

· 综 述 ·

SPECT/CT 在诊断骨髓炎的应用现状[△]

李福林, 张永红*, 王栋, 李岩

(山西医科大学第二医院骨科, 山西太原 030000)

摘要: 骨髓炎是临床上较为严重的一种骨骼疾病, 可由需氧或厌氧菌、分枝杆菌及真菌引起, 导致骨的感染和破坏, 严重影响患者身心健康和劳动能力。早期诊断和治疗对于预后至关重要。常规影像学检查或单一的核医学功能显像受各种因素影响, 均不能较早、较准确地诊断骨髓炎。单光子发射计算机断层成像 (single photon emission computed tomography with computerized tomography, SPECT/CT) 融合显像有助于克服常规检查的缺点, 可用于早期诊断骨髓炎, 准确定位骨髓炎病灶, 辅助指导治疗及预后分析, 为骨髓炎的诊断提供了新方法。

关键词: 全身骨显像, SPECT/CT, 骨髓炎, 骨感染

中图分类号: R681.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2025) 01-0075-05

Current application of SPECT/CT in the diagnosis of osteomyelitis // LI Fu-lin, ZHANG Yong-hong, WANG Dong, LI Yan. Department of Orthopedics, Second Hospital, Shanxi Medical University, Taiyuan 030000, China

Abstract: Osteomyelitis is a serious bone disease in clinical practice, which can be caused by aerobic or anaerobic bacteria, mycobacteria and fungi, resulting in bone infection and destruction, seriously affecting the physical and mental health and working ability of patients. Early diagnosis and treatment are very important for good prognosis of osteomyelitis. However, conventional imaging examination or single nuclear medicine functional imaging can not diagnose osteomyelitis early and accurately due to various factors. Single photon emission computed tomography (SPECT/CT) fusion imaging is helpful to overcome the shortcomings of routine examination, and can be used for early diagnosis of osteomyelitis, accurate location of osteomyelitis lesions, provide a guidance of treatment and prognosis analysis, and is a new method for the diagnosis of osteomyelitis.

Key words: whole-body bone scan, SPECT/CT, osteomyelitis, bone infection

骨髓炎是指由病原微生物感染骨髓、骨皮质和骨膜导致骨组织破坏的炎症性疾病^[1, 2]。按其病程分为急性骨髓炎和慢性骨髓炎; 按其发病机制分为创伤性骨髓炎、血源性骨髓炎、蔓延性骨髓炎^[3]。目前创伤性骨髓炎和慢性骨髓炎日渐增多, 症状不典型者增多, 致误诊、漏诊增多而丧失最佳治疗时机^[4]。在常规检查中, X线变化在骨感染2~3周后出现, 不利于早期诊断^[5, 6]。CT可检测骨髓炎早期骨侵蚀、死骨及窦道等改变^[7]。MRI是诊断骨髓炎高敏感性和高特异性的检查, 可在感染后3~5 d检测到异常改变^[8]。但当患者体内存在内固定物时, 其产生的金属伪影会严重影响CT、MRI的成像质量^[9]。单光子发射计算机断层成像 (single photon emission computed

tomography with computerized tomography, SPECT/CT) 是解剖显像与功能显像结合的创新技术, 具有高敏感性和高特异性, 可判断病灶位置、特征和范围, 为诊断骨髓炎提供了新方法^[10]。

1 SPECT/CT 概述

SPECT的基本原理: 患者摄入放射性同位素药物, 药物在运载分子的作用下到达需要成像的部位, 由于放射性衰变, 药物从断层处发出 γ 射线, 外部仪器探测接收 γ 射线的信号后, 再利用计算机推断出该断层的图像^[11]。计算机处理后获得放射性浓聚灶的位置、形态、数量、浓聚程度等信息^[12, 13]。

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.100717

△基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 82172439); 山西省应用基础研究计划项目 (编号: 201901D111369); 山西省高等学校科技创新项目 (编号: 2022L147)

作者简介: 李福林, 在读研究生, 研究方向: 肢体矫形重建与感染, (电子信箱) lfl1552547887@163.com

*** 通信作者:** 张永红, (电子信箱) yhzhy@139.com

SPECT 可提供病灶的成骨活跃程度及血供丰富程度的信息,反映了局部生理或病理功能的变化,属功能影像范畴。SPECT 优势在于骨骼病变时骨代谢改变出现早于形态学改变,比 CT 要早 3~6 个月^[10];缺陷在于其解剖分辨率低。将 SPECT 与 CT 结合成单机型复合影像,可克服各自不足,获得最佳成像效果^[14]。

