

CT与MRI图像融合技术在中耳胆脂瘤诊断中的应用及进展

曹亚亚, 杨启梅, 张 文*

陕西省人民医院耳鼻咽喉头颈外科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

中耳胆脂瘤是一种常见的耳部疾病, 其诊断和治疗常依赖于影像学检查。CT作为中耳胆脂瘤的首选检查方法在疾病的诊断中广泛应用, 其能详细显示胆脂瘤对周围骨结构的侵犯, 帮助评估胆脂瘤的大小、扩展情况和骨质破坏的程度, 但在显示软组织结构时对比度较差, 难以清晰识别胆脂瘤和周围软组织的关系。相比之下MRI尤其是DWI能够更好地区分胆脂瘤和其他类型的肿瘤或炎症病变, 例如区分中耳胆脂瘤与胆固醇肉芽肿、炎性肉芽肿及一些液体成分。但MRI对骨性结构的成像不如CT清晰, 尤其是当胆脂瘤侵犯到骨质时, MRI可能无法提供足够的解剖信息。近年来, MRI与CT融合成像技术将两种影像学方法的优势结合起来, 因其在提高胆脂瘤的检测率和定位准确性方面的潜力而受到关注。研究表明, CT与MRI融合成像技术能提供更全面的影像信息。结合了CT的骨结构成像和MRI的软组织成像, 该技术不仅能够准确显示胆脂瘤的侵犯范围和深度, 又有良好的软组织分辨率, 优于单纯CT或MRI检查, 显著提高了胆脂瘤的检测率, 有助于手术前的精准规划和决策, 在中耳胆脂瘤的诊断和治疗中具有重要临床价值。

关键词

中耳胆脂瘤, 计算机断层扫描, 磁共振成像, 图像融合技术

Application and Progress of CT and MRI Image Fusion Technology in the Diagnosis of Middle Ear Cholesteatoma

Yaya Cao, Qimei Yang, Wen Zhang*

Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 23rd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 曹亚亚, 杨启梅, 张文. CT与MRI图像融合技术在中耳胆脂瘤诊断中的应用及进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 1609-1619. DOI: 10.12677/acm.2025.1551534

Abstract

Middle ear cholesteatoma is a common ear disease, and its diagnosis and treatment often rely on imaging techniques. CT is widely used as the primary imaging method for diagnosing middle ear cholesteatoma, as it provides detailed information about the invasion of cholesteatoma into the surrounding bone structures, helping to assess the size, extent, and degree of bone destruction. However, CT has poor contrast when imaging soft tissues, making it difficult to clearly differentiate cholesteatoma from the surrounding soft tissue. In contrast, MRI, particularly Diffusion Weighted Imaging (DWI), is more effective in distinguishing cholesteatoma from other types of tumors or inflammatory lesions, such as differentiating it from cholesterol granulomas, inflammatory granulomas, and certain fluid-filled lesions. However, MRI is less clear than CT in visualizing bone structures, and when cholesteatoma invades bone, MRI may not provide sufficient anatomical details. Recently, the fusion of MRI and CT imaging has gained attention for its potential to combine the strengths of both techniques, improving the detection rate and localization accuracy of cholesteatomas. Research shows that CT-MRI fusion imaging provides more comprehensive imaging information. By combining CT's ability to image bone structures with MRI's superior soft tissue resolution, this technique not only accurately shows the extent and depth of cholesteatoma invasion but also offers better soft tissue resolution than either CT or MRI alone. This significantly enhances cholesteatoma detection rates, aids in precise pre-operative planning and decision-making, and has important clinical value in the diagnosis and treatment of middle ear cholesteatoma.

Keywords

Middle Ear Cholesteatoma, Computed Tomography, Magnetic Resonance Imaging, Image Fusion Technology

Copyright © 2025 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

中耳胆脂瘤是位于中耳内由角化的鳞状上皮细胞、上皮下的结缔组织以及角化碎片构成的囊性结构,常因耳道通气不良、慢性中耳感染等因素引发[1]。临床症状包括耳鸣、听力下降、耳痛以及耳道分泌物等,随着病情发展,胆脂瘤可能侵袭周围结构,导致严重并发症,如面神经麻痹和脑膜炎等。因此,早期准确的诊断和及时的治疗至关重要。影像学技术在中耳胆脂瘤的诊断和治疗中扮演着核心角色[2]。CT与MRI技术在骨性结构和软组织成像上各有优劣[3]。为了结合两种影像学的优势,多模态图像融合技术应运而生,为耳科医生提供更全面的影像学信息,在胆脂瘤检出率、定位准确性和手术规划方面展现出显著临床价值,多项研究证实其能有效提高检出率并帮助制定更精确的手术方案,降低手术风险[4]。综上所述,MRI与CT融合成像技术在中耳胆脂瘤的诊断与治疗中具有重要的临床意义。本文将综述该技术的应用现状及其在未来发展中的潜力。

2. CT与MRI的优势与局限

计算机断层扫描(CT)作为一种重要的影像学技术,在中耳胆脂瘤的诊断中被广泛应用[3][5]。CT技术具有极高的空间分辨率,能够清晰展示中耳及乳突的骨性结构。CT的分类方式有许多,按照技术原理

大体可分为轴向扫描 CT (Axial Scan CT)、螺旋扫描 CT (Helical/Spiral CT)、多层螺旋 CT (Multidetector Computed Tomography, MDCT)、锥形束 CT (Cone Beam CT, CBCT)、双能 CT (Dual-Energy Computed Tomography, DECT)等。常用的耳科 CT 如, 多层螺旋 CT (Multidetector Computed Tomography, MDCT)通过多平面重建(Multiplanar Reconstruction, MPR)和三维重建(Volume Rendering, VR)技术, 进一步提高了胆脂瘤范围和周围骨质结构的可视化精度[6]-[9]。双能 CT (Dual-Energy Computed Tomography, DECT)则通过能量分解技术, 可以部分区分软组织成分和钙化结构[10]。

尽管 CT 技术在骨质成像方面具有无可比拟的优势, 但其共同的局限性在于软组织分辨率较差, 无法清晰显示胆脂瘤的软组织成分及其与周围软组织的关系。胆脂瘤作为一种以软组织病变为主的病理状态, 尤其在早期或局部侵袭阶段, CT 对其软组织特性的显示能力有限, 这显著降低了其诊断的敏感性和特异性。此外, 当胆脂瘤与周围炎性组织、肉芽组织或其他软组织病变混杂时, CT 难以提供足够的鉴别信息。

