

综述

脑转移瘤的影像学研究进展*

刘婷婷¹ 李欢¹ 丁珞洲²
王耐然¹ 郑义^{1,*}

1.承德医学院, 承德市中心医院放射医学
影像科(河北承德067000)

2.承德医学院, 承德市中心医院肿瘤外科
(河北承德067000)

【摘要】脑转移瘤是成人最常见的中枢神经系统肿瘤之一, 具有发展快、预后差的特点。随着放疗技术的不断发展和靶向治疗、免疫治疗等新型治疗方式的出现, 脑转移瘤患者生存率有了很大提高。影像学上病灶的检出和评估对治疗方案的选择及患者预后至关重要。因此, 现代医疗对影像学提出了更高的要求。常规影像学磁共振检查一直是诊断与评估脑转移瘤的金标准。随着影像技术的不断提高。MRI不只局限于从形态学评估脑转移瘤, 磁共振波谱成像、脑灌注成像、扩散张量成像等功能成像更是从生物水平评估脑转移瘤状况。不仅如此, 近年来涌现的放射组学与人工智能等新型技术更是有望将繁重的临床工作简单化, 实现对病灶的检出及评估的智能化, 大大提升工作效率及工作的准确率。本文从影像学对脑转移瘤的诊断和疗效评估进行综述。

【关键词】脑转移瘤; 磁共振成像; 人工智能; 影像组学;

【中图分类号】R-1; R816.1; R739.41

【文献标识码】A

【基金项目】2019年承德市科学技术研究与发展
计划(201903A010)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.02.053

Advances in Imaging Studies of Brain Metastases*

LIU Ting-ting¹, LI Huan¹, DING Luo-zhou², WANG Nai-ran¹, ZHENG Yi^{1,*}.

1.Department of Radiology and Medical Imaging, Chengde Central Hospital, Chengde Medical College, Chengde 067000, Hebei Province, China

2.Department of Oncology, Chengde Central Hospital, Chengde Medical College, Chengde 067000, Hebei Province, China

ABSTRACT

Brain metastases are one of the most common central nervous system tumors in adults and are characterized by rapid development and poor prognosis. With the continuous development of radiotherapy technology and the emergence of new treatment modalities such as targeted therapy and immunotherapy, the survival rate of patients with brain metastases has been greatly improved. The detection and evaluation of lesions on imaging are crucial to the selection of treatment options and patient prognosis. Therefore, modern medical care has placed higher demands on imaging. Routine imaging MRI has been the gold standard for the diagnosis and evaluation of brain metastases. With the continuous improvement of imaging technology, MRI is not only limited to morphological assessment of brain metastases, but also functional imaging such as magnetic resonance spectroscopy, brain perfusion imaging, and diffusion tensor imaging to assess brain metastases at the biological level. In addition, the emergence of new technologies such as radiomics and artificial intelligence in recent years is expected to simplify the heavy clinical work and realize intelligent detection and evaluation of lesions, which greatly improves the efficiency and accuracy of work. This article reviews the diagnosis and efficacy assessment of brain metastases from imaging.

Keywords: Brain metastases; Magnetic Resonance Imaging; Artificial Intelligence; Radiomics

1 概述

脑转移瘤是指人体其他任何部位原发肿瘤转移到颅脑的继发性肿瘤, 是最常见的中枢神经系统肿瘤。对于脑转移瘤的发病机制^[1-2], 大多数学者都认同“土壤种子学说”, 即原发肿瘤通过血管来传播种子, 然后“种子”结合整合素与脑血管内皮细胞特异性作用, 穿透血管到达“土壤”即脑实质, 最终完成转移。脑转移瘤的原发病灶最常见的是肺癌, 约占40%~50%, 其次是乳腺癌, 黑色素瘤等^[3]。脑转移瘤患者的临床症状主要是颅内高压表现, 如头痛、头晕等。脑转移瘤是恶性肿瘤终末期阶段, 患者预后和生活质量差。因此, 对小病灶的检出、对治疗后局部病灶的评估与患者预后的判断对临床的诊疗方案至关重要。正因如此, 现代医疗对影像学提出了更高的要求。