由相应软件对 SPECT 图像及 CT 图像进行融合,得到反映功能、代谢变化以及解剖结构信息的融合图像。将融合图像重建成二维或三维图像,调整对比度、亮度、色带区间、色彩饱和度等参数,直至清楚显现病变部位^[15]。综合临床信息可以对骨骼病变作出定位、定性、定量或倾向性诊断。

2 用于骨髓炎诊断的放射性核素显像剂

配合 SPECT 成像的主要有^{99m}Tc、⁶⁷Ga、¹¹¹In、¹²³I、²⁰¹Tl 等能够在衰变过程中释放单光子的核素所标记的显像剂^[11]。理想的显像剂应该在感染病灶有很高的特异性摄取,且不会在其他组织或无菌炎症中摄取。因此,研究放射性示踪剂摄取机制以及优缺点,研发更优异的放射性显像剂,对于骨髓炎的诊断具有重要意义。

2.1 标记磷酸盐

骨髓炎对骨骼的破坏导致骨重建活动增强,而二磷酸盐复合物可与羟基磷灰石中的钙结合,作为构成骨基质的主要部分参与到骨重建过程中。磷酸盐类似物可以用^{99m}Tc 标记,由于它们在骨骼中的高摄取率和静脉注射后可迅速从软组织中清除,因此常用于骨成像。其中^{99m}Tc 标记的亚甲基二膦酸盐(^{99m}Tc-Methylene diphosphonate, ^{99m}Tc-MDP)常用于骨髓炎的诊断。影响骨骼浓聚^{99m}Tc-MDP 的主要因素是病灶局部的成骨活跃程度(取决于成骨细胞/破骨细胞活性)及血供丰富程度。然而^{99m}Tc-MDP SPECT/CT 并不是针对骨髓炎的,因为骨代谢增强时,如在骨肿瘤、骨感染以及骨折后的骨愈合过程中,显像剂摄取也会增加,这导致 SPECT/CT 的诊断特异性略低^[15]。

2.2 标记枸橼酸镓

放射性同位素⁶⁷Ga 标记的枸橼酸镓可用作骨髓炎成像的示踪剂。放射性镓附着在转铁蛋白上,从血流中积聚到炎症区域,在感染、无菌性炎症和恶性肿瘤中表现出同位素摄取增加^[16]。关于镓离子在组织中的炎症摄取机制存在几种理论:(1)炎症组织的血管通透性增加,使转铁蛋白在炎症组织中积累;(2)镓与乳铁蛋白结合,由白细胞摄取,而白细胞在炎症组织中积聚;(3)细菌为吸收铁元素在低铁环境中(如炎

症过程)产生大量的铁载体(高亲和力铁螯合剂),镓离子通过与铁载体结合,积聚于炎症组织^[17]。

镓用于骨扫描的缺点是它不能很好地显示骨骼细节,也不能很好地地区分骨骼和附近的软组织炎症^[5]。与用于医学成像的其他放射性核素相比,⁶⁷Ga 具有较长的物理半衰期,这导致患者在检查过程中所受的辐射剂量较高。因此,镓闪烁成像指南中指出如有临床指征,应考虑替代技术,如标记白细胞^[18]。

2.3 标记白细胞

用放射性核素标记白细胞,可以对感染组织中的白细胞摄取进行示踪成像。标记自体白细胞是传统放射性核素感染成像的金标准^[19]。¹¹¹In 或^{99m}Tc 常用来标记白细胞,其中¹¹¹In 标记最稳定。但¹¹¹In 半衰期较长,导致每次注射的¹¹¹In 标记的白细胞辐射剂量较高。体外白细胞标记需要专业人员抽取血样(通常为 40~80 ml)分离白细胞,然后对分离的白细胞进行放射性标记。最后在同一患者体内重新注射标记的白细胞(自体注射)。这一程序较为繁琐,同时也有卫生风险^[20]。