磁共振成像(MRI)因其出色的软组织分辨能力, 成为中耳胆脂瘤诊断的重要补充手段[3] [11]。T1 加权成像(T1-Weighted Imaging, T1WI)、T2 加权成像(T2-Weighted Imaging, T2WI)能够精确显示胆脂瘤的软组织特性及其与周围组织的关系[12] [13]。尤其是弥散加权成像(DWI), 通过评估水分子扩散特性, 可以敏感地识别胆脂瘤的扩散受限特性, 从而有效区分胆脂瘤与肉芽组织、炎症等其他病变[14]-[17]。DWI 根据成像序列可以分为回波平面成像(Echo Planar Imaging, EPI)和非回波平面成像(Non-Echo Planar Imaging, non-EPI)两大类[18]-[20]。

EPI 以其快速成像的特点成为常用的 DWI 技术, 但易受伪影干扰, 尤其是在中耳和颅底区域。读出分段回波平面成像(Readout-Segmented Echo Planar Imaging, RS-EPI)是传统 EPI 序列的改进版, 通过优化采样策略, 减少伪影干扰, 提升了空间分辨率, 适合用于初步筛查[21]。

non-EPI DWI 包括快速自旋回波扩散加权成像(Turbo Spin Echo Diffusion-Weighted Imaging, TSE-DWI)、周期性旋转重叠平行线增强重建扩散加权成像(Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction Diffusion-Weighted Imaging, PROPELLER-DWI)和半傅里叶单次采集快速自旋回波扩散加权成像(Half-Fourier Acquisition Single-Shot Turbo Spin Echo Diffusion-Weighted Imaging, HASTE-DWI)等。TSE-DWI 在减少伪影和增强病灶辨识度方面表现出色[22] [23]; PROPELLER-DWI 通过旋转采样提高了信噪比并减少了运动伪影[24] [25], 而 HASTE-DWI 则在冠状面成像中具有优势, 适合检测小至 2 毫米的病变[26]。这些技术能够显著提升 DWI 在胆脂瘤诊断中的敏感性和特异性, 特别是在复杂解剖区域和小病灶检测中表现优异[27]。

MRI 不仅在胆脂瘤的定位和范围评估中具有优势, 还在复发性胆脂瘤的术后监测中表现优异。然而, MRI 的不足之处在于对骨性结构的成像能力相对较弱。由于 MRI 主要通过软组织对比实现成像, 其在评估骨质病变, 尤其是胆脂瘤侵袭骨质或听骨链时, 往往无法提供足够的解剖细节。这一缺陷使得 MRI 在胆脂瘤诊断中仍需要与 CT 联合使用, 以弥补单一成像模式的不足。

3. CT-MRI 图像融合技术的引入

CT-MRI 融合技术的起源可以追溯到 20 世纪 90 年代, 随着计算机技术和医学影像学技术的飞速发展, CT 和 MRI 的融合逐渐成为可能。在 1991 年, 神经外科专家 Lemoine D.等发表研究[28]首次提出了 CT-MRI 融合的概念。该研究强调了传统放射学技术的局限性, 并指出图像融合技术在精准定位及治疗中的关键作用。特别是在神经外科领域, 准确的解剖定位对于病理分析和制定治疗策略至关重要, 而单一的影像技术往往难以全面展现复杂的解剖结构。基于这一背景, CT-MRI 融合技术应运而生, 推动了多模态成像的临床应用。

在这一技术的发展基础上, CT-MRI 融合技术逐渐扩展到其他医学领域, 在耳鼻咽喉头颈外科的应用中也得到了显著的推广。为了充分发挥 CT 与 MRI 各自的优势, 并克服它们在胆脂瘤诊断中的局限性, CT-MRI 图像融合技术成为了一种有效的解决方案。这项技术利用影像后处理方法, 将 CT 影像中的骨性结构细节与 MRI 影像中的软组织信息进行精确配准和融合[29]。融合后的影像既保留了 CT 影像对骨质病变的敏感性, 又具备了 MRI 对软组织病变的特异性, 从而实现对中耳胆脂瘤及其周围解剖结构的全面可视化[30]。这项技术不仅能够更清晰地显示胆脂瘤的边界及其侵袭范围, 还能提供关于听骨链、鼓室壁、面神经等重要解剖结构的综合信息, 为外科手术规划提供了更加精准的影像支持[31]-[33]。

此外, CT-MRI 图像融合技术在术后复发性胆脂瘤的监测中同样具有重要意义。通过综合评估骨质修复情况和软组织残留或复发病灶, 该技术显著提高了诊断的敏感性和特异性, 减少了不必要的二次手术风险[34] [35]。以下将介绍几种具有代表性的 CT-MRI 融合技术在中耳胆脂瘤诊疗中的应用。

3.1. Non-EPI DWI 与 CT 融合技术在中耳胆脂瘤中的应用

CT 与 non-EPI DWI MRI 的影像融合技术通过结合 CT 的骨性结构显示与 MRI 在软组织分辨率上的优势, 提供了更精确的胆脂瘤定位和分期[36]。该技术能够有效识别胆脂瘤及其与周围骨结构的关系, 提高了术前诊断的准确性, 并为手术路径选择提供了重要支持[32], 减少了不必要的探查手术和术后复发的风险。随着技术的发展和自动化进程的推进, 这一方法在临床中的应用潜力巨大。以下重点讨论包括 TSE-DWI、PROPELLER-DWI 在内的 non-EPI DWI 与 CT 的融合技术在胆脂瘤诊断与治疗中的应用。

3.1.1. PROPELLER-DWI 与 HRCT 的影像融合技术

PROPELLER DWI 是一种非回波平面(non-EPI) DWI 技术, 在中耳胆脂瘤的诊断中具有重要作用。PROPELLER DWI 通过多方向重复采集和重建方式, 采用周期性旋转重叠平行线的方式获取 k 空间数据, 并过采样中心 k 空间以提高信噪比, 显著减少运动伪影和易感性伪影[37]。与传统的 non-EPI DWI 相比, PROPELLER DWI 具有显著优势, 尤其在软组织对比度、分辨率、运动伪影控制, 提高检测小至 2 mm 病变的敏感性方面表现突出[18]。

