

论 著

能谱CT定量参数评估
症状性颈动脉斑块患者
卒中复发风险的价值*

倪俊* 陶磊 叶亮

合肥市第二人民医院影像中心

(安徽合肥 230011)

【摘要】目的 分析能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的价值。**方法** 选择106例于2024年1月至2025年9月在我院治疗后复查的脑梗患者的临床资料展开回顾性分析,依据90 d后CTA复查结果分为复发组(n=28)、未复发组(n=78)。比较两组基线资料、能谱CT定量参数,通过多因素Logistic回归分析症状性颈动脉斑块患者卒中复发的影响因素。采用ROC分析能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的价值。**结果** 复发组碘浓度(IC)、脂质核心百分比高于未复发组, λ_{HU} 、纤维组织百分比低于未复发组($P<0.05$);多因素Logistic回归分析证实,IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比是症状性颈动脉斑块患者卒中复发的影响因素,均有 $P<0.05$;ROC分析证实,IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比可用于评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险,曲线下面积分别为0.766、0.789、0.811、0.826,联合评估可获得更高曲线下面积0.931,均有 $P<0.05$ 。**结论** 能谱CT定量参数中IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比是评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的独立因素,临床诊治时可结合以上因素进一步筛查复发高危患者,及时采取防治措施。

【关键词】 能谱CT定量参数; 症状性颈动脉斑块; 缺血性卒中; 复发; 脂质核心百分比

【中图分类号】 R323.1

【文献标识码】 A

【基金项目】 安徽省中医药传承创新科研项目计划(2024CCCX138)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.008

Energy Spectrum CT Quantitative Evaluation
of the Risk of Recurrence of Stroke in
Patients with Symptomatic Carotid Plaques*

NI Jun*, TAO Lei, YE Liang.

Imaging Center, the Second People's Hospital of Hefei, Hefei 230011, Anhui Province, China

ABSTRACT

Objective Analysis of energy spectrum CT quantitative evaluation of the risk of recurrence of stroke in patients with symptomatic carotid plaques. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 106 patients with cerebral infarction who underwent follow-up examinations after treatment in our hospital from January 2024 to September 2025. Based on the CTA follow-up results at 90 days, the patients were divided into a recurrence group (n=28) and a non-recurrence group (n=78). Compare two groups of baseline data, energy spectrum CT quantitative parameters by multivariable Logistic regression analysis in patients with symptomatic carotid plaques the influence factors of recurrence of stroke. The ROC analysis spectral CT quantitative evaluation of the risk of recurrence of stroke in patients with symptomatic carotid plaques. **Results** Recurrence of iodine concentration (IC), percentage of lipid core is higher than did not relapse group, λ_{HU} , percentage of fibrous tissue below did not relapse group ($P<0.05$); Multivariable Logistic regression analysis confirmed that the IC, λ_{HU} , percentage of lipid core, fibre percentage is symptomatic carotid plaques in patients with stroke the influence factors of recurrence, are $P<0.05$; ROC analysis confirmed that the IC, λ_{HU} , percentage of lipid core percentage, fibrous tissue can be used to assess risk of recurrence of stroke in patients with symptomatic carotid plaques, the area under the curve were 0.766, 0.789, 0.811, 0.826, joint assessment can be obtained under higher curve area of 0.931, were ($P<0.05$). **Conclusion** Energy spectrum CT quantitative parameters of IC, λ_{HU} , percentage of lipid core, fibre percentage is to assess the risk of recurrence of stroke in patients with symptomatic carotid plaques independent factors, clinical diagnosis and treatment can be combined with the above factors further screening patients at high risk of recurrence, take timely measures to prevent and control.