2 磁共振成像在脑转移瘤的应用

美国NCCN指南首次提出把影像学磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)作为脑肿瘤治疗前后评价的首选影像检查方法。2015年, 国际上第一个脑肿瘤标准影像检查专家共识(简称BTIP)发布^[4]。随后, 脑肿瘤的影像评估专家共识逐渐达成一致, 常规磁共振成像成为脑转移瘤诊断的金标准以及疗效评估的有效手段。虽然常规MRI对脑转移瘤的诊断有其他影像学检查不可取代的地位, 但其在治疗过程中对肿瘤的进展评估有一定的延时性。近年来随着磁共振设备不断发展, 磁共振成像技术不断完善, 出现了扩散加权成像、扩散张量成像、磁共振波谱成像、灌注加权成像等一系列功能成像。这些新兴的技术从分子病理、组织代谢的层面来对病灶进行分析。

2.1 常规磁共振成像 在临床工作中, 可以通过不同的成像方式以及序列来观察脑转移瘤, 常规磁共振成像采集的图像主要包括两种序列: (1)通过静脉注射钆造影剂后的T1加权采集图像, 突出出血脑屏障破坏的区域并以相对高的准确度描绘肿瘤; (2)T2加权液体衰减反转恢复(T₂WI-FLAIR)采集, 描绘出肿瘤周围的血管源性水肿区域^[5]。常规磁共振成像从肿瘤的形状、大小、周围水肿情况、强化程度等形态学的信息来诊断脑转移瘤及对其进行评估。脑转移瘤主要发生在脑实质, 瘤体在T₁WI呈现等或低信号, T₂WI上常显示高信号, 周围可见水肿带, 多有“小病灶大水肿”的特点, 增强扫描呈现明显强化, 瘤体若发生囊变坏死, 呈环形强化^[6]。目前认为提高脑转移瘤检出率的方法包括: (1)提高场强, 3特斯拉下磁共振检查比1.5特斯拉磁共振检查对直径小于5mm的脑转移瘤敏感性大大提高; (2)提高钆造影剂剂量, 钆造影剂的增加可明显提高脑转移瘤的检出率, 但可造成假阳性结果, 而且对病人的身体会造成负担, 易发生不良反应, 因此这种方法并没有广泛应用于临床^[6]; (3)延迟增强, 张顺镇^[7]等人发现, 采用T₁WI延迟增强比常规增强更利于检出微小转移瘤。根据RECIST评价标准, 常规磁共振成像是直接评估病情的金标准。但是由于瘤体为不规则的三维立体图形, 直径的测量存在一定的误差, 仅靠肿瘤直径增大的程度来判断肿瘤是否复发仍存在局限性。

2.2 磁共振功能成像

【第一作者】刘婷婷, 女, 在读硕士, 主要研究方向: 中枢神经影像诊断专业。E-mail: 1300991949@qq.com

【通讯作者】郑义, 男, 主任医师, 主要研究方向: 中枢神经影像诊断与临床应用。E-mail: 8260732@sina.com

2.2.1 扩散加权成像和表观弥散系数 扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)^[8]是一项基于磁共振通过检测水分子布朗运动反应组织间水分子弥散情况。肿瘤细胞分裂快,细胞数量增加,细胞空间增大,组织间自由水的流动减弱,DWI表现为高信号。表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)值主要反应组织间水分子弥散的快慢,其通过具体数值以量化的方式来反应水分子扩散的幅度。水分子扩散受限的原因很多,如细胞毒性水肿,脑脓肿,脑肿瘤等。由于发病机制不同,其弥散受限程度不同。因此,DWI通常用于脑转移瘤与颅内其他病变的鉴别诊断^[6,9]。此外,DWI和ADC对脑转移瘤放疗早期的评估具有很大的指导意义,在形态学没有变化时,则对早期微观结构做出反应。Rasheed Zakaria等人^[10]通过回顾性研究是否加入DWI和ADC图作为指标来指导临床对30名经过手术切除病人SRS放疗范围的规划,发现使用DWI和ADC实验组放疗覆盖范围会大于常规组,这可能是由于DWI和ADC值会对潜在生物和病理过程的进行全面评估,在形态学尚没有发生明显变化时提前扩大靶区,减小病灶局部复发率。不仅如此,ADC比值或对肿瘤的病理有一定提示作用。Sebastian Johannes Müller^[11]等人通过收集了129名肺癌脑转移瘤的患者,发现ADC比值在小细胞肺癌和非小细胞肺癌中存在统计学意义。DWI和ADC由于其突出的诊断价值和扫描时间短的优点,已经和常规核磁作为必须的序列应用于脑转移瘤的临床实践中。