该技术在轴位成像时, 使用较高的成像矩阵, 能够提供较高的分辨率和信噪比, 从而清晰展示胆脂瘤病灶的边界及其扩散受限特性。PROPELLER DWI 在单次采集中可以测量两个不同的 b 值, 便于计算表观扩散系数(Apparent Diffusion Coefficient, ADC)值, 无需额外的检查时间[24] [38]。特别在 1.5T 系统下, 使用 256×256 矩阵和专用头部线圈时, PROPELLER DWI 在中耳胆脂瘤的诊断中显示出高敏感性和特异性, 在 Más-Estellés F 等[18]的一项研究中敏感性和特异性分别为 92.8% 和 92.3%。此外, PROPELLER DWI 的扫描时间相对较短, 相较于其他 non-EPI 序列, 提升了临床应用的可行性, 尤其适用于对患者运动不耐受的情况。因此, PROPELLER DWI 成为中耳胆脂瘤诊断中具有高效性和临床实用性的成像技术。

将 PROPELLER 序列与 CT 融合技术结合, 进一步增强了胆脂瘤的诊断性能。Locketz 等[39]研究显示, CT 与 PROPELLER DW-MRI 的融合技术在胆脂瘤诊断中的敏感性达到 88%, 高于单独使用 DW-MRI 的 75%。融合影像的阳性预测值和阴性预测值分别为 88% 和 75%, 均优于单独的 DW-MRI。在区分颞骨六个解剖区域时, CT-MRI 融合图像的定位准确性为 90%, 而单独的 DW-MRI 为 83%。在乳突/窦道和前中鼓室等部位, 融合影像的定位准确性分别为 92% 和 100%, 进一步证明了 CT 与 PROPELLER 融合技术在胆脂瘤诊断中的重要性。

该融合影像技术在胆脂瘤的术前规划和复杂病例诊断中具有显著优势。通过精准评估病变的大小、位置及与周围结构的关系, 医生能够制定更为精准的手术方案, 尤其对于复发性或复杂胆脂瘤手术具有重要意义。对于经历多次手术的患者, 融合 CT 与 non-EPI DWI 影像技术能有效区分术后疤痕组织与复发性胆脂瘤, 避免不必要的手术探查, 并能提供清晰的病灶定位, 尤其是在迷路区域的复发胆脂瘤中[35]。

此外, 该技术对个性化手术方案的制定和术前诊断精确度的提升也具有积极作用。

然而, 尽管融合影像技术在临床应用中展现了较大潜力, 仍存在一些局限性。首先, 融合影像技术需要高性能的 MRI 设备和专门的软件支持, 这导致其成本较高, 并且对设备的要求较为苛刻。其次, 尽管 PROPELLER 序列在检测较小病灶时有所改进, 但只能在轴向面进行。此外, 根据 Kasbekar 等人[38]在 1.5T 系统上使用低分辨率成像矩阵 128×128 进行 PROPELLER DWI 时, 结果并不令人满意, 这可能会降低对较小病变的检测灵敏度。最后, 由于关于 PROPELLER DWI 的研究样本量较小且大多为回顾性设计, 其结果的普适性仍需进一步验证, 未来自动化影像融合技术的出现可能会提高该技术的临床应用效率, 扩展其在实际操作中的应用范围。

CT 与 PROPELLER DW-MRI 的融合技术结合了 CT 在骨性解剖上的高分辨率和 DW-MRI 在软组织检测上的高敏感性, 显著提高了中耳胆脂瘤的诊断和定位准确性。这项创新的影像学方法不仅增强了术前评估的精度, 还为胆脂瘤的手术规划和治疗提供了强有力的支持, 尤其在复杂病例和复发病例的管理中表现突出[24][40][41]。随着技术的发展和优化, 未来该技术有望成为胆脂瘤诊断和治疗中的重要工具, 对患者的治疗方案产生深远影响。

3.1.2. TSE-DWI 与 RS-EPI 的比较及与 HRCT 的影像融合技术

TSE-DWI 是另一种 non-EPI DWI 序列, 相较于其他 EPI DWI 方法(如 RS-EPI), 在病灶清晰度和图像失真控制方面具有明显优势, 尤其是在减少颅底伪影和图像失真方面表现更佳[42]。尽管 RS-EPI 在图像分辨率上较高, 但由于受颅骨与空气界面的磁场不均匀性影响, 容易产生误诊性亮点区域[43][44]。而 TSE-DWI 通过更有效的伪影减少和更强的病灶辨识度, 在胆脂瘤检测的敏感性和特异性上表现优于 RS-EPI。例如, 在 Wiesmueller M 等[23]的研究中, 两位影像学阅片医生使用 TSE-DWI 对疾病诊断的敏感性分别为 88% 和 92%, 而 RS-EPI 的敏感性分别为 68% 和 76%。因此, 尽管 RS-EPI 在图像清晰度上有优势, TSE-DWI 由于其在病灶辨识度和伪影控制上的优越性, 通常建议作为胆脂瘤的首选诊断方法, 也常用于与 HRCT 的图像融合中。

通过与 HRCT 影像技术的融合, TSE-DWI 实现了软组织和骨结构的互补显示, 从而提高了术前定位和评估的精准度。在 Fan X 等[45]的研究中表明, TSE-DWI 与 HRCT 的影像融合在胆脂瘤的诊断性能上优于单独使用 HRCT。具体而言, 融合影像的灵敏度高达 96.0%, 特异性为 88.9%, 其受试者工作特征曲线下的面积(Area Under the Curve, AUC)显著高于单独使用 HRCT (0.924 vs 0.767, $P = 0.0005$)。这一结果表明, 影像融合技术在胆脂瘤的早期检测和识别方面具有更高的准确性。此外, 融合影像在胆脂瘤定位方面的准确性也显著提高, 特别是在 STAM 系统中, A、T、M 区域的定位准确率均超过 90%, 与术中实际位置高度一致(κ 值分别为 0.934、0.789 和 0.808)。这使得医生能够更精确地评估胆脂瘤的范围, 进而为手术方案的选择提供了重要依据, 特别是在胆脂瘤侵及乳突区域时, 影像融合帮助医生决定是否采用内镜手术或显微镜手术等不同路径, 从而优化手术操作, 提高手术的成功率和安全性。

3.2. 高分辨率三维扩散加权 MRI (HR3D-DWI)与多层螺旋 CT (MDCT)的融合

除了 non-EPI DWI 与 HRCT 的影像融合外, 还有其他创新的图像融合方法, 如将高分辨率三维扩散加权(High-resolution three-dimensional diffusion-weighted, HR3D-DWI) MRI 与多层螺旋 CT (MDCT)影像数据融合, 广泛应用于胆脂瘤的术前定位和规划[46]。HR3D-DWI 相比传统 DWI 在图像质量方面具有显著优势。首先, HR3D-DWI 提供了更高分辨率的三维等体素数据, 细节更加清晰。例如, 传统 DWI 的体素尺寸通常较大, 而 HR3D-DWI 可以实现更小的体素尺寸, 显著提高了图像的细节分辨率[47]-[50]。其次, HR3D-DWI 采用的双源双回波快速场回波序列(Turbo Field Echo with Dual Source Dual Echo, TFE-DSDE)序列通过多个 180° 脉冲重聚, 减少了磁化率伪影的影响, 图像变形较小[51]。相比之下, 传统 DWI 如单