Keywords: Energy Spectrum CT Quantitative Parameters; Symptomatic Carotid Artery Plaque; Ischemic Stroke; Recurrence; Percentage of Lipid Core

缺血性卒中作为全球重大健康威胁,其复发率居高不下,而症状性颈动脉粥样硬化斑块是导致卒中复发的核心危险因素之一,严重影响患者预后并加重医疗负担^[1]。当前卒中复发风险评估主要依赖临床评分量表与传统影像学技术,高分辨率MRI可检测斑块内出血等特征,但检查耗时久、费用高,难以作为常规随访手段;CT灌注成像(CTP)虽能评估血流动力学障碍,却无法直接反映斑块本身的病理成分与稳定性,因此,寻找一种便捷、精准且能量化斑块病理特征的复发风险评估工具,对优化临床预防策略具有重要意义^[2]。能谱CT作为新型影像学技术,已证实其定量参数可准确区分脂质斑块、混合斑块等不同类型,且能有效评估斑块稳定性,但目前相关研究仅停留在斑块性质的定性与初步定量分析,尚未将这些参数与症状性颈动脉斑块患者的卒中复发风险建立直接关联^[3]。基于此,本研究将深入分析能谱CT定量参数与症状性颈动脉斑块患者卒中复发的相关性,为临床提供一种高效、可及的复发风险评估方法,辅助制定个性化预防方案。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选择106例于2024年1月至2025年9月在我院治疗后复查的脑梗患者的临床资料展开回顾性分析,其中男59例,女47例;年龄50~87岁,平均年龄为(68.13±8.25)岁;基础疾病:高血压85例,糖尿病43例,高脂血症63例;吸烟史51例;狭窄程度:中度50例,重度56例。本研究经我院医学伦理委员会批准(2021-011)。

纳入标准: 发病至入院时间 <7 d;缺血性卒中诊断标准参照《中国各类主要脑血管病诊断要点》^[4];经颈动脉彩色多普勒超声明确症状性颈动脉斑块;均于治疗前接受头颈部能谱CT血管成像(CTA)检查,图像质量清晰;临床资料完整。排除标准:非动脉粥样硬化性血管病变;责任病灶考虑心源性栓塞或其他原因;房颤病史;对碘对比剂过敏;既往有同侧颈动脉血管内治疗或内膜剥脱术史;随访期间失访。

1.2 方法 (1)收集一般资料:收集所有患者性别、年龄、吸烟史、基础病史及狭窄程度等一般资料。(2)CT扫描:患者取仰卧位,头先进,下颌内收以减少牙齿伪影,采用能谱CT扫描仪(飞利浦Iqon CT),采用双筒高压注射器,经肘前静脉留置20G套管针,使用非离子型碘对比剂碘佛醇(350 mgI/mL),首先以5.0 mL/s的流率注射对比剂50 mL,紧接着以相同流率注射30 mL生理盐水,采用对比剂智能追踪触发技术,设置扫描参数:启用GSI能谱扫描模式,实现瞬时(<0.5 ms)管电压在80 kVp~140 kVp之间高速切换,自主动脉弓下缘1 cm处开始,向上扫描至颅顶,确保完全覆盖颈总动脉起始部至颅底,在降主动脉层面设置监测感兴趣区(ROI),当ROI内CT值达到预设阈值(120 HU)后,延迟5秒自动启动扫

【第一作者】倪俊,男,主管技师,主要研究方向:普放CT临床应用。E-mail: njhfd2yy521@163.com

【通讯作者】倪俊

描,管电流采用自动毫安技术,转速0.5 r/转,螺距0.992:1,探测器宽度80mm。扫描方向为头向足。常规图像重建:以50%自适应迭代重建(ASiR-V)水平重建层厚0.6 mm、层间隔0.6 mm的混合能量图像,用于常规血管形态学评估。能谱数据重建:将原始数据重建为层厚0.6mm的能谱基数据图像序列,传送至后处理工作站。同时,系统自动生成一组从40 keV到200keV、间隔10 keV的虚拟单能量图像(VMI),其中70 keV VMI被预设为标准图像用于常规阅片和斑块定位。在该层面斑块最大区域手动勾画ROI,尽量避开管腔和明显钙化区(CT值>130 HU),软件自动生成以下参数:①碘浓度(IC)和有效原子序数(Zeff);②能谱曲线斜率(λ_{HU}):计算40 keV与100 keV下的CT值差除以能量差(60 keV)的绝对值。③物质分离百分比:使用物质分离软件,计算斑块ROI内模拟的脂质核心、纤维组织、钙化的容积百分比;钙化成分通过钙基物质图单独识别并扣除。每项参数测量3次取平均值。(3)分组:对所有患者进行90 d随访,90 d后均进行CTA复查,记录责任血管同侧缺血性卒中复发情况,并进行分组,复发组(n=28)、未复发组(n=78)。