2.2.2 扩散张量成像 扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)通过在多个方向上进行施加扩散梯度来显示组织微观结构和水扩散方向性。它最常使用两种定量参数来描述水分子的运动,即各向异性分数(fractional anisotropy, FA)和平均扩散率(mean diffusivity, MD),这两种度量分别代表水扩散的方向性和大小^[12]。DTI对脑转移瘤的检出率高于T₁WI和T₂WI,与T₁WI或T₂WI图像相比,它对肿瘤内出血具有较高的敏感性,可作为有对比增强MRI禁忌症患者的替代检查^[13]。由于DTI对脑白质纤维束的高敏感性,DTI或成为勾画肿瘤边缘的最佳工具^[14]。此外,DTI对高级别胶质母细胞瘤和脑转移瘤的鉴别有重要意义。有研究^[15]表明由于胶质母细胞瘤具有分泌功能、浸润生长的特点,FA值会高于脑转移瘤;而脑转移瘤的瘤周MD则大于胶质瘤^[14]。肿瘤周围水肿FA降低是肿瘤浸润的标志,当肿瘤复发时瘤周水肿周围正常白质的FA值明显低于非复发肿瘤,可提示临床有复发的可能性。

2.2.3 脑灌注成像 脑灌注成像由于作用原理不同而分三种,依次是动态磁敏感对比增强(dynamic susceptibility contrast, DSC)、动态对比增强(dynamic contrast-enhanced, DCE)、和动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL),在临床当中最常用的半定量参数分别为相对脑血容量(relative cerebral blood volume, rCBV)、体积转移常数(volume transfer constant, K^{trans})、和脑血流量(cerebral blood flow, CBF)。ASL具有较低的信噪比和空间分辨率,但其也有优于其他灌注成像脑灌注成像的特点:不需要外源性对比剂^[6]。脑灌注成像可以反映血脑屏障的完整性与破坏程度,在临床上根据脑灌注的量可有助于区分血供是否丰富,有助于脑转移瘤的诊断。有研究^[16]表明RT-K^{trans}SD截止值可作为生物标志物达到长期预测放疗局部控制情况。脑灌注成像或是区分肿瘤复发与假性进展的最有效工具^[17],与放射性坏死区域相比,外科术后复发转移瘤的rCBV更高,治疗后病变的CBF随时间减少。这也验证了肿瘤复发其周围微血管生成增加,放射性坏死血管减少这一原理。Hoefnagals等人^[17]的研究表明肿瘤复发的最佳rCBV截断值>2.0,敏感性为85%,特异性为71%。Mitsuya等人^[18]的研究表明最佳rCBV截断值>2.1,敏感性为100%,特异性为95.2%。确定最佳rCBV截断值是脑灌注成像未来需要克服的困难。

2.2.4 磁共振波谱成像 磁共振波谱成像(magnetic resonance spectroscopy, MRS)是一种通过化学位移作用从分子代谢水平反映病灶的新型功能磁共振成像技术。MRS测量组织内各种代谢物,而且可以对这些代谢物单独或按比例进行定量评估,无创的反映出肿瘤生长的微环境。MRS可作为早期治疗的生物标记物。Cheynov^[19]等对81例进行伽马刀治疗后的脑转移瘤患者进行了磁共振波谱分析。发现在治疗的24小时之内,病灶虽然在体积上无

明显变化,但Cho:Cr和NAA:Cr均减小。同时,MRS在区分放射性坏死与肿瘤复发方面有明显优势。Cho升高和NAA降低的区域细胞明显数量增加,因此表明该区域肿瘤的代谢活跃,很大可能肿瘤复发^[20]。放射治疗后肿瘤内部出血、顺磁性物质的沉积等病理变化常对MRS的影响较大,会影响诊断的准确性。