次激发回波平面成像(Single-Shot Echo Planar Imaging, SS-EPI)容易受到磁敏感伪影的干扰, 导致图像失真, 尤其是在磁化率敏感区域[23]。

此外, HR3D-DWI 具有更高的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)和对比噪声比(Contrast-to-Noise Ratio, CNR)[52], 使得图像更加清晰, 信号更强, 噪声更少, 有助于更准确地识别和评估病变。在图像融合方面, HR3D-DWI 的高分辨率三维等体素数据能够与高分辨率 CT 图像进行有效融合, 提供更全面的解剖信息, 帮助精准的手术规划和治疗决策[46]。而传统 DWI 在分辨率和图像质量上的限制, 可能会导致与 CT 图像融合时出现匹配不准确或信息丢失的问题。

多层螺旋 CT(MDCT), 包括 256 排 CT、320 排 CT 等, 近年来在中耳胆脂瘤的影像学评估中得到了广泛应用。MDCT 通过多排探测器在较短时间内获取更多图像数据, 提供更高的空间分辨率和更精细的解剖细节, 因此在中耳胆脂瘤的诊断与术前评估中具有重要作用。例如, 在评估听骨链(如锤骨、砧骨、镫骨)破坏程度时, MDCT 能够清晰显示骨质细微变化, 为外科医生提供准确的术前数据[6] [7]。此外, MDCT 能够在较短时间内完成扫描, 极大减少患者在检查过程中的不适感, 特别是对于配合困难的患者(如儿童或昏迷患者), 它还能够实现全景覆盖, 快速而精确地评估整个中耳及乳突区域, 为胆脂瘤的诊断提供全面的信息[8]。在后处理技术方面, MDCT 支持多平面重建(MPR)和三维重建(VR), 能够从多个角度直观观察病灶的形态及其与周围结构的关系[9]。冠状位和矢状位的重建有助于清晰显示鼓室盾板的破坏情况, 为胆脂瘤的诊断提供细致的影像支持, 同时为外科手术方案的制定提供依据[53]。有研究表明, MDCT 在中耳胆脂瘤诊断中具有较高的敏感性和特异性, 尤其在评估胆脂瘤相关的骨质破坏时, 256 排 CT 的敏感性可达到 100%, 并在多个研究中表现出 94%以上的高诊断符合率[54] [55]。

以上这些优异的性能使 MDCT 与 HR3D-DWI 成为中耳胆脂瘤诊断中不可或缺的重要工具, 也使之成为与图像融合中重要的组合之一。通过这种融合方法, 可以在保持图像分辨率的同时, 精准评估胆脂瘤的位置和范围。融合过程采用自动刚性配准与手动微调相结合的技术, 确保影像配准的准确性和精细度。此外, 融合影像的生成不仅依赖于影像数据本身, 还要求较高的技术水平来确保精确的图像对齐。

该融合影像技术在术前胆脂瘤定位和评估中展现了显著的优势。Yamashita 等人[46]的一项研究显示, 融合图像在确定胆脂瘤的范围和位置方面的准确性达到了 87.5%, 显著高于单独使用 CT 影像的 29.2%。此外, 融合影像表现出较高的观察者一致性(κ 值为 0.881), 表明该方法具有良好的重复性和可靠性, 为临床多个观察者提供一致的诊断结果。尤其在胆脂瘤定位的关键解剖区域(如鼓室、乳突、迷路等部位), 融合图像展现了更高的一致性。融合影像还为外科医生提供了清晰的解剖结构信息, 有助于选择合适的手术路径(如内镜或显微手术), 特别对复杂病例的手术规划具有重要意义。因此, 该技术在胆脂瘤手术前的影像学评估中具有显著的临床价值。

3.3. 彩色映射扩散加权 MRI (CMDWI)与 CT 的融合

彩色映射扩散加权成像(Color-Mapped Diffusion-Weighted Images, CMDWI)是由日本山形大学医学部的 Tomoo Watanabe 等人[56]于 2015 年提出的一种结合了多种先进影像技术的诊断工具, 主要用于术前评估胆脂瘤的解剖位置。这种技术通过将 1 mm 薄层非回波平面扩散加权成像(non-EPI)与磁共振脑池造影(Magnetic Resonance Cisternography, MRC)相结合, 并应用彩色映射处理, 生成原始的彩色映射融合图像(Color Mapped Fusion Images, CMFI), 再从原始 CMFI 中剥离 MRC 数据后创建而来。这种技术能够将复杂的扩散信息以视觉上更易于理解的方式呈现出来, 增强图像的对比度, 使得病变区域与正常组织之间的差异更加明显, 便于医生快速识别和分析病变区域。与 CT 影像数据融合后, CMDWI-CT 影像在胆脂瘤定位中表现出较高的诊断准确性。其研究表明[57], 该影像融合方法在中耳的鼓室、上鼓室、乳突等区域的阳性预测值和阴性预测值超过 90%, 某些区域甚至达到 100%的准确性。这一高准确性有助于精确

判断病变位置,减少术中误差。此外,CMDWI-CT影像在手术路径选择上也提供了精准支持。例如,对于浅层胆脂瘤,推荐优先选择经耳内镜手术(Transcanal Endoscopic Ear Surgery, TEES),而对于较深层胆脂瘤,融合影像有助于判断是否需要显微镜辅助手术(Microscope-Assisted Surgery, MES),从而减少手术风险并选择最适合的手术方案。此技术在术前规划中提供了更为精确的信息,有助于减少术中路径调整,缩短手术时间,减轻患者创伤,尤其在复杂病例评估中表现尤为重要,具有广泛的临床应用前景。

3.4. T2 加权成像(T2WI)与 DWI MRI 的融合

图像融合技术除了 CT 与 MRI 的组合,还包含 MRI 与 MRI 的组合。例如 T2WI 与 DWI 的图像融合,该融合图像在胆脂瘤定位和术前评估中展现出较高的准确性和成像质量[14]。Fan X 等人[13]的一项研究通过三维重建工作站对 HRCT、DWI 和 T2WI 与 DWI 进行图像融合,并采用 5 分 Likert 评分标准对图像质量进行主观评价。结果显示,T2WI-DWI 融合图像在胆脂瘤定位准确性上与 CT-DWI 融合图像相当,但在乳突区域的敏感性略高,能更好地显示胆脂瘤与解剖标志的关系。此外,T2WI-DWI 融合图像的整体成像质量稍高于 CT-DWI,尤其在显示胆脂瘤解剖细节方面表现更加清晰。

