

颅脑CT血管成像临床应用研究及技术现状与进展

李佩^{1,2}, 高明², 王培洁², 王科鑫², 李娟², 赵娟², 陈月芹^{2*}

¹济宁医学院临床医学院, 山东 济宁

²济宁医学院附属医院医学影像科, 山东 济宁

收稿日期: 2024年3月27日; 录用日期: 2024年4月21日; 发布日期: 2024年4月29日

摘要

常规CT难以评价颅脑动脉血管病变及颅内占位性病变与血管的关系。颅脑CT血管成像(Computed Tomography Angiography, CTA)是一种无创性快速评价血管系统的影像学检查技术。本文先总结了颅脑血液供应、血管解剖及分段, 综述颅脑CTA在常见脑血管疾病中的应用, 技术现状、图像后处理技术、新技术进展及优缺点, 最后对未来发展方向进行了总结与展望。

关键词

颅脑CTA, 脑血管疾病, 血管解剖, 新技术

Present Situation and Progress of Clinical Application Research and Technology of Craniocerebral CT Angiography

Pei Li^{1,2}, Ming Gao², Peijie Wang², Kexin Wang², Juan Li², Juan Zhao², Yueqin Chen^{2*}

¹Clinical Medical College of Jining Medical University, Jining Shandong

²Department of Medical Imaging, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining Shandong

Received: Mar. 27th, 2024; accepted: Apr. 21st, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

It is difficult to evaluate the relationship between cranial arterial lesions and intracranial space-
*通讯作者。

文章引用: 李佩, 高明, 王培洁, 王科鑫, 李娟, 赵娟, 陈月芹. 颅脑 CT 血管成像临床应用研究及技术现状与进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(4): 2612-2618. DOI: 10.12677/acm.2024.1441336

occupying lesions and blood vessels by conventional CT. Craniocerebral CT angiography (Computed Tomography Angiography, CTA) is a non-invasive imaging technique for rapid evaluation of vascular system. This paper first summarizes the cranial blood supply, vascular anatomy and segmentation, summarizes the application of craniocerebral CTA in common cerebrovascular diseases, technical status, image post-processing technology, new technology progress, advantages and disadvantages, and finally summarizes and prospects the future development direction.

Keywords

Craniocerebral CTA, Cerebrovascular Disease, Vascular Anatomy, New Technique

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CT血管成像(Computed Tomography Angiography, CTA)是静脉注射对比剂,经血液循环至相应动脉,通过螺旋CT在受检者靶血管内对比剂充盈的高峰期进行连续的原始数据采集,运用计算机的后处理功能重建出靶血管,从而应用于疾病的诊断。CTA与数字减影血管造影(Digital Subtraction Angiography, DSA)相比较,具有无创伤性、检查时间短、操作简单、费用低、可重复性强等优势。有研究表明多层螺旋CTA诊断动脉瘤的敏感性、特异性和准确性分别是97.0%、98.3%和97.6%,在颅脑血管疾病中的诊断价值和DSA相当[1]。颅脑CTA目前已经成为诊断脑血管病变、观察血管解剖位置及长期随访观察的首选影像学检查方式[2][3]。

动态CTA也称4D-CTA(4-Dimensions-Computed Tomography Angiography),指一种新型脑血管疾病影像学检查技术,在常规CTA基础上多了一个时间维度,多期相记录造影剂在血管内流入流出的全过程。4D-CTA不仅具备常规CTA的功能,同时动态观察颅脑血管的血流变化[4],具有较高的密度分辨率和时间分辨率。本文综述了颅脑血管解剖、颅脑CTA在常规脑血管疾病中的应用、检查技术、图像后处理、新技术进展,最后对其未来发展方向进行了总结与展望。