2.4 标记白介素-8

在细菌感染中,中性粒细胞是感染的早期反应者,随着白细胞介素-8(interleukin-8, IL-8)等化学信号的传递,向感染部位迁移。中性粒细胞高表达两种类型的 IL-8 受体 CXCR1 和 CXCR2, IL-8 与受体高亲和力结合^[21]。Afzelius 等^[22]研究了幼年猪外周骨髓炎模型的^{99m}Tc 标记的 IL-8 闪烁成像,认为^{99m}Tc 标记的 IL-8 适用于骨髓炎病变的诊断,检出率约为 70%。^{99m}Tc-IL-8 闪烁显像的首次临床评价表明,注射示踪剂耐受性良好,且该示踪剂在骨髓炎等感染性疾病中积累,而在非感染性疾病中没有^[23]。

2.5 标记抗生素

抗生素与细菌成分特异性结合后,被微生物吸收和代谢,定位于感染病灶,这使放射性核素标记的抗生素成为检测感染性病变的一种优异的诊断试验^[24]。如厄他培南的抗菌活性是通过与青霉素结合蛋白结合介导的,能抑制细菌细胞壁肽聚糖层的交联。因此,^{99m}Tc-厄他培南可用于诊断深部细菌感染,如尿路、腹内、骨髓炎和术后妇科感染,但需要在各种感染模型中进一步进行临床前评估^[25]。^{99m}Tc-环丙沙星闪烁显像可检测革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌感染,用于鉴别细菌感染与无菌性炎症^[26, 27]。

3 临床应用

核医学科医师通过对病灶的浓聚程度目测分析进

行初步诊断,亦可利用计算机勾画感兴趣区域(region of interest, ROI)技术,分别在病变部位和正常组织获得靶器官组织与本底(target/background, T/B)的摄取比值进行半定量分析协助诊断。此外,还可以通过增加定量指标帮助区分正常摄取和异常摄取来提高诊断的准确性。

3.1 诊断骨髓炎

SPECT/CT 诊断骨髓炎具有较高的敏感性和特异性。Modabber 等^[28]报道,对 31 例疑似颌骨放射性骨坏死、骨髓炎及药物相关性颌骨坏死患者行 SPECT/CT 显像,诊断敏感性 95%、特异性 91%、准确性 94%;认为与其他常规影像检查方法相比,SPECT/CT 是检测炎症性颌骨病变的有效且精确的成像工具,能够准确区分健康和炎症性骨组织。Arıcan 等^[29]对 85 例疑似骨髓炎患者进行三期骨显像和 SPECT/CT 检查,其中 16.5% 患者获得新诊断,后续治疗方案随之改变;SPECT/CT 对骨髓炎的诊断明显优于三期骨显像(kappa 值分别为 0.626 和 0.929);SPECT/CT 对慢性骨髓炎的检出更为准确(三期骨显像的 kappa 值为 0.541, SPECT/CT 的 kappa 值为 0.944);认为 SPECT/CT 融合显像提高了骨髓炎诊断的准确性,并有助于鉴别慢性骨髓炎和急性骨髓炎,对术后和创伤后骨髓炎的诊断更具优势。Song 等^[30]报道,对 144 例确诊/疑似慢性感染性骨折内/外固定术后骨不连患者行 SPECT/CT 扫描,其中 SPECT/CT 融合图像的诊断敏感性 91.3%,特异性 84.6%,准确性 88.9%;SPECT 的诊断敏感性 52.2%,特异性 15.4%,准确性 38.9%;CT 的诊断敏感性 65.2%,特异性 23.1%,准确性 50.0%;认为 SPECT/CT 融合显像可提高创伤后慢性感染性骨不连骨髓炎的诊断置信度,能准确显示感染的位置和范围,具有较高的敏感性和特异性,为手术治疗提供了重要的指导意义。Nishikawa 等^[31]报道,对 103 例下肢骨髓炎患者行定量 Ga-SPECT/CT,结果 SPECT/CT 结合病灶与背景比(lesion-to-background ratio, LBR)的敏感性和特异性分别为 91%和 96%,最大标准化摄取值(maximum standardized uptake value, SUVmax)的敏感性和特异性分别为 89%和 94%,病灶总摄取量(total lesion uptake, TLU)的敏感性和特异性分别为 91%和 92%;认为与单一 SPECT 相比,使用定量参数 LBR、SUVmax 和 TLU 的 Ga-SPECT/CT 对下肢骨髓炎具有更好的诊断性能。