相比 CT-DWI,T2WI-DWI 融合图像不依赖 CT 扫描,从而避免了放射线暴露的风险,适用于更广泛的人群,特别是对于不适合进行 CT 扫描的患者。因此,这项技术在减少放射暴露、提高安全性方面具有明显优势。尤其是在不能接受辐射的患者中,T2WI-DWI 融合图像表现出较强的适应性和安全性。

尽管 T2WI-DWI 融合图像具有较高的应用价值,但也存在一定的局限性。例如 T2WI-DWI 融合图像的效果较很大程度上依赖于成像设备的质量和图像处理技术的精度,因此在设备和技术水平较低的情况下,可能无法达到最佳效果。

总体而言,T2WI-DWI 融合图像在胆脂瘤术前评估中具有较高的应用价值,尤其在提高定位准确性和减少辐射暴露方面表现出明显优势。然而,图像融合的技术复杂性和局限性仍需进一步改进和验证,以便在更广泛的临床实践中推广应用。

3.5. 术前 CT 与术后 DWI 的融合

图像融合技术甚至可以跨时间维度,对不同时间阶段的图像进行融合,有研究提出将术前高分辨率 CT (HRCT)与术后非回波平面扩散加权 MRI (Non-EPI DWI)进行影像融合,以准确定位残余胆脂瘤[58]。该技术结合术前和术后影像数据,避免了额外的 CT 扫描,从而显著减少了患者,特别是儿童和年轻患者,暴露于辐射的风险[59][60],尤其适用于需要长期随访的群体。同时,术前 HRCT 与术后 DWI 的结合有效提高了残余胆脂瘤的定位准确性。例如,Alzahrani M 等[58]的研究中 10 例术后 CT 显示中耳不透亮的患者,DWI 与影像融合技术成功识别了 3 例残余胆脂瘤,并通过二次手术验证了这些病例的准确性。此技术为胆脂瘤术后复查提供了可靠的影像支持,为二次手术决策提供了重要依据,帮助临床医生做出更精确的判断,并减少不必要的手术。

3.6. CT-MRI 图像融合技术的局限性

CT 和 MRI 图像融合技术在医学影像领域具有重要意义,但也存在一些局限性。首先,图像融合精度是衡量 MRI 与 CT 技术融合效果的重要指标[61]。由于 CT 和 MRI 成像原理不同,导致在分辨率、对比度等方面存在差异,使得精确配准变得困难,容易出现配准误差,进而影响融合图像的质量[62]。图像信息丢失也是需要面对的一个重要问题,传统融合方法可能无法充分提取图像中的重要特征,导致融合后的图像丢失了一些关键信息,如边缘、纹理等,影响了诊断的准确性[63]。图像配准技术往往有着较高的计算复杂度,尤其是一些先进的融合算法,其计算量大需要大量计算资源和时间,难以满足实时诊断

和治疗的需求[64]。另外,噪声和伪影的存在也会影响融合图像的质量,CT和MRI图像中的噪声和伪影在融合过程中可能会相互叠加或放大,导致图像失真或错误的诊断信息[63]。最后,临床适用性也是一个不可忽视的问题,不同临床场景对图像融合的需求和要求不同,目前的融合技术很难同时满足这些不同的需求,且图像融合后的诊断效果在一定程度上依赖于医生的经验和专业知识,不同的医生对融合图像的解读可能存在差异,影响诊断的准确性和一致性。

4. 结论

CT与MRI影像融合技术在中耳胆脂瘤的术前定位和手术规划中展现出显著优势。通过结合CT对骨结构的高分辨率和MRI对软组织的高对比度,这一技术能够提供更加精确的诊断信息,特别是在复杂病例中表现出色。具体而言,HRCT与non-EPI DWI的融合技术(如PROPELLER-DWI和TSE-DWI)能够精确定位胆脂瘤及其与周围解剖结构的关系,在复杂病例和复发性胆脂瘤的检测中展现了较高的敏感性和准确性。其中,PROPELLER-DWI通过减少运动伪影并提升软组织对比度,优化了乳突和迷路等关键部位的成像效果;而TSE-DWI进一步提高了软组织分辨率,为术前评估和手术规划提供了重要支持。此外,HR3D-DWI与MDCT的融合技术将三维扩散加权影像的高分辨率与多排探测CT的骨结构显示能力相结合,为复杂病例的评估和术前定位提供了更清晰的解剖信息,有助于精确规划手术路径并降低术中风险。CMDWI与CT的融合技术同样表现出高水平的诊断准确性。这种技术能够将复杂的扩散信息以视觉上更易于理解的方式呈现出来,增强图像的对比度,使得病变区域与正常组织之间的差异更加明显,便于医生快速识别和分析病变区域,为手术路径选择提供了可靠依据。T2WI与DWI的融合技术在减少辐射暴露方面具有显著优势,通过避免CT扫描,有效降低了患者的辐射风险,特别适用于儿童或对辐射敏感的患者群体。此外,术前CT与术后DWI的融合技术更进一步,不仅整合了术前和术后影像数据,避免了额外CT扫描,从而显著减少了患者,尤其是儿童和年轻患者的辐射暴露,还在长期随访中展现出独特优势。尽管这些技术在临床应用中具有广泛潜力,但仍面临一些挑战,如高设备要求、操作复杂性和对微小病灶的检测灵敏度有限。随着自动化影像融合技术的发展,这些技术将进一步提高胆脂瘤诊断的准确性和操作效率,为未来的标准化诊疗方案奠定基础。