2. 颅脑血管解剖

颅脑的血液供应来源于颈内动脉(Internal Carotid Artery, ICA)和椎基底动脉(Vertebrobasilar Artery, VA)系统。颈内动脉入颅后依次分出眼动脉、后交通动脉、脉络膜前动脉、大脑前动脉和大脑中动脉。颈内动脉主要供应眼部及大脑半球前3/5部分即额叶、颞叶、顶叶及基底节等的血液。椎-基底动脉在颅内由近端至远端先后分出小脑后下动脉、小脑前下动脉、脑桥支、内听动脉、小脑上动脉等,供应小脑及脑干的血液。两侧大脑前动脉之间由前交通动脉,两侧颈内动脉与大脑后动脉之间由后交通动脉连接起来,构成Willis环。

颈内动脉Bouthillier分段法(7分法):颈段(C1)起于颈总动脉分叉水平,终止于颈动脉管颅外口。岩段(C2)位于颈动脉管内,起于颈动脉管颅外口,终止于破裂孔后缘。破裂孔段(C3)起于颈动脉管末端,越过孔部,但不穿过这个孔,在破裂孔的垂直管内上升,向着海绵后窦,止于岩舌韧带上缘。海绵窦段(C4)始于岩舌韧带上缘,止于近侧硬膜环。床段(C5)起于近侧硬膜环,止于远侧硬膜环。眼段(C6)起于远侧硬膜环,止于后交通动脉起点的近侧。交通段(C7)起于紧靠后交通动脉起点的近侧,止于颈内动脉分叉处。

大脑前动脉(Anterior Cerebral Artery, ACA)分段, A1 段: 水平段, 起始部至前交通动脉之间; A2 段: 上行段, 为前交通动脉至胼胝体膝部以下的一段; A3 段: 膝段, 沿胼胝体膝部前缘走行, 与其弯曲一致; A4 段: 胼周段, 位于胼胝体沟内, 又名胼周动脉。A5 段: 终段, 为大脑前动脉终末支, 楔前动脉。

大脑中动脉(Middle Cerebral Artery, MCA)分段, M1 段: 眶后段(水平段), 由颈内动脉发出后, 水平向外走行, 长约 3 cm, 发出重要分支“豆纹动脉”。M2 段: 岛叶段(回旋段), 呈“U”形, 在岛叶表面向后上方走行; M3 段: 侧裂段, M2 基底部分发出向中央沟上升的升动脉, 分为眶额动脉及额顶升动脉。M4 段: 分叉段, 为大脑中动脉分出的角回动脉、顶后动脉及颞后动脉。M5 段: 为大脑中动脉的终末支, 角回动脉。

大脑后动脉(Posterior Cerebral Artery, PCA)分为 4 段, P1 段从起始到中脑腹侧的一段。P2 段围绕中脑向后走行的一段。P3 段和 P4 段均为大脑后动脉的终末支。

椎动脉(Vertebral Artery, VA)分段, V1 段(横突孔段): 椎动脉在第 6 至第 2 颈椎横突孔内上升的一段。V2 段(横段): 椎动脉穿出枢椎横突孔后, 横行向外的一段。V3 段(寰椎段): 从枢椎外端弯曲向上, 再垂直上行至寰椎横突孔为止的一段。V4 段(枕骨大孔段): 自椎动脉 V3 段上端水平向内行一小段后, 再弯向上垂直上行入枕骨大孔的一段。V5 段(颅内段): 椎动脉入枕骨大孔后, 斜向中线上行与对侧同名动脉汇合成基底动脉前的一段椎动脉。

颅脑 CTA 能全方位地对颅内血管进行有效的观察, 诊断血管疾病, 明确占位性病灶与周围脑血管的位置关系, 为进一步开展治疗提供有力的证据。

3. 颅脑 CTA 在常规脑血管疾病中的应用

近十几年来, 颅脑血管疾病的发病率持续上升, 具有高发病率、高致残率、高死亡率的特点[5], 严重危害到患者的身心健康。因此, 在一定的时间内快速准确完成检查指导下一步治疗对患者康复及预后尤为关键, 颅脑 CTA 技术具有明显的优势[6]。