2.2.5 磁敏感加权成像 磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)是特定序列和处理设计的组合,旨在增强T2加权图像的对比度。最初该序列是为了研究静脉和脑微出血中的脱氧血红蛋白而开发的,其结合了高空间分辨率、理想的完全流动补偿和三维梯度回波序列以及相位掩膜,以突出顺磁性和/或反磁性物质^[21]。SWI对微出血、钙化、铁沉积等病理变化的高敏感性,可有助于黑色素瘤、乳腺癌等易出血脑转移瘤的诊断。同时,吴立业^[22]等人通过对77例肺癌脑转移瘤患者回顾性分析,发现SWI对肺鳞癌脑转移瘤的检出率与T₁WI增强序列无统计学差异,另外发现不同的病理分型(肺腺癌、肺鳞癌、小细胞肺癌)脑转移瘤的瘤内易感性信号(ITSS)形态具有统计学差异,SWI可鉴别脑转移瘤的原发肿瘤病理分型。对于脑转移瘤的治疗越来越倾向于优化剩余生命质量,而不仅仅是治疗脑转移瘤本身。由于放射治疗是治疗方法的关键组成部分,因此,监测放射治疗诱导损伤的早期体征如微出血,变得越来越重要^[23]。SWI可评估放疗引起的出血等病变的脑损伤,及时调节放疗剂量,防止出现严重的脑损伤。目前研究表明SWI对判断肿瘤复发和放射性坏死的价值有限^[24],尚不能成为监测脑转移瘤疗效评估的生物标志物。

2.2.6 正电子发射断层显像-核磁共振 正电子发射断层显像-核磁共振(positron emission tomography-magnetic resonance imaging, PET-MRI)是将MRI反映的解剖生理与PET反映的分子代谢两者结合的新型技术。PET-MRI对脑转移瘤的检出率,取决于肿瘤与大脑对示踪剂吸收比率(TBR)。以往的研究大多都支持TBR≥1.6是定义PET阳性结果的合适标准^[25]。基于这个标准,PET-MRI与MRI相比,并不能改善对脑转移瘤的监测^[26]。有学者发现由于氨基酸在血脑屏障的高通透性,使用特殊类型的氨基酸示踪剂¹⁸F-FACBC会比葡萄糖类似物示踪剂产生更高的TBR,或许可以检测到更小的脑转移瘤^[27]。对于治疗监测,PET-MRI特别是氨基酸PET已被证明可以在早期检测治疗反应^[28]。Kung-Chu^[25]等人通过对72例腺癌并发脑转移患者进行全身PET-CT联合头颅PET-MR随访评估,他们新定义了一种预后指标分子成像预后(MIP评分),最终,他们得出MIP评分是神经进展时间和总生存的显著预测因子(P<0.001)。此外,PET-MRI区分放射性坏死与肿瘤复发的特异性都远高于其任何一项独立技术,其最高诊断准确率为89%(特异性96%,灵敏度85%)^[29]。但是,由于这项技术扫描时间长,费用高,设备与医师素质要求高等原因,并没有广泛应用于临床。

2.2.7 酰胺质子转移磁共振成像 酰胺质子转移加权(Amide proton transfer-weighted, APTw)成像是一种基于化学交换饱和和转移的新型分子MRI技术,用于检测组织内源性低浓度移动蛋白和多肽的酰胺质子。该技术通过移动蛋白和多肽的酰胺质子与水的质子之间的交换应用于成像^[30]。APTw对脑转移瘤的价值相对局限,有助于与其他脑原发肿瘤鉴别。Kiyohisa等人^[31]分析使用对比剂后T₁WI和T₂WI的融合图像手动分割具有T2延长的增强区域和周围非增强区域,发现增强区域可鉴别脑转移瘤和脑胶质瘤,周围非增强区域不可鉴别。不仅如此,Kiyohisa等人^[32]也发现APTw是鉴别血管母细胞瘤与脑转移瘤的有效工具。总结来说,APTw对脑转移瘤的价值相对于其他功能序列是有限的。

3 未来与展望

3.1 影像组学 放射组学首次出现在Philippe 2012年的评论中,最初是作为计算机辅助诊断和检测(CAD)系统的扩展技术。放射组学是指从复杂的临床成像阵列中提炼大量的定量特征,然后将它们转化为高维数据,随后挖掘出与肿瘤组织学特征的相关性^[33]。影像组学对小的大脑转移瘤病灶(<1.5cm)的检出率可以达到93%,但是代价就是每名患者增加了7.8个转移的假阳性率^[34]。脑转移瘤的手动分割十分耗费临床医师的精力,影像组学则有望解决这一难题。无论是对脑转移瘤数量的鉴别能力,还是对转移瘤组织成分