基金项目

陕西省人民医院科技人才支持计划资助项目(领军人才),项目批号:2021LJ-05。

参考文献

- [1] Rutkowska, J., Ozgirgin, N. and Olszewska, E. (2017) Cholesteatoma Definition and Classification: A Literature Review. *The Journal of International Advanced Otolaryngology*, **13**, 266-271. <https://doi.org/10.5152/iao.2017.3411>
- [2] 王佳豪, 刘云福, 马晓博, 等. 影像学在中耳胆脂瘤诊疗中的应用现状及进展[J]. 影像科学与光化学, 2024, 42(5): 521-528.
- [3] 蒋吉美, 张皓, 罗禹, 等. 中耳胆脂瘤的影像诊断: 高分辨率计算机断层成像与磁共振成像的比较研究[J]. 现代生物医学进展, 2015, 15(9): 1700-1704.
- [4] Sun, W., Fan, J. and Huang, T. (2022) The Efficacy of DW and T1-W MRI Combined with CT in the Preoperative Evaluation of Cholesteatoma. *Journal of Personalized Medicine*, **12**, Article No. 1349. <https://doi.org/10.3390/jpm12081349>
- [5] 姚丽萍. 基于CT影像学的胆脂瘤诊断及误诊鉴别[J]. 中国现代药物应用, 2022, 16(5): 242-245.
- [6] Debeaupre, M., Hermann, R., Pialat, J., Martinon, A., Truy, E. and Ltaief Boudrigua, A. (2018) Cone Beam versus Multi-Detector Computed Tomography for Detecting Hearing Loss. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **276**, 315-321. <https://doi.org/10.1007/s00405-018-5214-y>
- [7] Yamashita, K., Yoshiura, T., Hiwatashi, A., Tuvshinjargal, D., Kamano, H., Shiratsuchi, H., et al. (2011) Contributing

- Factors in the Pathogenesis of Acquired Cholesteatoma: Size Analysis Based on MDCT. *American Journal of Roentgenology*, **196**, 1172-1175. <https://doi.org/10.2214/ajr.10.5414>
- [8] Tanrivermis Sayit, A., Saglam, D., Gunbey, H.P., Tastan, M. and Celenk, C. (2017) MDCT of the Temporal Bone and Audiological Findings of Pediatric Acquired Cholesteatoma. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **274**, 3959-3964. <https://doi.org/10.1007/s00405-017-4721-6>
 - [9] Liu, Y., Sun, J., Guo, Y., Lu, Q., Zhao, D. and Lin, Y. (2014) Quality Assessment of 3D-CTVR, MPR and Section Plane Techniques in Ossicular Chain Reconstruction in Middle Ear Cholesteatoma. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, **38**, 696-701. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2014.06.019>
 - [10] 霍明月, 陈英敏, 贾秀川, 等. 双能 CT 在中耳及外耳道胆脂瘤诊断和精准定位中的应用价值[J]. 放射学实践, 2023, 38(5): 559-564.
 - [11] 欧劲. 磁共振平扫联合弥散加权成像对中耳胆脂瘤的诊断价值[J]. 中国当代医药, 2022, 29(26): 130-133.
 - [12] Venail, F., Bonafe, A., Poirrier, V., Mondain, M. and Uziel, A. (2008) Comparison of Echo-Planar Diffusion-Weighted Imaging and Delayed Postcontrast T1-Weighted MR Imaging for the Detection of Residual Cholesteatoma. *American Journal of Neuroradiology*, **29**, 1363-1368. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a1100>
 - [13] Fan, X., Ding, C. and Liu, Z. (2022) Comparison of the Utility of High-Resolution CT-DWI and T2WI-DWI Fusion Images for the Localization of Cholesteatoma. *American Journal of Neuroradiology*, **43**, 1029-1035. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a7538>
 - [14] Benson, J.C., Carlson, M.L., Yin, L. and Lane, J.I. (2020) Cholesteatoma Localization Using Fused Diffusion-Weighted Images and Thin-Slice T2 Weighted Images. *The Laryngoscope*, **131**, E1662-E1667. <https://doi.org/10.1002/lary.29222>
 - [15] Dubrulle, F., Souillard, R., Chechin, D., Vaneecloo, F.M., Desautly, A. and Vincent, C. (2006) Diffusion-Weighted MR Imaging Sequence in the Detection of Postoperative Recurrent Cholesteatoma. *Radiology*, **238**, 604-610. <https://doi.org/10.1148/radiol.2381041649>
 - [16] Aikele, P., Kittner, T., Offergeld, C., Kaftan, H., Hüttenbrink, K. and Laniado, M. (2003) Diffusion-Weighted MR Imaging of Cholesteatoma in Pediatric and Adult Patients Who Have Undergone Middle Ear Surgery. *American Journal of Roentgenology*, **181**, 261-265. <https://doi.org/10.2214/ajr.181.1.1810261>
 - [17] Vercruysse, J., De Foer, B., Pouillon, M., Somers, T., Casselman, J. and Offeciers, E. (2006) The Value of Diffusion-Weighted MR Imaging in the Diagnosis of Primary Acquired and Residual Cholesteatoma: A Surgical Verified Study of 100 Patients. *European Radiology*, **16**, 1461-1467. <https://doi.org/10.1007/s00330-006-0160-2>
 - [18] Más-Estellés, F., Mateos-Fernández, M., Carrascosa-Bisquert, B., Facal de Castro, F., Puchades-Román, I. and Morera-Pérez, C. (2012) Contemporary Non-Echo-Planar Diffusion-Weighted Imaging of Middle Ear Cholesteatomas. *Radiographics*, **32**, 1197-1213. <https://doi.org/10.1148/rg.324115109>
 - [19] Lingam, R.K., Nash, R., Majithia, A., Kalan, A. and Singh, A. (2016) Non-Echoplanar Diffusion Weighted Imaging in the Detection of Post-Operative Middle Ear Cholesteatoma: Navigating Beyond the Pitfalls to Find the Pearl. *Insights into Imaging*, **7**, 669-678. <https://doi.org/10.1007/s13244-016-0516-3>
 - [20] Lingam, R.K. and Bassett, P. (2017) A Meta-Analysis on the Diagnostic Performance of Non-Echoplanar Diffusion-Weighted Imaging in Detecting Middle Ear Cholesteatoma: 10 Years on. *Otology & Neurotology*, **38**, 521-528. <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000001353>
 - [21] Bozer, A., Adibelli, Z.H., Yener, Y. and Dalgıç, A. (2024) Diagnostic Performance of Multishot Echo-Planar Imaging (RESOLVE) and Non-Echo-Planar Imaging (HASTE) Diffusion-Weighted Imaging in Cholesteatoma with an Emphasis on Signal Intensity Ratio Measurement. *Diagnostic and Interventional Radiology*, **30**, 370-377. <https://doi.org/10.4274/dir.2024.242767>
 - [22] De Foer, B., Vercruysse, J.P., Pilet, B., *et al.* (2006) Single-Shot, Turbo Spin-Echo, Diffusion-Weighted Imaging versus Spin-Echo-Planar, Diffusion-Weighted Imaging in the Detection of Acquired Middle Ear Cholesteatoma. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, **27**, 1480-1482.
 - [23] Wiesmueller, M., Wuest, W., May, M.S., Ellmann, S., Heiss, R., Saake, M., *et al.* (2021) Comparison of Readout-Segmented Echo-Planar Imaging and Single-Shot TSE DWI for Cholesteatoma Diagnostics. *American Journal of Neuroradiology*, **42**, 1305-1312. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a7112>
 - [24] Lehmann, P., Saliou, G., Brochart, C., Page, C., Deschepper, B., Vallée, J.N., *et al.* (2008) 3T MR Imaging of Postoperative Recurrent Middle Ear Cholesteatomas: Value of Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction Diffusion-Weighted MR Imaging. *American Journal of Neuroradiology*, **30**, 423-427. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a1352>
 - [25] De Foer, B. (2011) Non Echo Planar, Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging (Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction Sequence) Compared with Echo Planar Imaging for the Detection of Middle-Ear Cholesteatoma. *The Journal of Laryngology & Otology*, **125**, 877-878. <https://doi.org/10.1017/s0022215111001022>