3.1. 在出血性脑血管疾病诊断中的应用

脑出血是指脑组织内出血或脑血管破裂所引起的一种疾病, 其严重程度取决于出血部位和出血量[7][8]。颅脑 CTA 成像技术在早期诊断脑出血病因中发挥着重要的作用[9], 特别适用于急性脑出血无法行 DSA 检查的患者。文献表明因颅内动脉瘤导致的蛛网膜下腔出血的发生率可达到 50% [10]。叶海涛认为, 颅脑 CTA 可以对动脉瘤患者是否合并蛛网膜下腔出血进行判断, 其诊断价值较高, 并且可指导动脉瘤相应的手术方案[11]。美国心脏协会/美国卒中协会(AHA/ASA)动脉瘤性蛛网膜下腔出血管理指南建议, 颅脑 CTA 检查可以决策检查出的动脉瘤修复类型[12]。高血压性脑出血具有病情进展迅速、起病快的特点, 如果不及时发现及时治疗可导致患者死亡[13]。另外, 国内外不少学者将颅脑 CT 血管成像应用于预测急性脑出血血肿的扩大, 认为颅脑 CTA 的斑点征是判断有无活动性出血的重要标志, 一旦出现斑点征, 就意味着患者具有出血量加大, 及较高的死亡风险[14]。

3.2. 在缺血性脑血管疾病诊断中的应用

近 80% 的脑血管疾病可确诊为缺血性脑血管疾病, 其中脑血管狭窄、血管闭塞是导致缺血性脑血管疾病的主要原因。颅脑 CTA 是诊断血管狭窄、闭塞最重要的影像学检查方法[15], 能够准确评估患者的颅内血管走形、狭窄程度和闭塞部位。杜捷通过比较颅脑血管阻塞患者在急性期的 CTA 与 DSA 结果, 发现这两种方法诊断的一致性高达 86% 以上, 进一步证实了颅脑 CTA 检查的真实可靠性[16]。超早期脑梗死主要指发病后 1 到 6 小时内的脑梗死疾病类型, 此期间, 脑组织没有明显的缺血性坏死, 这是挽救濒临坏死脑细胞的最佳时机, 对超早期脑梗死患者的治疗方案以及预后效果都有重要意义[17]。马运萍认

为对于超早期脑梗死患者应该推广应用颅脑 CTA [18]。斑块是导致颅内血管狭窄和闭塞的主要原因，其中软斑块是发生缺血性脑梗死最危险因素。颅脑 CTA 可用于评估血栓程度，也可对近端血管闭塞患者的再通治疗进行指导。研究表明 0~5 mm 的血栓长度再通率为 42.8%，长度越长，再通率就越低，血栓长度大于 20 mm 的患者再通率为零，基于 2.5 mm 层厚 CT 平扫图像进行血栓长度的测量[19] [20]。

3.3. 在钝性脑血管损伤诊断中的应用

钝性脑血管损伤(BCVI)，即脑血管系统遭受到的创伤，是一种罕见但具有潜在破坏性的损伤，影响了 1%~3%的钝性创伤患者，甚至会危害患者生命，而且许多患者在早期阶段并没有明显的症状，容易被漏诊或误诊。国外血管成像指南以及相关的协会建议，对于探测器在 8 层以上的颅脑 CTA 可作为筛查该病的金标准[21]。

4. 扫描技术

目前颅脑 CTA 主要有三种成像技术，小剂量团注测试(Test-Bolus)技术、对比剂团注追踪(Bolus Tracking)技术[22]和经验值法。

1) Bolus Tracking 技术又名团注追踪法，通过实时监测目标血管的 CT 值，自动或者手动触发扫描的检查方法[15] [23] [24]。

2) Test-Bolus 技术通过注射少量对比剂，在目标层面实时监测 ROI 血管的 CT 值，结合计算机软件形成时间—密度曲线(Time-Density Curve, TDC)，根据 ROI 血管峰值时间，确定 CTA 扫描延迟时间的方法[25] [26]。

3) 经验值法 是按照经验法设定延迟时间行颅脑 CTA 检查，所得数据发送到工作站进行图像后处理。此法简单，但由于个体差异较大，经验值法延迟扫描时不一定处于靶血管 CT 值的峰值，误差较大，故不常用。

