarkers in unstable atherosclerotic plaques by integrated bioinformatics analysis and machine learning[J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 956078. DOI:10.3389/fimmu.2022.956078.
- [29] Tan J, Liang Y, Yang Z, et al. Single-cell transcriptomics reveals crucial cell subsets and functional heterogeneity associated with carotid atherosclerosis and cerebrovascular events[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2023, 43(12): 2312-2332. DOI: 10.1161/ATVBAHA.123.318974.
- [30] 中华医学会外科学分会血管外科学组.颈动脉狭窄诊治指南[J/CD].*中国血管外科杂志(电子版)*, 2017,9(3):169-175. DOI:10.3969/j.issn.1674-7429.2017.03.003.
- [31] Naylor R, Rantner B, Ancetti S, et al. Editor's choice-European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 clinical practice guidelines on the management of atherosclerotic carotid and vertebral artery disease[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2023,65(1):7-111.DOI:10.1016/j.ejvs.2022.04.011.
- [32] Halliday A, Bulbulia R, Bonati LH, et al. Second asymptomatic carotid surgery trial (ACST-2): a randomised comparison of carotid artery stenting versus carotid endarterectomy[J]. *Lancet*, 2021, 398(10305): 1065-1073. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)01910-3.
- [33] Cheng SF, Richards T, Gregson J, et al. Long term restenosis rate after carotid endarterectomy: comparison of three surgical techniques and intra-operative shunt use[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2021,62(4):513-521.DOI:10.1016/j.ejvs.2021.06.028.
- [34] Baiu I, Stern JR. Carotid Artery Stenting[J]. *JAMA*, 2020, 324(16):1690.DOI:10.1001/jama.2020.10426.
- [35] Spiliopoulos S, Vasiniotis KN, Reppas L, et al. Carotid artery stenting: an update[J]. *Curr Opin Cardiol*, 2019, 34(6): 616-620. DOI:10.1097/HCO.0000000000000679.
- [36] Squizzato F, Piazza M, Forcella E, et al. Impact of carotid stent design on embolic filter debris load during carotid artery stenting[J]. *Stroke*, 2023, 54(10): 2534-2541. DOI: 10.1161/STROKEAHA.123.043117.
- [37] Müller MD, Gregson J, McCabe DJH, et al. Stent design, restenosis and recurrent stroke after carotid artery stenting in the international carotid stenting study[J]. *Stroke*, 2019, 50(11): 3013-3020. DOI: 10.1016/j.jvs.2019.11.006.
- [38] Texakalidis P, Giannopoulos S, Kokkinidis DG, et al. Effect of open-vs closed-cell stent design on periprocedural outcomes and restenosis after carotid artery stenting: a systematic review and comprehensive meta-analysis[J]. *J Endovasc Ther*, 2018, 25(4): 523-533. DOI: 10.1177/1526602818783505.
- [39] Vanzin JR, de Castro-Afonso LH, Santos MN, et al. Casper vs. closed-cell stent: carotid artery stenting randomized trial[J]. *Clin Neuroradiol*, 2021, 31(3): 843-852. DOI: 10.1007/s00062-020-00937-8.
- [40] White CJ, Brott TG, Gray WA, et al. Carotid artery stenting: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 80(2): 155-170. DOI: 10.1016/j.jacc.2022.05.007.
- [41] Schermerhorn ML, Liang P, Eldrup-Jorgensen J, et al. Association of transcatheter carotid artery revascularization vs transfemoral carotid artery stenting with stroke or death among patients with carotid artery stenosis[J]. *JAMA*, 2019, 322(23): 2313-2322. DOI: 10.1001/jama.2019.18441.
- [42] Kashyap VS, So KL, Schneider PA, et al. One-year outcomes after transcatheter carotid artery revascularization (TCAR) in the ROADSTER 2 trial[J]. *J Vasc Surg*, 2022, 76(2): 466-473. DOI:10.1016/j.jvs.2022.03.872.

