

多模态影像学方法在白血病骨髓浸润疾病诊断中的应用进展

刘家彤, 王楚昊, 崔志新*

承德医学院附属医院放射科, 河北 承德

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月13日

摘要

本文旨在对X线、双能CT (Dual-Energy Computed Tomography, DECT)、核磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)及核医学技术(如PET/CT)在白血病骨髓浸润诊断中的应用进行综述。随着医学影像技术的不断发展, 多模态影像诊断在白血病诊断和评估中发挥着日益重要的作用。X线作为传统的影像检查方法, 在白血病的初步筛查发挥着重要作用。双能CT则凭借优越的物质分解技术显著增进了对微小骨髓浸润病灶的检测水平。MRI依靠其出色的软组织分辨率和多参数成像的优势, 能够清楚呈现骨髓浸润的范围以及程度。核医学技术(以PET/CT为代表)通过检测细胞代谢活性, 实现对白血病骨髓浸润的早期无创定位, 同时还可以动态地监测疾病进展以及治疗反应。多种影像学方法联合应用形成的多模态评估体系为白血病的精准分期及个体化治疗方案制定提供了重要依据。

关键词

X线, 双能CT, 核磁共振成像, 核医学, 白血病, 骨髓浸润, 影像诊断

Application Progress of Multimodal Imaging Methods in the Diagnosis of Leukemia with Bone Marrow Infiltration

Jiatong Liu, Chuhao Wang, Zhixin Cui*

Department of Radiology, Affiliated Hospital of Chengde Medical University, Chengde Hebei

Received: December 9, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 13, 2026

Abstract

This article aims to review the application of X-ray, dual-energy computed tomography (DECT),

*通讯作者。

文章引用: 刘家彤, 王楚昊, 崔志新. 多模态影像学方法在白血病骨髓浸润疾病诊断中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 1136-1141. DOI: 10.12677/acm.2026.161147

magnetic resonance imaging (MRI), and nuclear medicine techniques (such as PET/CT) in the diagnosis of bone marrow infiltration in leukemia. With the continuous development of medical imaging technology, multimodal imaging diagnosis plays an increasingly important role in the diagnosis and evaluation of leukemia. X-ray, as a traditional imaging examination method, plays a significant role in the initial screening of leukemia. Dual-energy CT, with its superior material decomposition technology, significantly enhances the detection level of small bone marrow infiltration lesions. MRI, relying on its excellent soft tissue resolution and multi-parameter imaging advantages, can clearly present the range and degree of bone marrow infiltration. Nuclear medicine techniques (represented by PET/CT) can achieve early non-invasive localization of bone marrow infiltration in leukemia by detecting cellular metabolic activity, and can also dynamically monitor disease progression and treatment response. The multimodal assessment system formed by the combined application of multiple imaging methods provides an important basis for the precise staging of leukemia and the formulation of individualized treatment plans.

Keywords

X-Ray, Dual-Energy CT, Magnetic Resonance Imaging, Nuclear Medicine, Leukemia, Bone Marrow Infiltration, Imaging Diagnosis

Copyright © 2026 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

白血病是属于造血干细胞范畴的一类恶性克隆性疾病，其异常的增殖、分化受阻以及凋亡受限，使得恶性细胞在骨髓中大量浸润，同时还会抑制正常的造血功能(WHO 2022) [1]；按照细胞的来源和临床进程，主要将其分为急性白血病(AML、ALL)和慢性白血病(CML、CLL) (ICC 2022) [2]。精准诊断并评估骨髓浸润程度，对白血病分期、治疗方案的制定以及预后判断意义非凡。尽管骨髓活检现阶段仍被视为白血病诊断的金标准，然而在临床应用方面，它面临着穿刺创伤、取样偏差以及无法实时动态评估等核心短板[3]。近年来，随着医学影像技术的快速发展，X线、双能CT、MRI和核医学等无创性影像检查方法在白血病诊断中得到了广泛应用。这些技术各具优势，可以把解剖结构与功能代谢信息整合起来，为临床提供全新的非侵入评估途径。展望未来，影像组学、人工智能以及分子影像技术的协同创新，将进一步挖掘多模态评估体系在白血病诊疗中的临床转化可能，为提升诊断的准确性以及优化治疗路径提供更加精准的服务。