的诊断, 基于深度学习的自动分割具有极大的意义。Knief等人^[35]回顾性分析189例脑转移瘤患者, 放射组学的定量特征对预测脑转移瘤的原发类型具有较高的准确性, 对黑色素瘤与非小细胞肺癌的敏感性甚至优于放射医师。放射组学是预测放射手术后反应的一种有前途的工具。一些简单的特征, 如坏死核心的存在、增强肿瘤组织的比例、或瘤周水肿的扩大, 以上特征已被证明会影响疗效或生存率^[36]。有研究证明其通过结合PET扫描获得的成像参数, 可以显著提高放射损伤与复发鉴别诊断准确率^[36]。

3.2 人工智能 人工智能是基于放射学图像为数据库, 通过机器学习与深度学习的方法, 从而构思出可推广的算法模型, 从而达到分析病灶图像特点、推测基因位点及预测治疗效果的先进的临床工具^[37]。2018年以后机器学习向深度学习的明显过渡, 深度学习方法受到越来越多的关注, 具有广阔前景^[38]。机器学习在早期显示出了巨大的前景, 但是其本身存在限制, 使其无法成为临床工作的常规部分, 限制机器学习常规使用的因素之一就是繁重的图像分割过程。Yoshitomo^[39]等人将黑血技术与深度卷积神经网络结合, 通过对血管的抑制, 提高了检测脑转移瘤的灵敏度, 尽管黑血技术非常有前途, 但是由于扫描时间的延长, 并没有应用于临床。Shiori^[40]等人开发的特征融合与单发探测器联合算法在不降低总体阳性预测值的前提下, 脑转移瘤的总体灵敏度为86%, 提高了小病变检测率。Christoph^[41]等人研究表明基于体积水平敏感性特异性的深度学习的方法, 对脑转移瘤检测的敏感性可以高达97.5%, 准确率高达98.7%。对于脑转移瘤治疗预后的预测, Noah等人建议在拥有适当的数据的情况下, 应该使用基于深度学习的预后指标来补充经典统计数据。但是, 目前并没有明确的研究结果可以证明深度学习可以准确预测脑转移瘤患者的预后^[42]。人工智能虽然有巨大前景, 对脑转移瘤的诊断未来的趋势也必定走向自动化。但是, 由于图像采集和放射组学分析工作流程的不标准化, 研究结果缺乏可重复性。如果想要人工智能普及到临床工作中, 这需要共享庞大的数据和广泛协作^[37]。

4 小 结

综上所述, MRI仍是目前诊断脑转移瘤和评估预后的最佳工具, 其多种功能成像方式都具有其独特的优势。但由于功能成像复杂多样, 寻求最佳序列组合来最好的服务临床是未来需要探索的阶段。对脑转移瘤的治疗, 影像学不仅致力于辅助临床医师, 而且在向减少人为因素误差、减轻人力资源浪费, 实现对病灶的检出及评估的智能化的方向发展, 致力于完成从辅助到主导的角色过渡。