- [26] Pizzini, F.B., Barbieri, F., Beltramello, A., Alessandrini, F. and Fiorino, F. (2010) HASTE Diffusion-Weighted 3-Tesla Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis of Primary and Relapsing Cholesteatoma. *Otology & Neurotology*, **31**, 596-602. <https://doi.org/10.1097/mao.0b013e3181dbb7c2>
- [27] Romano, A., Covelli, E., Confaloni, V., Rossi-Espagnet, M.C., Butera, G., Barbara, M., *et al.* (2019) Role of Non-Echo-Planar Diffusion-Weighted Images in the Identification of Recurrent Cholesteatoma of the Temporal Bone. *La Radiologia Medica*, **125**, 75-79. <https://doi.org/10.1007/s11547-019-01085-x>
- [28] Lemoine, D., Barillot, C., Gibaud, B., *et al.* (1991) An Anatomical-Based 3D Registration System of Multimodality and Atlas Data in Neurosurgery. In: Colchester, A.C.F. and Hawkes, D.J., Eds., *Information Processing in Medical Imaging*, Springer, 154-164.
- [29] Hall, A., St Leger, D., Singh, A. and Lingam, R.K. (2020) The Utility of Computed Tomography and Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging Fusion in Cholesteatoma: Illustration with a UK Case Series. *The Journal of Laryngology & Otology*, **134**, 178-183. <https://doi.org/10.1017/s0022215119002640>
- [30] Campos, A., Mata, F., Reboll, R., Peris, M.L. and Basterra, J. (2016) Computed Tomography and Magnetic Resonance Fusion Imaging in Cholesteatoma Preoperative Assessment. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **274**, 1405-1411. <https://doi.org/10.1007/s00405-016-4415-5>
- [31] Maccarrone, F., Cantaffà, C., Genovese, M., Tassi, S. and Negri, M. (2023) Fusion Computed Tomography-Magnetic Resonance Imaging Scans for Pre-Operative Staging of Congenital Middle-Ear Cholesteatoma. *The Journal of Laryngology & Otology*, **138**, 507-511. <https://doi.org/10.1017/s0022215123002001>
- [32] Cao, M., Xu, T., Jiang, W., Chen, C., Yang, H., Man, R., *et al.* (2024) Selection of a Surgical Approach for Middle Ear Cholesteatoma Based on the Fusion Images of Non-Echo Planar Diffusion-Weighted MRI and CT. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, **133**, 598-604. <https://doi.org/10.1177/00034894241241189>
- [33] Covelli, E., Margani, V., Romano, A., Volpini, L., Elfarargy, H.H., Bozzao, A., *et al.* (2023) The Impact of Fusion Imaging Technique on Middle Ear Cholesteatoma Surgery: A Prospective Comparative Study. *Acta Oto-Laryngologica*, **143**, 223-230. <https://doi.org/10.1080/00016489.2023.2172209>
- [34] Russo, C., Di Lullo, A.M., Cantone, E., Klain, M., Motta, G., Elefante, A., *et al.* (2021) Combining Thin-Section Coronal and Axial Diffusion Weighted Imaging: Good Practice in Middle Ear Cholesteatoma Neuroimaging. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article ID: 606692. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.606692>
- [35] Kusak, A., Rosiak, O., Durko, M., Grzelak, P. and Pietruszewska, W. (2018) Diagnostic Imaging in Chronic Otitis Media: Does CT and MRI Fusion Aid Therapeutic Decision Making? A Pilot Study. *Otolaryngologia Polska*, **73**, 7-12. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5423>
- [36] Galal, A., ElNaggar, M., Omran, A., Eid, M. and Badr-El-Dine, M. (2022) Fusion of Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging and High-Resolution Computed Tomography Scan as a Preoperative Tool for Classification of Middle Ear Cholesteatoma. *The Journal of International Advanced Otology*, **18**, 507-512. <https://doi.org/10.5152/iao.2022.21619>
- [37] Forbes, K.P., Pipe, J.G., Karis, J.P. and Heiserman, J.E. (2002) Improved Image Quality and Detection of Acute Cerebral Infarction with PROPELLER Diffusion-Weighted MR Imaging. *Radiology*, **225**, 551-555. <https://doi.org/10.1148/radiol.2252011479>
- [38] Kasbekar, A.V., Scoffings, D.J., Kenway, B., Cross, J., Donnelly, N., Lloyd, S.W.K., *et al.* (2010) Non Echo Planar, Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging (Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction Sequence) Compared with Echo Planar Imaging for the Detection of Middle-Ear Cholesteatoma. *The Journal of Laryngology & Otology*, **125**, 376-380. <https://doi.org/10.1017/s0022215110002197>
- [39] Locketz, G.D., Li, P.M.M.C., Fischbein, N.J., Holdsworth, S.J. and Blevins, N.H. (2016) Fusion of Computed Tomography and PROPELLER Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging for the Detection and Localization of Middle Ear Cholesteatoma. *JAMA Otolaryngology—Head & Neck Surgery*, **142**, 947-953. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2016.1663>
- [40] De Foer, B., Vercruysse, J., Bernaerts, A., Deckers, F., Pouillon, M., Somers, T., *et al.* (2008) Detection of Postoperative Residual Cholesteatoma with Non-Echo-Planar Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging. *Otology & Neurotology*, **29**, 513-517. <https://doi.org/10.1097/mao.0b013e31816c7c3b>
- [41] Khemani, S., Singh, A., Lingam, R.K. and Kalan, A. (2011) Imaging of Postoperative Middle Ear Cholesteatoma. *Clinical Radiology*, **66**, 760-767. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2010.12.019>
- [42] De Foer, B., Vercruysse, J., Bernaerts, A., Maes, J., Deckers, F., Michiels, J., *et al.* (2007) The Value of Single-Shot Turbo Spin-Echo Diffusion-Weighted MR Imaging in the Detection of Middle Ear Cholesteatoma. *Neuroradiology*, **49**, 841-848. <https://doi.org/10.1007/s00234-007-0268-3>
- [43] Porter, D.A. and Heidemann, R.M. (2009) High Resolution Diffusion-Weighted Imaging Using Readout-Segmented Echo-Planar Imaging, Parallel Imaging and a Two-Dimensional Navigator-Based Reacquisition. *Magnetic Resonance in*