2. X线在白血病骨髓浸润诊断中的应用

X线检查作为最传统的影像学方法，在白血病骨髓浸润的诊断中仍具有重要价值。李霞团队[4]的研究指出，虽然儿童急性白血病(AL)的骨骼改变缺乏特异性表现，但某些特征性影像学表现(如普遍性骨质疏松、干骺端透亮带、灶性骨质破坏及层状骨膜反应)对白血病的诊断仍具有重要提示意义。因此，对于疑似白血病的患儿，应行X线骨骼检查以辅助诊断。Ito等[5]凭借前瞻性研究强调了X线在急诊环境下的应用价值，此项研究指出，主诉为骨痛的患儿，X线诊断白血病，其敏感性与特异性分别达到90.0%和99.8%，部分病例的X线所表现出的改变(如干骺端弥散性透亮带)比外周血细胞计数异常要早，可给病程未显露的急性白血病提供关键的早期诊断线索。总而言之，X线检查凭借操作容易、价格低廉、影像获取速度快等优势，在白血病的诊断中仍是十分重要的初步筛查途径，对动态监测病情的进展以及指导分

层治疗具有临床参考意义。

3. DECT 在白血病骨髓浸润诊断中的应用

作为一种先进影像技术, DECT 基于物质在不同 X 射线能量下衰减特性的差异, 同时采集高能与低能谱数据, 利用光电效应和康普顿散射的物理机制来实现精准的物质分解[6]。利用双能物质分离算法对高/低能谱数据进行分析, DECT 可以实现物质按原子序数的分离, 其核心机制为双能比(DeRatio)技术, 能够区分开钙(如羟基磷灰石, HA)和碘的高原子序数物质, 进而生成虚拟非钙(VNCa)图像记录, 显著降低钙化组织的伪影干扰, 凸显骨髓内水分和脂质代谢方面的病理变化[7]。该技术不光可以实现骨髓 CT 值的量化, 还可以借助羟基磷灰石(HAP)-水分解技术精准测量骨的密度, 为骨质疏松筛查给出了一种高效且可靠的方式($r=0.947$, 与定量 CT 具有高度的一致性)[8]。此外, DECT 的 VNCa 图像还可以清晰呈现骨髓浸润或水肿区域, 为不能接受 MRI 检查的患者提供了可靠的替代办法[9]。采用人工智能(AI)深度学习模型, VNCa 图像还能实现颈椎至骶椎整个脊柱层面的自动体积量化分析, 为临床供给了高重复性的定量数据, 有效提高了诊断的准确性与效率[10]。

DECT 在血液疾病骨髓浸润的相关评估中也呈现出独特价值, 在多发性骨髓瘤(MM)的患者中, 研究显示[11] VNCa 技术可检测出溶骨性及非溶骨性骨髓浸润并定量评估, 不同浸润类型的骨髓 CT 值存在明显的差别, 这有助于区分疾病的不同阶段与类型。Kosmala 等人开展的多中心研究进一步肯定, 双能 CT 虚拟去钙化技术在检测 MM 患者脊柱及盆腔骨髓浸润方面有出色诊断效能: 敏感性呈现为 93.3%、特异性呈现为 92.4%, 准确性($AUC = 0.978$) [12]。王红的研究运用 DECT 对急性白血病患者和健康对照组开展椎体 VNCa 成像, 研究结果证实该技术能准确识别弥漫性骨髓浸润, 其诊断结果的准确率为 94.7%, 这说明 VNCa 成像对于评价白血病弥漫性骨髓浸润病变是可行的[13]。

DECT 借助其物质分解与定量分析的双重优势, 在骨髓病变检测中展现出广阔的临床应用前景。该技术借助多维度影像学信息整合, 正在多个临床领域逐步替换、补充传统影像学方法, 未来随着技术的进一步提高和临床经验的逐渐积累, 其在骨髓病变诊疗时的应用价值还将不断提升。

4. MRI 在白血病骨髓浸润诊断的作用

MRI 在白血病诊断中发挥无创检测骨髓浸润的关键意义, 特别是在疾病早期检测以及动态监测阶段具有显著临床意义。采用多序列扫描技术(包括 T1 加权成像[T1WI]、T2 加权成像[T2WI]、短时反转恢复序列[STIR]及扩散加权成像[DWI]), MRI 能以非侵入的形式提供详细的三维骨髓微结构信息[14]。在急性白血病患者的 T1WI 图像上, 骨髓信号普遍降低且低于正常骨髓信号, 而在 T2WI 图像上则呈现出不同程度的高信号, 这些特征可协助区分正常骨髓和病变骨髓[15]。尤其是 STIR 序列凭借其去除脂肪信号的能力, 在检测弥漫性骨髓浸润方面具备独特优势[16]。同时 DWI 及其衍生出来的表观扩散系数(ADC), 为实现骨髓内水分子扩散的量化提供了客观参数, 这在衡量骨髓浸润程度方面十分关键[17]。