Bolus Tracking 技术虽然操作简单，但无法准确获得颅脑血管的达峰时间，阈值设置过低、过高或者受到干扰都影响颅脑 CTA 扫描启动时间，且对比剂用量大。Test-Bolus 技术通过 ROI 血管的 TDC 曲线提前预知血管的达峰时间、峰值点的 CT 值及患者血液循环快慢程度，可以准确计算颅脑 CTA 的扫描启动时间，获取最佳扫描时机，得到更高的图像质量[27]。有研究认为 Test-Bolus 技术是当前最佳和首选的个性化测定头颈 CTA 达峰时间的方法[28]。如何在保证颅脑 CTA 图像质量的前提下，合理降低对比剂剂量和辐射剂量仍然是目前研究的热点[29]。目前国内外很多学者从降低管电压、管电流、利用能谱扫描技术、对比剂注射方案、Test-Bolus 技术改良、重建算法等方面对颅脑 CTA 成像技术做了大量研究[30] [31]。杨正彬，谢惠等认为精确计算增强扫描延迟时间可降低对比剂用量[32]。付永春认为采用低管电压可降低对比剂的用量同时不影响诊断需求[33]。罗昆，董仟等认为个性化对比剂注射方案结合单能量成像可减少对比剂使用的同时进一步提高图像质量[34]。

5. 图像后处理

多层螺旋 CT 具有强大的软件处理功能，减影法自动骨去除技术是颅脑 CTA 后处理过程中最重要的一个环节，可实现骨骼较完整去除，特别是颅内基底环部分剪影更彻底，提高血管重建效果[35] [36]。其中多平面重组(Multiplanar Reformation, MPR)、容积再现(Volume Rendering, VR)、最大密度投影(Maximum Intensity Projection, MIP)是常用的后处理技术。

1) 减影法 平扫期作为剪影蒙片，增强期作为剪影期，由 Syngo VIA 处理工作站自动识别期像，得到一组去骨的原始数据，用这组数据可重建得到颅脑 CTA 图像。常规的 CTA 图像由于骨骼的影响，对评价颈内动脉 C4 段较为困难，但是减影 CTA 图像对颈内动脉 C4 段的评价有帮助，已经成为评价可视

化颅内动脉 C4 段动脉瘤的主要方法[37] [38]。CT 双能量自动去骨技术是一种无创, 快速而有效的颅脑 CTA 检查新手段, 其图像质量较好, 易被临床医生接受, 几乎可以替代 DSA 检查[39]。血管狭窄程度的判定, 原始横轴位增强图像的信息更具有参考价值。

2) 容积再现技术(VR)是一种计算机图形学技术, 它通过使假定的投射射线从给定的角度穿过扫描容积, 对容积内的像素信息进行综合显示。VR 技术由深度、遮蔽表面显示技术、旋转技术及适当的信号强度切割技术共同施行, 赋予影像不同的伪彩与透明度, 从而提供类似真实三维结构的感受。临床应用中, VR 可直观地显示血管病变及形态, 如颅内动脉瘤, VR 可显示动脉瘤与载瘤动脉的关系, 并可以测量瘤体及瘤颈长度, 能进行全方位立体观察[40], 帮助神经外科医生制定手术方案。

3) 最大密度投影(MIP)是把扫描后的若干层图像叠加起来, 把其中的高密度部分做投影, 低密度部分去掉, 形成高密度部分三维结构的二维投影, 可以从任意角度做投影, 给视者以立体感。MIP 的最大优势是灰阶值可以真实反映血管的 CT 值, 能很好地显示血管的狭窄、扩张及充盈缺损, 区分管壁钙化和管腔对比剂具有较好的敏感性。

4) 多平面重组(MPR)是横断面影像数据通过后处理技术使体素重新排列, 根据诊断需要显示任意方向的三维断面方法, 能很好的显示颅脑血管狭窄及血管壁钙化情况。MPR 还可以直观显示颅内血管病变外其它病变, 直观定位病变与毗邻组织的关系, 减少病变的漏诊[41]。