1.3 统计学方法 选用SPSS 26.0统计学软件对数据进行处理,计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用独立样本t检验;计数资料以(%)表示,组间比较行 χ^2 检验;通过多因素Logistic回归分析症状性颈动脉斑块患者卒中复发的影响因素。采用ROC分析能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的价值。

以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 症状性颈动脉斑块患者卒中复发的单因素分析 两组性别、年龄、基础疾病、吸烟史、狭窄程度、Zeff以及钙化百分比未见明显差异($P > 0.05$);复发组IC、脂质核心百分比高于未复发组, λ_{HU} 、纤维组织百分比低于未复发组($P < 0.05$)。见表1。

2.2 症状性颈动脉斑块患者卒中复发的多因素Logistic回归分析 将单因素中有差异信息纳入多因素Logistic回归分析,以症状性颈动脉斑块患者卒中复发情况为因变量(复发=1,未复发=0),以IC(连续变量)、 λ_{HU} (连续变量)、脂质核心百分比(连续变量)、纤维组织百分比(连续变量)为自变量。经多因素Logistic回归分析证实,IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比是症状性颈动脉斑块患者卒中复发的影响因素,均有 $P < 0.05$,见表2。

2.3 能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的ROC分析 经ROC分析证实,IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比可用于评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险,曲线下面积分别为0.766、0.789、0.811、0.826,联合评估可获得更高曲线下面积0.931,均有 $P < 0.05$ 。见表3。能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的ROC曲线见图1。

2.4 病例分析 见图2~3。

表1 症状性颈动脉斑块患者卒中复发的单因素分析[n(%)]

单因素	复发组(n=28)	未复发组(n=78)	t/ χ^2	P
性别			0.402	0.526
男	17(60.71)	42(53.85)		
女	11(39.29)	36(46.15)		
年龄(岁)	68.37±8.25	67.39±8.06	0.549	0.584
高血压	23(82.14)	62(79.49)	0.092	0.762
糖尿病	13(46.43)	30(38.46)	0.536	0.464
高脂血症	18(64.29)	45(57.69)	0.374	0.541
吸烟史	15(53.57)	36(46.15)	0.456	0.499
狭窄程度			0.288	0.592
中度	12(42.86)	38(48.72)		
重度	16(57.14)	40(51.28)		
能谱CT定量参数				
IC(mg/mL)	1.15±0.33	0.81±0.26	5.421	0.000
Zeff	7.52±0.28	7.48±0.31	0.601	0.549
λ_{HU}	2.08±0.68	2.76±0.78	4.114	0.000
脂质核心百分比(%)	39.22±10.08	29.65±9.33	4.510	0.000
纤维组织百分比(%)	54.13±11.17	59.76±10.42	2.403	0.018
钙化百分比(%)	10.76±3.89	10.54±3.57	0.273	0.785

表2 症状性颈动脉斑块患者卒中复发的多因素Logistic回归分析

变量	β	标准误	Wald χ^2	P	OR	95%可信区间
IC	0.682	0.283	5.811	0.016	1.978	1.136~3.444
λ_{HU}	0.692	0.294	5.527	0.018	1.998	1.122~3.558
脂质核心百分比	0.639	0.273	5.469	0.019	1.895	1.109~3.238
纤维组织百分比	0.670	0.281	5.692	0.017	1.954	1.127~3.388