MRI 通过多种成像技术, 能够无创、灵敏地检测急性白血病所致的骨髓浸润, 并在整体水平上为疾病的诊断、疗效评估及复发监测提供重要的影像学依据[18]。尽管 MRI 对白血病诊断的效能十分显著, 但其特异性在相对水平上较低, 无法区分某些类型的骨髓病灶。因此需要结合其他诊断方法, 如骨髓活检、血清生化检查等, 才能全面准确地对病情进行评估[19]。随着技术的进步, 尤其是全身 MRI 的开展, 使得一次性大范围模型评估成为可能, 这不仅极大提高了诊断效率, 而且还增强了患者的舒适度[20]。

MRI 凭借其存在的无创、高分辨率优势, 在白血病骨髓浸润的诊断及随访中展现出极大潜力, 但仍需与其他诊断办法互补运用, 以实现最佳的诊疗成效。未来的研究应把重点放在开发新型 MRI 序列和人工智能辅助分析技术上, 进而完善特异性参数并优化诊断程序, 最终推动临床诊疗水平向精准化迈进。

5. PET 在白血病骨髓浸润诊断的作用

核医学对白血病的诊断同样起着关键作用,其中 ^{18}F -FDG PET/CT 凭借它卓越的代谢成像能力,在对白血病髓内及髓外病变的评估上表现格外突出。 ^{18}F -FDG PET/CT 可以借助显示骨髓里的异常代谢活动,辅助诊断白血病,尤其在急性白血病(AL)和慢性白血病(CL)时表现出不同的代谢特性。急性白血病往往表现为高代谢活性,而慢性白血病往往表现为低摄取状态,然而当发生 Richter 转化时,摄取会明显增多[21]。PET/CT 在检测髓外复发方面灵敏度与准确性高,据杜立华团队[22]的研究显示, ^{18}F -FDG PET/CT 诊断急性白血病髓外复发时,灵敏度达到 91.18%,特异度为 91.67%,可以清晰显示 AL 髓外复发病灶的分布范围及 FDG 摄取程度,对 AL 髓外复发有较高的诊断价值。这不仅适用于成人,在儿童白血病的范畴内,PET/CT 同样体现出明显的长处,魏丽晶等人[23]的研究显示,PET/CT 凭借分析骨髓 SUVmax 值,能可靠地对儿童急性淋巴细胞白血病(ALL)髓内复发做出诊断,其诊断效能的 AUC 数值为 0.822,为临床治疗方案的制定提供了关键参考。

但 ^{18}F -FDG PET/CT 同样存在一些局限性。骨髓高摄取不是白血病特有,也可以在感染或药物治疗后出现[24]。其次,不同白血病亚型的代谢特征存在重合,从而影响诊断特异性[25]。尽管如此,PET/CT 在白血病早期诊断与分期里的价值依旧不容小觑。Basu 等[26]宣称,和传统骨扫描相比较,PET/CT 能直接反映肿瘤细胞的代谢活性,大幅提升了早期诊断率。PET/CT 还可用来评估骨髓浸润的区域范围,指导活检定位[27],对临床诊疗起到重要的辅助作用。

^{18}F -FDG PET/CT 对白血病的诊断、分期、治疗监测及复发评估意义重大,但应用时要结合临床及其他检查结果来提升准确性,后续研究应更进一步探索新型示踪剂与定量分析技术的应用潜力。

6. 结论

总之,X 线、DECT、MRI 及 PET/CT 在白血病骨髓浸润的诊断与评估里各有自身优势,为临床医疗提供了重要的辅助诊断手段。采用这些影像技术联合应用的方式,可让优势实现互补,为白血病的精准诊断和个性化治疗提供更全面的资料。

随着影像技术的稳步发展,白血病骨髓浸润的诊断正迈向更精准、更全面的阶段。新型 PET 示踪剂的应用是其中的重要方向。例如, ^{68}Ga -PentixaFor 作为一种靶向 CXCR4 受体的示踪剂,在血液系统恶性肿瘤的诊断中展现出显著优势。研究表明,与传统的 FDG PET/CT 相比, ^{68}Ga -PentixaFor PET/CT 在检测血液系统恶性肿瘤(尤其是多发性骨髓瘤和惰性淋巴瘤)时具有更高的总体检出率(相对风险 $\text{RR} = 1.19$)和更高的最大标准摄取值(SUVmax)。其优势源于 CXCR4 受体在恶性浆细胞和 B 细胞中的高表达,而在正常造血组织中表达较低,从而形成了高对比度的图像,有利于检测骨髓浸润[28]。