3.2 辅助指导骨髓炎治疗

SPECT/CT 可以在术前辅助判断骨感染位置及范

围,避免术中过度清创,提高治愈率。Lee 等^[32]报道,对 10 例成人胫骨或股骨慢性骨髓炎患者术前进行 SPECT/CT 检查,确定骨髓炎的位置和范围,制定手术计划,结果所有患者术前 SPECT/CT 上的热摄取区与术中确定的骨髓炎病变的位置一致,9 例骨髓炎临床治愈,1 例因骨髓炎复发而截肢;认为 SPECT/CT 可用于定位和辅助指导治疗四肢慢性骨髓炎,临床效果良好。Modabber 等^[28]报道,对 31 例疑似颌骨放射性骨坏死、骨髓炎或药物相关性颌骨坏死患者行 SPECT/CT 检查,术前在 SPECT/CT 图像中测量发生炎性病变的骨长度,术后由病理学家测量实际发生炎性病变的骨长度,结果 SPECT/CT 测量的患骨长度与术后测量值差异无统计学意义($P=0.23$)且两者显著相关($r=0.86, P<0.001$);认为 SPECT/CT 可帮助外科医生在手术前确定炎性病灶的位置及范围。胡适等^[33]报道,对 21 例下肢慢性血源性骨髓炎患者于 I 期术前行 SPECT/CT 检查,应用放射性计数等高线(isocontour, ISO)界定骨组织清创范围,冠状位下评估 ROI 骨清创范围纵向长度与实际骨清创范围纵向长度,结果冠状位下 ROI 骨清创范围纵向长度为(86.8±31.1) mm,实际骨清创范围纵向长度为(86.0±31.3) mm,两者差异无统计学意义($P>0.05$);认为对于下肢慢性血源性骨髓炎,^{99m}Tc-MDP SPECT/CT 融合像可以作为感染骨组织术前清创范围界定的有效手段。Kirinoki Ichikawa 等^[34]报道,对 90 例疑似下肢骨髓炎患者行⁶⁷Ga-SPECT/CT 检查,通过将病灶最大放射性计数值除以健侧股骨远端骨髓的最大放射性计数值来计算炎症与背景比(inflammation-to-background ratio, IBR),结果 90 例患者中有 28 例接受了截骨术,IBR 值>8.4 时截骨率 71.4%,明显高于 IBR 值为 8.4 时的截骨率 5.5% ($P<0.001$),其敏感性为 89%,特异性为 84%。在多因素 COX 回归分析中,IBR 是截骨的独立危险因素(95% CI 5.6~63.9, $P<0.001$);认为定量⁶⁷Ga-SPECT/CT 有助于确定哪些下肢骨髓炎患者可能需要截骨术,有助于防止不必要的重大下肢截肢术。

3.3 预后分析

经过治疗的骨髓炎患者可以通过复查 SPECT/CT 观察有无复发及感染程度的变化以监测疗效。Heimann 等^[35]报道,对 34 例颌骨骨髓炎患者治疗前后进行 SPECT/CT 检查并随访以评价疗效,评价指标为示踪剂摄取分级:0=无摄取,1=低摄取,2=中等摄取,3=高摄取,结果 91%患者治疗前的 SPECT/CT 显示明显摄取(2 级或 3 级),治疗至少 12 个月后临床

症状完全缓解的24例患者中,91%患者的SPECT/CT显示0级或1级摄取,在10例出现骨髓炎症状加重的患者中,80%表现出摄取增加;认为低级别(1级)示踪剂摄取在临床症状完全缓解的患者中很常见,提示正在进行骨重塑和愈合,SPECT/CT是准确评估颌骨骨髓炎治疗效果、疾病恶化和并发症的有效工具。Nishikawa等^[31]报道,对103例下肢骨髓炎患者行定量Ga-SPECT/CT核素显像,结果TLU的敏感性和特异性分别为91%和92%,TLU是独立的预后因素($P=0.047$),发现TLU值与主要不良事件(major adverse event, MAE)呈正相关;认为使用定量参数TLU的Ga-SPECT/CT有对下肢骨髓炎进行预后评估的潜力。Kitajima等^[36]报道1例63岁女性下颌骨骨髓炎的病例,应用SPECT/CT定量参数评估抗生素治疗、高压氧治疗及手术治疗的疗效,结果与治疗前相比,治疗后的SPECT/CT定量参数均有明显下降,提示摄取减少;认为定量骨SPECT/CT的各种指标,如SUVmax、代谢骨量(metabolic bone volume, MBV)和TLU可用于评估下颌骨骨髓炎患者的骨炎症活动和治疗效果。