参考文献

- [1] 洪艳哲, 毛映惠, 寇蓝文, 等. 脑转移瘤微环境响应与新治疗模式展望[J]. 中国细胞生物学学报, 2022, 44(4): 551-558.
- [2] KARINO T, OHIRA S, KANAYAMA N, et al. Determination of optimal virtual monochromatic energy level for target delineation of brain metastases in radiosurgery using dual-energy CT[J]. Br J Radiol, 2020, 93(1106): 20180850.
- [3] BOIRE A, BRASTIANOS P, GARZIA L, et al. Brain metastasis[J]. 2020, 20(1): 4-11.
- [4] 初曙光, 杨长蔚, 梁晓华, 等. 重视脑转移瘤标准化影像检查以提高影像评估准确性[J]. 中华转移性肿瘤杂志, 2021, (1): 10-14.
- [5] MEHRABIAN H, DETSKY J, SOLIMAN H, et al. Advanced magnetic resonance imaging techniques in management of brain metastases[J]. Front Oncol, 2019, 9: 440.
- [6] DERKS S, VAN DER VELDT A, SMITS M J T B J O R. Brain metastases: the role of clinical imaging[J]. Br J Radiol, 2022, 95(1130): 20210944.
- [7] 张顺镇, 许晓金, 杨永贵, 等. MRI常规增强与延迟增强诊断脑转移瘤敏感性的对比研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2011, 19(11): 850-853.
- [8] SAWLANI V, DAVIES N, PATEL M, et al. Evaluation of response to stereotactic radiosurgery in brain metastases using multiparametric magnetic resonance imaging and a review of the literature[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2019, 31(1): 41-49.
- [9] 陈荣, 李勇, 彭一横, 等. 磁共振扩散加权成像在星形细胞瘤及脑转移瘤鉴别诊断中的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(2): 11-13.
- [10] ZAKARIA R, POMSCHAR A, JENKINSON M D, et al. Use of diffusion-weighted MRI to modify radiosurgery planning in brain metastases may reduce local recurrence[J]. J Neurooncol, 2017, 131(3): 549-554.
- [11] MÜLLER S, KHADRAOUI E, NEEF N, et al. Differentiation of brain metastases from small and non-small lung cancers using apparent diffusion coefficient (ADC) maps[J]. BMC Med Imaging, 2021, 21(1): 70.
- [12] CONTI NIBALI M, ROSSI M, SCIORITINO T, et al. Preoperative surgical planning of glioma: limitations and reliability of fMRI and DTI tractography[J]. Journal of Neurosurgical Sciences, 2019, 63(2): 127-134.
- [13] Liheng M, Guofan X, Balzano RF, et al. The value of DTI: achieving high diagnostic performance for brain metastasis[J]. Radiol