人工智能技术同样为影像分析带来革新。通过深度学习算法对影像组学特征进行提取和分析,从而辅助医生识别肉眼难以察觉的微小病变,量化肿瘤异质性,并预测治疗反应。例如,边文瑾等人通过对 IDEAL-IQ 序列的质子密度脂肪分数(PDFF)图提取 1050 个影像组学特征,构建了预测骨髓脂肪细胞(BMAds)表型的逻辑回归模型。该模型在训练集和验证集的受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)分别高达 0.901 和 0.887,其生成的影像组学评分(RS)对治疗反应和总生存期(OS)的预测效能显著优于传统 PDFF 参数,为初发 AML 患者风险分层及个性化方案制定提供影像学依据[29]。

尽管前景广阔,但如何优化多模态影像技术的应用策略、降低检查成本、减少辐射暴露,仍是未来需要深入研究的课题。多模态影像技术的综合运用,必将为白血病患者的精准诊疗带来新的契机。

参考文献

- [1] Khoury, J.D., Solary, E., Abla, O., *et al.* (2022) The 5th Edition of the World Health Organization Classification of

- Haematolymphoid Tumours: Myeloid and Histiocytic/Dendritic Neoplasms. *Leukemia*, **36**, 1703-1719.
- [2] Arber, D.A., Orazi, A., Hasserjian, R.P., *et al.* (2022) International Consensus Classification of Myeloid Neoplasms and Acute Leukemias: Integrating Morphologic, Clinical, and Genomic Data. *Blood*, **140**, 1200-1228.
- [3] Jamy, O., Bourne, G., Mudd, T.W., Thigpen, H. and Bhatia, R. (2025) Revisiting the Role of Day 14 Bone Marrow Biopsy in Acute Myeloid Leukemia. *Cancers*, **17**, Article No. 900. <https://doi.org/10.3390/cancers17050900>
- [4] 李霞. 儿童急性白血病骨骼改变 121 例 X 线分析[J]. 白血病.淋巴瘤, 2004(6): 365-366.
- [5] Ito, A., Osumi, T., Fujimori, K., Tomizawa, D., Kato, M., Tsuji, S., *et al.* (2022) Utility of Emergent Plain X-Ray for Childhood Acute Leukemia with Bone Pain. *Pediatrics International*, **64**, e14843. <https://doi.org/10.1111/ped.14843>
- [6] Greffier, J., Villani, N., Defez, D., Dabli, D. and Si-Mohamed, S. (2023) Spectral CT Imaging: Technical Principles of Dual-Energy CT and Multi-Energy Photon-Counting CT. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **104**, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2022.11.003>
- [7] D'Angelo, T., Albrecht, M.H., Caudo, D., Mazziotti, S., Vogl, T.J., Wichmann, J.L., *et al.* (2021) Virtual Non-Calcium Dual-Energy CT: Clinical Applications. *European Radiology Experimental*, **5**, Article No. 38. <https://doi.org/10.1186/s41747-021-00228-y>
- [8] Tong, X., Fang, X., Wang, S., Fan, Y., Wei, W., Xiao, Q., *et al.* (2024) Opportunistic Screening for Osteoporosis Using Enhanced Images Based on Dual-Energy Computed Tomography Material Decomposition: A Comparison with Quantitative Computed Tomography. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 352-364. <https://doi.org/10.21037/qims-23-855>
- [9] Foti, G., Serra, G., Iacono, V., Marocco, S., Bertoli, G., Gori, S., *et al.* (2021) Identification of Non-Traumatic Bone Marrow Oedema: The Pearls and Pitfalls of Dual-Energy CT (DECT). *Tomography*, **7**, 387-396. <https://doi.org/10.3390/tomography7030034>
- [10] Fervers, P., Fervers, F., Weisthoff, M., Rinneburger, M., Zopfs, D., Reimer, R.P., *et al.* (2022) Dual-Energy CT, Virtual Non-Calcium Bone Marrow Imaging of the Spine: An AI-Assisted, Volumetric Evaluation of a Reference Cohort with 500 CT Scans. *Diagnostics*, **12**, Article 671. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12030671>
- [11] 沈婧, 陶海波, 李鹏, 等. 双能 CT 虚拟去钙及 mDixon-Quant 技术在多发性骨髓瘤中的研究进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(10): 1075-1079.
- [12] Kosmala, A., Weng, A.M., Heidemeier, A., Krauss, B., Knop, S., Bley, T.A., *et al.* (2018) Multiple Myeloma and Dual-Energy CT: Diagnostic Accuracy of Virtual Noncalcium Technique for Detection of Bone Marrow Infiltration of the Spine and Pelvis. *Radiology*, **286**, 205-213. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017170281>
- [13] 王红. 定量探讨双源双能量 CT 在正常椎体骨髓成像及白血病疗效评估中的价值研究[D]:[硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [14] 林志谦, 陈克敏, 管永靖. 成人急性白血病的骨髓 MRI 表现与定量分析研究[J]. 诊断学理论与实践, 2009, 8(1): 43-49.
- [15] Takagi, S. and Tanaka, O. (1996) The Role of Magnetic Resonance Imaging in the Diagnosis and Monitoring of Myelodysplastic Syndromes or Leukemia. *Leukemia & Lymphoma*, **23**, 443-450. <https://doi.org/10.3109/10428199609054852>
- [16] Filograna, L., Magarelli, N., Cellini, F., *et al.* (2018) Diffusion Weighted Imaging (DWI) and Apparent Diffusion Coefficient (ADC) Values for Detection of Malignant Vertebral Bone Marrow Lesions. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, **22**, 590-597.
- [17] 孙海燕, 李荣品, 吴亚兰, 等. 多 b 值弥散加权成像及常规磁共振成像对儿童急性白血病腰椎骨髓浸润诊断价值评估[J]. 临床军医杂志, 2022, 50(8): 827-830.
- [18] 张静, 牛金亮, 王峻. 急性白血病骨髓浸润的磁共振研究进展[J]. 中国药物与临床, 2014, 14(7): 912-914.
- [19] Mayerhoefer, M.E., Archibald, S.J., Messiou, C., Staudenherz, A., Berzaczy, D. and Schöder, H. (2019) MRI and PET/MRI in Hematologic Malignancies. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **51**, 1325-1335. <https://doi.org/10.1002/jmri.26848>
- [20] 薛华丹, 高雨菡, 王勤. 多发性骨髓瘤全身磁共振成像检查专家共识[J]. 磁共振成像, 2024, 15(7): 1-6.
- [21] Al-Ibraheem, A., Allouzi, S., Abdulkadir, A.S., Mikhail-Lette, M., Al-Rabi, K., Ma'koseh, M., *et al.* (2024) PET/CT in Leukemia: Utility and Future Directions. *Nuclear Medicine Communications*, **45**, 550-563. <https://doi.org/10.1097/mnm.0000000000001846>
- [22] 杜立华, 徐秀月, 李鑫, 等. 18F-FDG PET/CT 诊断急性白血病髓外复发的临床价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2021, 19(2): 165-167.
- [23] 魏丽晶, 雷霄, 王璐, 等. PET/CT 在儿童白血病中的诊断价值[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(16): 139-141.