6. 新技术

4D-CTA 技术一次检查即可获取 CT 平扫、CT 灌注成像(Computed Tomography Perfusion, CTP)和 CT 血管成像等数据, 为临床医生诊断疾病提供更多信息, 并且随着多层螺旋 CT 及各种后处理技术的发展, 实现了动态容积扫描成像, 具有图像质量高、辐射剂量低、对比剂用量低等优点[42]。4D-CTA 在急性缺血性脑卒(Acute Ischemic Stroke, AIS)、脑动静脉畸形(Cerebral Arteriovenous Malformation, CAVM)、颅内动脉瘤(Intracranial Aneurysm, IA)和慢性缺血性脑血管病的术前评估中逐渐成为一种替代 DSA 的非侵入性方案, 更多的用于临床实践[43]。国外有研究表明, 通过低对比剂浓度和低辐射剂量扫描方案实现的 4D-CTA, 其图像质量不低于常规 CTA, 可在一定程度上替代常规 CTA [44]。4D-CTA 对于微小病变或者末端细小分支血管的显示能力较差, 很难判断病变与邻近供血动脉的关系, 从而导致漏诊或者误诊。

7. 总结与展望

颅脑 CTA 已成为诊断血管疾病的首选检查方案, 随着新型探测器, 光子 CT 及重建算法的革新, 颅脑 CTA 检查及后处理技术的不断创新, 颅脑 CTA 将替代 DSA 以其无创、快速、准确及高质量的影像图像服务于患者及临床。

基金项目

山东省自然科学基金(ZR2021MH109)。

参考文献

- [1] 高续, 蒋哲. 256 层螺旋 CT 血管造影在颅脑血管疾病中的诊断效果及治疗指导[J]. 影像研究与医学应用, 2019, 3(23): 221-222.
- [2] 中华医学会放射学分会. 头颈部 CT 血管成像扫描方案与注射方案专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(2): 81-87.
- [3] Diouf, A., Fahed, R., Gaha, M., *et al.* (2018) Cervical Internal Carotid Occlusion versus Pseudo-Occlusion at CT Angiography in the Context of Acute Stroke: An Accuracy, Interobserver, and Intraobserver Agreement Study. *Radiology*, **286**, 1008-1015. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017170681>