- Med, 2021, 126(2): 291-298.
- [14] ternberg EJ, Lipton ML, Burns J. Utility of diffusion tensor imaging in evaluation of the peritumoral region in patients with primary and metastatic brain tumors[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2014, 35(3): 439-444.
- [15] HOLLY K S, FITZ-GERALD J S, BARKER B J, et al. Differentiation of high-grade glioma and intracranial metastasis using volumetric diffusion tensor imaging tractography[J]. World Neurosurgery, 2018, 120: e131-e141.
- [16] JIN T, ZHANG H, LIU X, et al. Enhancement degree of brain metastases: correlation analysis between enhanced T2 FLAIR and vascular permeability parameters of dynamic contrast-enhanced MRI[J]. Eur Radiol, 2021, 31(8): 5595-5604.
- [17] HOEFNAGELS F W A, LAGERWAARD F J, SANCHEZ E, et al. Radiological progression of cerebral metastases after radiosurgery: assessment of perfusion MRI for differentiating between necrosis and recurrence[J]. J Neurol, 2009, 256(6): 878-887.
- [18] MITSUYA K, NAKASU Y, HORIGUCHI S, et al. Perfusion weighted magnetic resonance imaging to distinguish the recurrence of metastatic brain tumors from radiation necrosis after stereotactic radiosurgery[J]. J Neurooncol, 2010, 99(1): 81-88.
- [19] CHERNOV M F, HAYASHI M, IZAWA M, et al. Dynamics of metabolic changes in intracranial metastases and distant normal-appearing brain tissue after stereotactic radiosurgery: a serial proton magnetic resonance spectroscopy study[J]. The Neuroradiology Journal, 2009, 22(1): 58-571.
- [20] CASTELLANO A, BAILO M, CICONI F, et al. Advanced imaging techniques for radiotherapy planning of gliomas[J]. Cancers, 2021, 13(5).
- [21] HALLER S, HAACK E M, THURNHER M M, et al. Susceptibility-weighted imaging: technical essentials and clinical neurologic applications[J]. Radiology, 2021, 299(1): 3-26.
- [22] 吴立业, 蒋锡丽, 黄子龙, 等. SWI在不同病理类型肺癌脑转移瘤诊断中的应用[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(4): 55-57.
- [23] KLOS J, VAN LAAR P J, SINNIGE P F, et al. Quantifying effects of radiotherapy-induced microvascular injury: review of established and emerging brain MRI techniques[J]. Radiotherapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology, 2019, 140: 41-53.
- [24] Schwarz D, Bendszus M, Breckwoldt MO. Clinical value of susceptibility weighted imaging of brain metastases[J]. Front Neurol, 2020, 11: 55.
- [25] HO K C, TOH C H, LI S H, et al. Prognostic impact of combining whole-body PET/CT and brain PET/MR in patients with lung adenocarcinoma and brain metastases[J]. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2019, 46(2): 467-477.
- [26] LEIVA-SALINAS C, MUTTIKKAL T J E, FLORS L, et al. FDG PET/MRI coregistration helps predict response to gamma knife radiosurgery in patients with brain metastases[J]. AJR American Journal of Roentgenology, 2019, 212(2): 425-430.
- [27] ØEN S K, JOHANNESSEN K, PEDERSEN L K, et al. Diagnostic value of ¹⁸F-FACBC PET/MRI in brain metastases[J]. Clinical Nuclear Medicine, 2022, 47(12): 1030-1039.
- [28] LANGEN K J, GALLDIKS N, HATTINGEN E, et al. Advances in neuro-oncology imaging[J]. Nature Reviews Neurology, 2017, 13(5): 279-289.
- [29] LOHMANN P, KOCHER M, CECCON G, et al. Combined FET PET/MRI radiomics differentiates radiation injury from recurrent brain metastasis[J]. NeuroImage Clinical, 2018, 20: 537-542.
- [30] YU H, LOU H, ZOU T, et al. Applying protein-based amide proton transfer MR imaging to distinguish solitary brain metastases from glioblastoma[J]. European Radiology, 2017, 27(11): 4516-4524.
- [31] KAMIMURA K, NAKAJO M, YONEYAMA T, et al. Histogram analysis of amide proton transfer-weighted imaging: comparison of glioblastoma and solitary brain metastasis in enhancing tumors and peritumoral regions[J]. European Radiology, 2019, 29(8): 4133-4140.
- [32] KAMIMURA K, NAKAJO M, GOHARA M, et al. Differentiation of hemangioblastoma from brain metastasis using MR amide proton transfer imaging[J]. Journal of Neuroimaging: Official Journal of the American Society of Neuroimaging, 2022, 32(5): 920-929.
- [33] YI Z, LONG L, ZENG Y, et al. Current advances and challenges in radiomics of brain tumors[J]. Frontiers in Oncology, 2021, 11: 732196.
- [34] CHARRON O, LALLEMENT A, JARNET D, et al. Automatic detection and segmentation of brain metastases on multimodal MR images with a deep convolutional neural network[J]. Computers in Biology and Medicine, 2018, 95: 43-54.
- [35] KNIEP H C, MADESTA F, SCHNEIDER T, et al. Radiomics of brain MRI: Utility in prediction of metastatic tumor type[J]. Radiology, 2019, 290(2): 479-487.
- [36] KOCHER M, RUGE M I, GALLDIKS N, et al. Applications of radiomics and machine learning for radiotherapy of malignant brain tumors[J]. Strahlentherapie und Onkologie: Organ der Deutschen Röntgengesellschaft, 2020, 196(10): 856-867.
- [37] RUDIE J D, RAUSCHKECKER A M, BRYAN R N, et al. Emerging applications of artificial intelligence in neuro-oncology[J]. Radiology, 2019, 290(3): 607-618.
- [38] CHO S J, SUNWOO L, BAIK S H, et al. Brain metastasis detection using machine learning: a systematic review and meta-analysis[J]. Neuro-oncology, 2021, 23(2): 214-225.
- [39] KIKUCHI Y, TOGAO O, KIKUCHI K, et al. A deep convolutional neural network-based automatic detection of brain metastases with and without blood vessel suppression[J]. European Radiology, 2022, 32(5): 2998-3005.
- [40] AMEMIYA S, TAKAO H, KATO S, et al. Feature-fusion improves MRI single-shot deep learning detection of small brain metastases[J]. Journal of Neuroimaging: Official Journal of the American Society of Neuroimaging, 2022, 32(1): 111-119.
- [41] HUANG Y, BERT C, SOMMER P, et al. Deep learning for brain metastasis detection and segmentation in longitudinal MRI data[J]. Medical Physics, 2022, 49(9): 5773-5786.
- [42] JIAN A, LIU S, DI IEVA A. Artificial intelligence for survival prediction in brain tumors on neuroimaging[J]. Neurosurgery, 2022, 91(1): 8-26.

(收稿日期: 2023-04-25)

(校对编辑: 韩敏求)