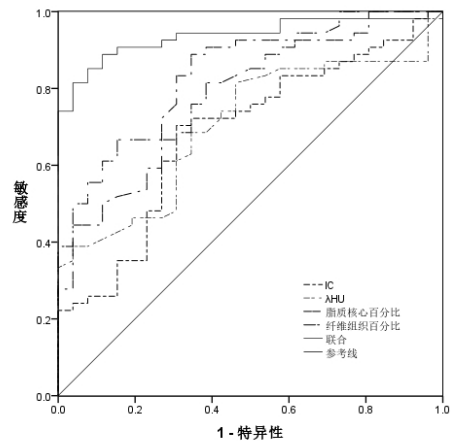


图1 能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的ROC曲线。

表3 能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的ROC分析

指标	曲线下面积	标准误	P	95%CI	最佳截断值	敏感度	特异性
IC	0.766	0.061	0.008	0.564~0.887	0.93 mg/mL	0.723	0.757
λ_{HU}	0.789	0.053	0.004	0.592~0.835	2.47	0.787	0.781
脂质核心百分比	0.811	0.046	0.000	0.707~0.915	35.22 %	0.806	0.823
纤维组织百分比	0.826	0.040	0.000	0.729~0.923	56.17 %	0.794	0.854
联合	0.931	0.022	0.000	0.887~0.988	-	0.863	0.921

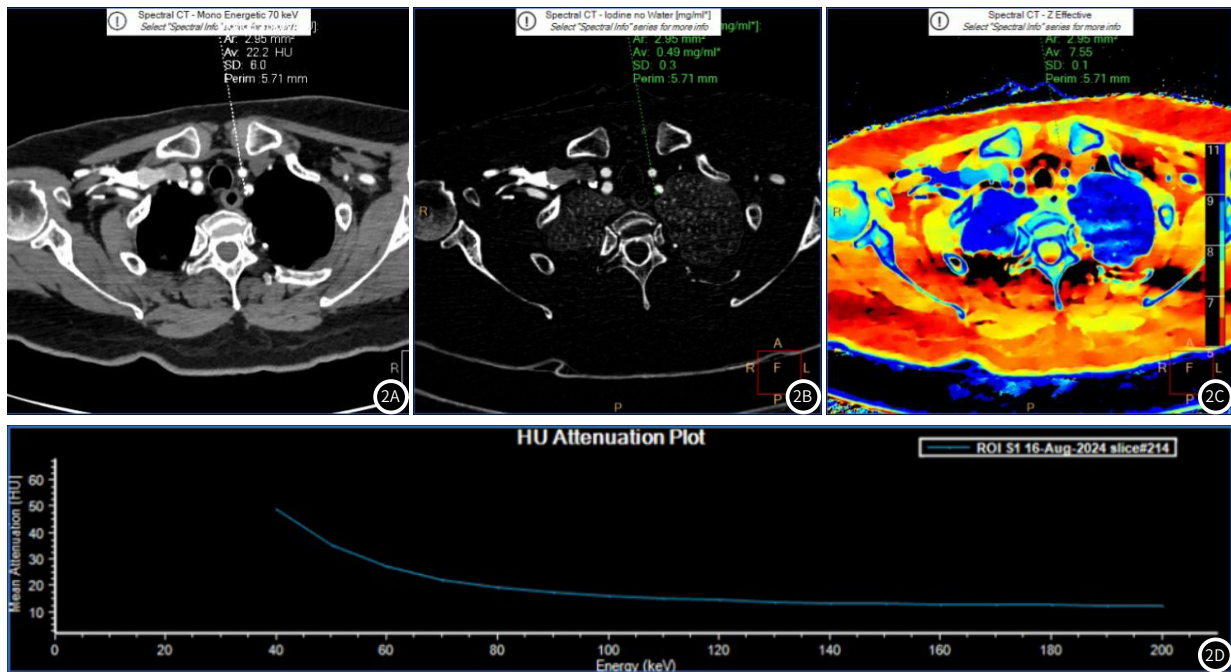


图2A~2D 68岁，女性患者，2024年8月16日，首诊因脑梗塞入院，CTA显示双侧颈总动脉及颈内动脉起始处钙化斑块及混合斑块，其中左侧颈内动脉起始处局部管腔重度狭窄，右侧颈内动脉起始处管腔中度狭窄，余管腔轻度狭窄。图为左颈内动脉起始处非钙化斑块的70keV、碘密度图、有效原子序数图、能谱曲线，分别测量获得CT值、碘密度、有效原子序数及能谱曲线。