- [4] Meijs, M., Pegge, S., Murayama, K., *et al.* (2019) Color-Mapping of 4D-CTA for the Detection of Cranial Arteriovenous Shunts. *American Journal of Neuroradiology*, **40**, 1498-1504. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6156>
- [5] 张锦亮, 杨光明. 三维 CTA 在颅内动脉瘤患者中的临床诊断价值分析[J]. 罕见疾病杂志, 2018, 25(2): 7-8.
- [6] 梁建乐, 冯飞, 袁知东. 头颈部血管病变诊断中 64 排螺旋 CT 血管成像技术与磁共振成像技术的应用分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(5): 79-80.
- [7] 李舟, 姜艳涛, 朱敏. 高血压脑出血患者影像学特征与认知功能障碍的相关性研究[J]. 医药论坛杂志, 2024, 45(4): 433-436, 440.
- [8] 王煜, 秦永明, 郭传军, 等. 急性高血压性脑出血患者的早期血压管理与预后关系的一项前瞻性研究[J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2024, 19(2): 183-186, 190.
- [9] Prestigiacomo, C.J., Sabit, A., He, W., Jethwa, P., Gandhi, C. and Russin, J. (2010) Three Dimensional CT Angiography versus Digital Subtraction Angiography in the Detection of Intracranial Aneurysms in Subarachnoid Hemorrhage. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, **2**, 385-389. <https://doi.org/10.1136/jnis.2010.002246>
- [10] 王冠民. 脑梗死患者脑血管狭窄诊断中应用 64 排 128 层螺旋 CT 机头颈部 CTA 检查的效果[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(16): 165-166.
- [11] 叶海涛. 64 排螺旋 CT 头颅 CTA 检查对脑动脉瘤合并自发性蛛网膜下腔出血的诊断效果[J]. 中国现代药物应用, 2019, 13(11): 39-41.
- [12] Tagami, T., Kuwamoto, K., Watanabe, A., *et al.* (2014) Optimal Range of Global End-Diastolic Volume for Fluid Management after Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage: A Multicenter Prospective Cohort Study. *Critical Care Medicine*, **42**, 1348-1356. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000000163>
- [13] 赵春刚. 核磁共振血管成像与螺旋 CT 血管成像技术诊断脑血管疾病的价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(12): 67-68.
- [14] Delgado Almandoz, J.E., Yoo, A.J., Stone, M.J., *et al.* (2009) Systematic Characterization of the Computed Tomography Angiography Spot Sign in Primary Intracerebral Hemorrhage Identifies Patients at Highest Risk for Hematoma Expansion: The Spot Sign Score. *Stroke*, **40**, 2994-3000. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.554667>
- [15] Tomizawa, N., Ito, S., Nakao, T., *et al.* (2019) Double ROI Timing Bolus Technique to Perform Aortic CT Angiography with a 9-Second Contrast Injection Duration. *American Journal of Roentgenology*, **213**, 96-103. <https://doi.org/10.2214/AJR.18.20766>
- [16] 杜捷. 头颈部 CTA 在诊断头颈部血管疾病中的临床应用[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(19): 125-127.
- [17] 许欣, 全志成, 陈亮. MRI 与 MSCT 对术前胃癌淋巴结分期诊断的临床价值[J]. 临床误诊误治, 2019, 32(10): 94-98.
- [18] 马运萍. 螺旋 CT 脑灌注成像与 CT 血管成像在超早期脑梗死中的应用[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(20): 41-43.
- [19] Menon, B.K. and Demchuk, A.M. (2011) Computed Tomography Angiography in the Assessment of Patients with Stroke/TIA. *The Neurohospitalist*, **1**, 187-199. <https://doi.org/10.1177/1941874411418523>
- [20] 夏文强, 孙珂珂, 黄聪. 脑动脉瘤的 CTA 和 MRA 及 DSA 对照分析研究[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(4): 31-33.
- [21] 刘治兵, 袁圆, 张锐, 等. 头颈部动脉 CTA 检查在头颈部血管疾病诊断中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(10): 132-133.
- [22] 中华医学会影像技术分会. 急性脑卒中多层螺旋 CT 检查技术专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(9): 839-845.
- [23] Saade, C., Chokr, J., Naffaa, L., *et al.* (2019) Reduced Contrast Volume and Radiation Dose during Computed Tomography of the Pancreas: Timing-Specific Contrast Media Protocol. *Academic Radiology*, **26**, 480-488. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2018.05.027>
- [24] Tomizawa, N., Ito, S., Nakao, T., *et al.* (2019) Aortic CT Angiography Using the Double Region of Interest Timing Bolus Technique: Feasibility of 80 KVp Scanning in Lean Patients. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **35**, 2113-2121. <https://doi.org/10.1007/s10554-019-01660-3>
- [25] Kamr, W.H., El-Tantawy, A.M., Harraz, M.M., *et al.* (2020) Pulmonary Embolism: Low Dose Contrast MSCT Pulmonary Angiography with Modified Test Bolus Technique. *European Journal of Radiology Open*, **7**, Article ID: 100254. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2020.100254>
- [26] Noda, Y., Nakamura, F., Kawai, N., *et al.* (2021) Optimized Bolus Threshold for Dual-Energy CT Angiography with Monoenergetic Images: A Randomized Clinical Trial. *Radiology*, **300**, 615-623.