4 结 语

SPECT/CT具有灵敏度高、成本低、易操作等优点,在诊断骨髓炎中的应用已较为广泛。但病灶的浓聚程度都是靠视觉分析,缺乏定量指标。使得SPECT/CT对于骨髓炎的诊断主要依赖于核医学科医师的经验性判断,缺乏客观性。定量SPECT/CT可以对放射性示踪剂的局部浓度进行相对或绝对的数值评估,以克服纯粹视觉分析的缺点,加强核医学图像数据解释的客观性,从而加强诊断准确性。目前定量SPECT/CT处于初级阶段,在应用于常规临床实践之前,仍需要进行大量的研究和技术改进。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 李福林:课题设计及实施和论文写作、采集分析和解释数据;张永红:课题设计、论文审阅、统计分析、获取研究经费及行政、技术或材料支持、指导及支持性贡献;王栋:分析和解释数据、论文审阅、提供行政、技术或材料支持、指导及支持性贡献;李岩:论文审阅、提供行政、技术或材料支持、指导及支持性贡献。

参考文献

- Morgenstern M, Kuhl R, Eckardt H, et al. Diagnostic challenges and future perspectives in fracture-related infection [J]. *Injury*, 2018, 49 (Suppl 1): S83-S90. DOI: 10.1016/S0020-1383(18)30310-3.
- 史永安, 杜全红, 马秉珺, 等. 创伤性骨髓炎的分型及治疗经验 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2016, 24 (11): 1048-1050. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.11.20.
Shi YA, Du QH, Ma BJ, et al. Classification and treatment experience of traumatic osteomyelitis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2016, 24 (11): 1048-1050. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.11.20.
- 陈东旭, 薄占东. 骨髓炎的治疗现状及进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20 (3): 224-227. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.03.10.
Chen DX, Mo ZD. Current status and progress of treatment of osteomyelitis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2012, 20 (3): 224-227. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.03.10.
- 鲁玉来, 张喜善. 骨髓炎临床感染类型的变化及其对策 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22 (23): 2189-2194. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2014.23.15.
Lu YL, Zhang XS. Changes in clinical infection types of osteomyelitis and their countermeasures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2014, 22 (23): 2189-2194. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2014.23.15.
- Pineda C, Espinosa R, Pena A. Radiographic imaging in osteomyelitis: the role of plain radiography, computed tomography, ultrasonography, magnetic resonance imaging, and scintigraphy [J]. *Semin Plast Surg*, 2009, 23 (2): 80-89. DOI: 10.1055/s-0029-1214160.
- Tiwari P, Bera RN, Kanojia S, et al. Assessing the optimal imaging modality in the diagnosis of jaw osteomyelitis. A meta-analysis [J]. *Br J Oral Maxillofac Surg*, 2021, 59 (9): 982-992. DOI: 10.1016/j.bjoms.2020.11.012.
- Foti G, Longo C, Sorgato C, et al. Osteomyelitis of the lower limb: diagnostic accuracy of dual-energy CT versus MRI [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13 (4): 703. DOI: 10.3390/diagnostics13040703.
- Gemmel F, Van den Broeck B, Vanelstraete S, et al. Hybrid imaging of complicating osteomyelitis in the peripheral skeleton [J]. *Nucl Med Commun*, 2021, 42 (9): 941-950. DOI: 10.1097/MNM.0000000000001421.
- Kruk KA, Dietrich TJ, Wildermuth S, et al. Diffusion-weighted imaging distinguishes between osteomyelitis, bone marrow edema, and healthy bone on forefoot magnetic resonance imaging [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 56 (5): 1571-1579. DOI: 10.1002/jmri.28091.
- 杨崇林, 徐向阳. SPECT/CT在足踝部疾病诊断中的应用 [J]. *国际骨科学杂志*, 2013, 34 (4): 239-242. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2013.04.003.
Yang CL, Xu XY. Application of SPECT/CT in the diagnosis of foot and ankle disease [J]. *International Orthopaedic Journal*, 2013, 34 (4): 239-242. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2013.04.003.
- 赵大鹏, 陈小花, 苏玮, 等. 放射性药物在临床诊断和治疗中的应用进展 [J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2022, 29 (18): 1354-1360. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcp.2022.18.09.
Zhao DP, Chen XH, Su W, et al. Application of radiopharmaceuticals in clinical diagnosis and treatment [J]. *Chinese Journal of*