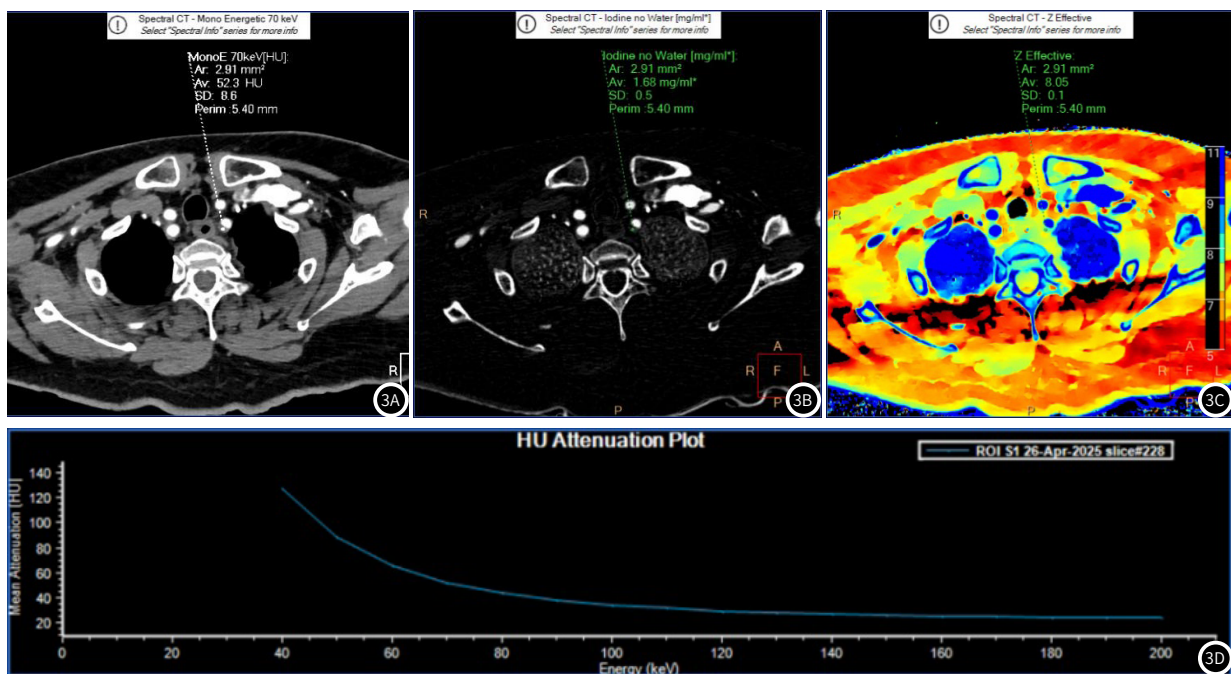


图3A~3D 68岁，女性患者，2025年4月26日，因无法言语3小时入院复查，CTA显示双侧锁骨下动脉可见非钙化斑块及混合斑块，相应管腔轻度狭窄；双侧颈总动脉可见多发非钙化斑块及混合斑块，相应管腔轻度狭窄；左侧颈内动脉C1-C4段闭塞，双侧颈内动脉虹吸部可见钙化斑块，相应管腔轻度狭窄；左侧大脑前动脉A1段起始部可见节段性轻度狭窄；左侧大脑中动脉M2段可见节段性中度狭窄；右侧椎动脉起始部可见钙化斑块，相应管腔重度狭窄，左侧椎动脉管径较右侧纤细，V1-V2段可见多发节段性重度狭窄。图为左颈内动脉起始处非钙化斑块的70keV、碘密度图、有效原子序数图、能谱曲线，分别测量获得CT值、碘密度、有效原子序数及能谱曲线。