<https://doi.org/10.1148/radiol.2021210102>

- [27] 刘志强, 林进丽, 罗庆禄, 等. Test Bolus 法与 Bolus Tracking 法在头颈 CTA 中的对比研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(11): 20-22.
- [28] 冯晨, 方玉, 张德川, 等. 头颈 CTA 达峰时间相关因素的分析研究[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(6): 727-733.
- [29] 徐军, 胡孝梨, 罗昆, 等. “双低”扫描联合个性化对比剂注射方案在颅脑 CTA 中的应用价值[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(12): 2301-2305.
- [30] 宋双, 申洪宪, 刘中才, 等. NeuViz Prime 型能谱 CT 最佳单能量技术对行头颅能谱 CTA 检查患者颅脑结构评价[J]. 中国医学装备, 2021, 18(1): 19-22.
- [31] 杨尚文, 邵明冉, 杨献峰, 等. “三低”技术联合全模型迭代重建算法在头颈部 CT 血管成像中的可行性研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(1): 62-67.
- [32] 杨正彬, 谢惠, 吴绍全, 等. Test-Bolus 改良法在头颈部 CTA 检查中的应用价值[J]. 放射学实践, 2019, 34(5): 486-490.
- [33] 付永春. 个体化低剂量组合扫描方案对头颈部 CT 血管成像图像质量及辐射剂量的研究[J]. 中国医刊, 2020, 55(6): 639-641.
- [34] 罗昆, 董仟, 杨明, 等. 双层探测器光谱 CT 单能量成像联合个性化注射方案在颅脑 CT 血管成像中的应用研究[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(2): 196-200.
- [35] Deng, K., Liu, C., Ma, R., *et al.* (2009) Clinical Evaluation of Dual-Energy Bone Removal in CT Angiography of the Head and Neck: Comparison with Conventional Bone-Subtraction CT Angiography. *Clinical Radiology*, **64**, 534-541. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2009.01.007>
- [36] Meyer, B.C., Werncke, T., Hopfenmüller, W., *et al.* (2008) Dual Energy CT of Peripheral Arteries: Effect of Automatic Bone and Plaque Removal on Image Quality and Grading of Stenoses. *European Journal of Radiology*, **68**, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2008.09.016>
- [37] Watanabe, Y., Uotani, K., Nakazawa, T., *et al.* (2009) Dual-Energy Direct Bone Removal CT Angiography for Evaluation of Intracranial Aneurysm or Stenosis: Comparison with Conventional Digital Subtraction Angiography. *European Radiology*, **19**, 1019-1024. <https://doi.org/10.1007/s00330-008-1213-5>
- [38] Morhard, D., Fink, C., Graser, A., *et al.* (2009) Cervical and Cranial Computed Tomographic Angiography with Automated Bone Removal: Dual Energy Computed Tomography versus Standard Computed Tomography. *Investigative Radiology*, **44**, 293-297. <https://doi.org/10.1097/RLI.0b013e31819b6fba>
- [39] 王超, 杨少华, 徐锐. 双源 CT 双能量自动减影去骨技术在颈动脉造影中的临床应用[J]. 医学影像学杂志, 2014, 24(9): 1475-1478, 1481.
- [40] 陈永汉, 李国京, 肖博, 等. 64 排螺旋 CT 三维成像技术在颅底肿瘤外科中的应用[J]. 疑难病杂志, 2009, 8(12): 725-727.
- [41] 童鲜淇. 64 排螺旋 CT 头颈血管成像临床应用研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(11): 56-58.
- [42] Shirasaka, T., Nagao, M., Yamasaki, Y., *et al.* (2020) Low Radiation Dose and High Image Quality of 320-Row Coronary Computed Tomography Angiography Using a Small Dose of Contrast Medium and Refined Scan Timing Prediction. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **44**, 7-12. <https://doi.org/10.1097/RCT.0000000000000951>
- [43] 马光铄, 刘勇, 冯学泉, 等. 4D-CTA 在脑血管疾病诊断中的应用进展[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2020, 46(5): 300-303.
- [44] Kik, C.C., Slooff, W.M., Moayeri, N., *et al.* (2022) Diagnostic Accuracy of Computed Tomography Angiography (CTA) for Diagnosing Blunt Cerebrovascular Injury in Trauma Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Radiology*, **32**, 2727-2738. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08379-7>