-
- [24] Zhao, Z., Hu, Y., Li, J., Zhou, Y., Zhang, B. and Deng, S. (2020) Applications of PET in Diagnosis and Prognosis of Leukemia. *Technology in Cancer Research & Treatment*, **19**, Article 1533033820956993. <https://doi.org/10.1177/1533033820956993>
- [25] Zhou, W.L., Wu, H.B., Wang, L.J., *et al.* (2016) Usefulness and Pitfalls of F-18-FDG PET/CT for Diagnosing Extramedullary Acute Leukemia. *European Journal of Radiology*, **85**, 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.11.019>
- [26] Basu, S., Torigian, D. and Alavi, A. (2007) Evolving Concept of Imaging Bone Marrow Metastasis in the Twenty-First Century: Critical Role of FDG-PET. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **35**, 465-471. <https://doi.org/10.1007/s00259-007-0593-0>
- [27] Dondi, F. and Bertagna, F. (2024) Applications of 18F-Fluorodesoxyglucose PET Imaging in Leukemia. *PET Clinics*, **19**, 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2024.05.007>
- [28] Wang, W., Huang, M., Tian, R. and Shen, G. (2025) Head-to-Head Comparison of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT and FDG PET/CT for Detecting Hematologic and Solid Cancers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Roentgenology*, **225**, e2532708. <https://doi.org/10.2214/ajr.25.32708>
- [29] 边文瑾. 基于骨髓脂肪细胞表型的 MRI 影像组学模型评估急性髓细胞白血病预后[D]: [博士学位论文]. 晋中: 山西医科大学, 2025.