3 讨论

颈动脉粥样硬化斑块的不稳定性是驱动症状性患者卒中复发的核心机制,近年来相关研究将斑块破裂、糜烂及喷发样钙化结节等特征纳入风险评估体系,使临床认知从以狭窄为中心转向以斑块稳定性为中心,尽管现有防治策略可降低长期风险,但对早期复发的控制效果有限,症状性慢性颈动脉闭塞患者即便接受最佳药物治疗,2年复发风险仍较高,因此,建立基于斑块病理特征的量化评估体系,对识别高复发风险患者并实施靶向干预至关重要^[5-6]。双能CT能谱成像已被证实可通过定量参数准确评估颈动脉斑块性质,其灵敏度、特异度较高,且具有检查快速、成本适中、兼容性好等优势,然而,现有研究仅验证了其在斑块类型鉴别中的价值,尚未探索其定量参数对卒中复发风险的预测效能^[7]。

研究发现,复发组IC、脂质核心百分比高于未复发组, λ_{HU} 、纤维组织百分比低于未复发组,多因素Logistic回归分析证实,以上因素是症状性颈动脉斑块患者卒中复发的影响因素,提示IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比与症状性颈动脉斑块患者卒中复发的关系密切,与姬智艳^[8]等研究结果相互印证。高IC反映斑块内新生血管密度增加及炎症反应增强,新生血管壁薄且通透性高,易破裂导致斑块内出血,同时炎症因子进一步破坏斑块结构完整性,加剧斑块不稳定性^[9]。脂质核心百分比升高会显著削弱斑块的机械强度,一方面过量脂质堆积会压迫纤维帽使其变薄、张力增加,另一方面脂质成分的氧化应激反应会诱发局部炎症,加速纤维帽降解,大幅提升斑块破裂风险,而破裂后暴露的脂质核心会迅速激活血小板聚集及凝血瀑布反应,形成血栓或脱落为微栓子,阻塞颅内供血血管^[10-11]。 λ_{HU} 降低与斑块成分异质性密切相关,其本质是斑块内钙化等高密度成分与脂质、坏死组织等低密度成分的比例失衡,结构不均一性会导致斑块应力分布异常,进一步降低其力学稳定性,且往往伴随有效血管壁支撑结构减少^[12]。纤维组织百分比降低则直接削弱了斑块的支撑功能,纤维组织作为斑块的支撑成分,不仅能维持斑块形态稳定,其含有的胶原纤维等成分还可抑制炎症反应、减少脂质沉积,纤维组织不足时,斑块缺乏足够的机械保护,更易在血流剪切力作用下发生破裂或脱落^[13]。另ROC分析证实,IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比可用于评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险,曲线下面积分别为0.766、0.789、0.811、0.826,联合评估可获得更高曲线下面积0.931,提示能谱CT定量参数评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的敏感度、特异度较高。能谱CT定量参数通过捕捉斑块不同维度的病理生理特征评估卒中复发风险,IC可间接反映斑块内新生血管密度及炎症浸润程度,不稳定斑块因炎症反应活跃、新生血管丰富,碘摄取水平与稳定斑块存在显著差异,而新生血管脆弱易破裂、炎症会加剧斑块侵蚀,均增加血栓形成风险^[14]; λ_{HU} 能够量化斑块组织的密度异质性,不稳定斑块常伴随脂质、坏死组织、钙化及纤维成分的混杂分布,密度不均一性显著升高,该参数可敏感识别这一与斑块破裂密切相关的结构特征^[15];脂质核心百分比直接反映斑块核心的脂质堆积程度,脂质核心扩大易导致纤维帽变薄、张力增加,显著提升斑块破裂概率,而破裂后暴露的脂质成分会激活血小板聚集及凝血瀑布,诱发动脉-动脉栓塞或管腔闭塞^[16];纤维组织百分比则与斑块结构稳定性直接相关,纤维组织占比降低意味着斑块抗破裂能力减弱,复发风险相应升高,上述参数分别从斑块血供炎症状态、组织异质性、核心成分构成及结构支撑强度四个关键维度,全面覆盖了斑块不稳定的核心病理机制,更全面、精准地识别高复发风险患者^[17-18]。