- Medicine*, **62**, 468-475. <https://doi.org/10.1002/mrm.22024>
- [44] Wiggins, G.C., Polimeni, J.R., Potthast, A., Schmitt, M., Alagappan, V. and Wald, L.L. (2009) 96-Channel Receive-Only Head Coil for 3 Tesla: Design Optimization and Evaluation. *Magnetic Resonance in Medicine*, **62**, 754-762. <https://doi.org/10.1002/mrm.22028>
 - [45] Fan, X., Ding, C. and Liu, Z. (2022) Localization Evaluation of Primary Middle Ear Cholesteatoma with Fusion of Turbo Spin-Echo Diffusion-Weighted Imaging and High-Resolution Computed Tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **47**, 144-150. <https://doi.org/10.1097/rct.0000000000001389>
 - [46] Yamashita, K., Hiwatashi, A., Togao, O., Kikuchi, K., Matsumoto, N., Obara, M., *et al.* (2014) High-Resolution Three-Dimensional Diffusion-Weighted MRI/CT Image Data Fusion for Cholesteatoma Surgical Planning: A Feasibility Study. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **272**, 3821-3824. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-3467-7>
 - [47] Jeong, E., Kim, S. and Parker, D.L. (2003) High-Resolution Diffusion-Weighted 3D MRI, Using Diffusion-Weighted Driven-Equilibrium (DW-DE) and Multishot Segmented 3D-SSFP without Navigator Echoes. *Magnetic Resonance in Medicine*, **50**, 821-829. <https://doi.org/10.1002/mrm.10593>
 - [48] Hikishima, K., Yagi, K., Numano, T., Homma, K., Nitta, N., Nakatani, T., *et al.* (2008) Volumetric Q-Space Imaging by 3D Diffusion-Weighted MRI. *Magnetic Resonance Imaging*, **26**, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2007.09.001>
 - [49] Wang, J., Yarnykh, V.L. and Yuan, C. (2010) Enhanced Image Quality in Black-Blood MRI Using the Improved Motion-sensitized Driven-Equilibrium (IMSDE) Sequence. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **31**, 1256-1263. <https://doi.org/10.1002/jmri.22149>
 - [50] Thomas, D.L., Pell, G.S., Lythgoe, M.F., Gadian, D.G. and Ordidge, R.J. (1998) A Quantitative Method for Fast Diffusion Imaging Using Magnetization-Prepared Turboflash. *Magnetic Resonance in Medicine*, **39**, 950-960. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910390613>
 - [51] Obara, M., Takahara, T., Honda, M., *et al.* (2011) Diffusion Weighted MR Nerve Sheath Imaging (DW-NSI) Using Diffusion-Sensitized Driven-Equilibrium (DSDE).
 - [52] Engström, M., Mårtensson, M., Avventi, E. and Skare, S. (2014) On the Signal-to-Noise Ratio Efficiency and Slab-banding Artifacts in Three-Dimensional Multislab Diffusion-Weighted Echo-Planar Imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, **73**, 718-725. <https://doi.org/10.1002/mrm.25182>
 - [53] 相丽. 64 排 128 层螺旋 CT 图像重建技术对胆脂瘤型中耳炎的术前评估价值[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽医科大学, 2011.
 - [54] 刘大鹏, 许佳, 孙军. 256 排 CT 扫描鼓室盾板在胆脂瘤型中耳炎诊断中的价值[J]. 中国卫生标准管理, 2024, 15(7): 114-117.
 - [55] 周津如, 李培培, 范真真. 320 排 CT 容积扫描对中耳胆脂瘤听骨链破坏的诊断应用[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2023, 29(1): 9-13.
 - [56] Watanabe, T., Ito, T., Furukawa, T., Futai, K., Kubota, T., Kanoto, M., *et al.* (2015) The Efficacy of Color Mapped Fusion Images in the Diagnosis and Treatment of Cholesteatoma Using Transcanal Endoscopic Ear Surgery. *Otology & Neurotology*, **36**, 763-768. <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000000675>
 - [57] Watanabe, T., Ito, T., Furukawa, T., Futai, K., Kubota, T., Kanoto, M., *et al.* (2015) The Efficacy of Color-Mapped Diffusion-Weighted Images Combined with CT in the Diagnosis and Treatment of Cholesteatoma Using Transcanal Endoscopic Ear Surgery. *Otology & Neurotology*, **36**, 1663-1668. <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000000878>
 - [58] Alzahrani, M., Alhazmi, R., Bélair, M. and Saliba, I. (2016) Postoperative Diffusion Weighted MRI and Preoperative CT Scan Fusion for Residual Cholesteatoma Localization. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, **90**, 259-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2016.09.034>
 - [59] Hall, E.J. and Brenner, D.J. (2008) Cancer Risks from Diagnostic Radiology. *The British Journal of Radiology*, **81**, 362-378. <https://doi.org/10.1259/bjr/01948454>
 - [60] Hall, E.J. and Brenner, D.J. (2012) Cancer Risks from Diagnostic Radiology: The Impact of New Epidemiological Data. *The British Journal of Radiology*, **85**, e1316-e1317. <https://doi.org/10.1259/bjr/13739950>
 - [61] 赵琦, 钱永红, 王琨, 等. CT、MRI 图像融合技术在头部肿瘤放疗中的应用[J]. 中国医师杂志, 2014(z2): 163-164.
 - [62] 李青, 李润睿, 强彦, 等. 人工智能在医学 CT 图像重建中的研究进展[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(1): 1-16.
 - [63] Luo, F., Wu, D., Pino, L.R. and Ding, W. (2025) A Novel Multimodal Medical Image Fusion Framework with Edge Enhancement and Cross-Scale Transformer. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 11657. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93616-y>
 - [64] Bhutto, J.A., Tian, L., Du, Q., Sun, Z., Yu, L. and Tahir, M.F. (2022) CT and MRI Medical Image Fusion Using Noise-Removal and Contrast Enhancement Scheme with Convolutional Neural Network. *Entropy*, **24**, Article No. 393. <https://doi.org/10.3390/e24030393>