综上所述,能谱CT定量参数中IC、 λ_{HU} 、脂质核心百分比、纤维组织百分比是评估症状性颈动脉斑块患者卒中复发风险的独立因素,临床诊治时可结合以上因素进一步筛查复发高危患者,及时采取防治措施。

参考文献

- [1] 胡佳圆, 黄娟, 宋焱. 影像生物标志物在缺血性脑卒中复发风险评估中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(4): 396-401.
- [2] 杨中杰, 郭爱菊, 高敬平. 急性缺血性卒中中易患体质类型与颈动脉易损斑块CTA影像表现相关性研究[J]. 罕少疾病杂志, 2025, 32(5): 27-29.
- [3] 徐佳玮, 郑穗生, 吴宗山, 等. 多模态能谱CT一站式头颈血管成像对急性后循环脑缺血诊断价值研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(8): 1480-1486.
- [4] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(9): 710-715.
- [5] 张征, 门永忠, 郭兴, 等. 高频彩色多普勒超声在脑梗死患者颈动脉斑块性质评价中的应用价值分析[J]. 罕少疾病杂志, 2023, 30(4): 25-26.
- [6] 杨贻金, 曾文赞, 黄志平, 等. 高频超声颈动脉斑块特征鉴定与老年动脉硬化患者脑卒中风险的关系[J]. 中国老年学杂志, 2025, 45(9): 2106-2110.
- [7] 翟沛清, 王灵杰, 石彩云, 等. 整合能谱CT定量参数的机器学习模型对症状性颈动脉斑块识别的应用研究[J]. 临床放射学杂志, 2024, 43(1): 22-28.
- [8] 姬智艳, 刘德祥, 陈显杰, 等. 能谱CT分析颈动脉斑块成分及其与脑梗死的关系[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(9): 1309-1313.
- [9] 张何, 龙娟, 周德兴, 等. 双能量CT血管成像颈动脉斑块参数与急性脑卒中事件发生的相关性[J]. 实用放射学杂志, 2025, 41(6): 910-914.
- [10] 林光耀, 隋愿, 李依明, 等. 能谱CT联合MR高分辨率管壁成像对颈动脉斑块成分分析, 病理对照及诊断效能[J]. 中国临床医学影像杂志, 2022, 33(1): 15-19, 23.
- [11] 朱刚明, 董永德, 朱瑞婷, 等. 双能量CT对急性缺血性脑卒中患者机械取栓后出血转化分型的评估价值[J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(2): 198-203.
- [12] 高慧敏, 陈子琦, 陈英敏. 双能CT在急性缺血性脑卒中早期诊断及术后评估中的研究进展与应用[J]. 影像科学与光化学, 2025, 43(5): 14-22.
- [13] 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.
- [14] Chang F C, Wu C J, Ling K, et al. Peritherapeutic intra-arterial flow changes predict long-term stent patency in patients with severe intracranial artery stenosis receiving PTAS[J]. European Journal of Radiology, 2025, 183(1): 111913-111913.
- [15] Lao Q, Zhou R, Wu Y, et al. Predicting vulnerability status of carotid plaques using CTA-based quantitative analysis[J]. Journal of Cardiovascular Pharmacology, 2025, 85(3): 217-224.
- [16] Duprez T, Vlassenbroek A, Peeters A, et al. Preliminary experience of CT imaging of the ischaemic brain penumbra through spectral processing of multiphase CTA datasets[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 11431-11431.
- [17] 刘良进, 毕俊英, 曾艳妮, 等. 能谱CT成像对颈动脉粥样硬化斑块性质评估及其与脑卒中发生率的关系[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(1): 44-46.
- [18] 张白雪, 薛冠男. 头颅CT血管造影联合能谱CT全脑灌注评估缺血性脑卒中患者脑血管狭窄程度的价值[J]. 实用医学影像杂志, 2022, 23(6): 592-595.

(收稿日期: 2026-01-05)

(校对编辑: 赵望淇)