- Cancer Preventive Treatment, 2022, 29 (18) : 1354–1360. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcp.2022.18.09.
- [12] Jødal L, Afzelius P, Alstrup AKO, et al. Radiotracers for bone marrow infection imaging [J]. *Molecules*, 2021, 26 (11) : 3159. DOI: 10.3390/molecules26113159.
- [13] Van den Wyngaert T, Strobel K, Kampen WU, et al. The EANM practice guidelines for bone scintigraphy [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016, 43 (9) : 1723–1738. DOI: 10.1007/s00259-016-3415-4.
- [14] Papatianassiou D, Bruna-Muraille C, Jouannaud C, et al. Single-photon emission computed tomography combined with computed tomography (SPECT/CT) in bone diseases [J]. *Joint Bone Spine*, 2009, 76 (5) : 474–480. DOI: 10.1016/j.jbspin.2009.01.016.
- [15] Ritt P. Recent Developments in SPECT/CT [J]. *Semin Nucl Med*, 2022, 52 (3) : 276–285. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2022.01.004.
- [16] Tsan MF. Mechanism of gallium-67 accumulation in inflammatory lesions [J]. *J Nucl Med*, 1985, 26 (1) : 88–92.
- [17] Pauwels EK, McCready VR, Stoot JH, et al. The mechanism of accumulation of tumour-localising radiopharmaceuticals [J]. *Eur J Nucl Med*, 1998, 25 (3) : 277–305. DOI: 10.1007/s002590050229.
- [18] Seabold JE, Palestro CJ, Brown ML, et al. Procedure guideline for gallium scintigraphy in inflammation. Society of Nuclear Medicine [J]. *J Nucl Med*, 1997, 38 (6) : 994–997.
- [19] Palestro CJ. Molecular imaging of infection: The first 50 years [J]. *Semin Nucl Med*, 2020, 50 (1) : 23–34. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2019.10.002.
- [20] Seabold JE, Forstrom LA, Schauwecker DS, et al. Procedure guideline for indium-111-leukocyte scintigraphy for suspected infection/inflammation. Society of Nuclear Medicine [J]. *J Nucl Med*, 1997, 38 (6) : 997–1001.
- [21] Ishimoto N, Park JH, Kawakami K, et al. Structural basis of CXCL12 chemokine receptor 1 ligand binding and activation [J]. *Nat Commun*, 2023, 14 (1) : 4107. DOI: 10.1038/s41467-023-39799-2.
- [22] Afzelius P, Heegaard PMH, Jensen SB, et al. [^{99m}Tc]-labelled interleukin-8 as a diagnostic tool compared to [¹⁸F]FDG and CT in an experimental porcine osteomyelitis model [J]. *Am J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 10 (1) : 32–46.
- [23] Bleeker-Rovers CP, Rennen HJ, Boerman OC, et al. ^{99m}Tc-labeled interleukin 8 for the scintigraphic detection of infection and inflammation: first clinical evaluation [J]. *J Nucl Med*, 2007, 48 (3) : 337–343.
- [24] Naqvi SAR. ^{99m}Tc-labeled antibiotics for infection diagnosis: Mechanism, action, and progress [J]. *Chem Biol Drug Des*, 2022, 99 (1) : 56–74. DOI: 10.1111/cbdd.13923.
- [25] Naqvi SAR, Jabbar T, Alharbi MA, et al. Radiosynthesis, quality control, biodistribution, and infection-imaging study of a new ^{99m}Tc-labeled ertapenem radiopharmaceutical [J]. *Front Chem*, 2022, 10: 1020387. DOI: 10.3389/fchem.2022.1020387.
- [26] Naqvi SAR, Roohi S, Sabir H, et al. Susceptibility of ^{99m}Tc-Ciprofloxacin for common infection causing bacterial strains isolated from clinical samples: an in vitro and in vivo study [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2019, 188 (2) : 424–435. DOI: 10.1007/s12010-018-2915-z.
- [27] Fang S, Jiang Y, Gan Q, et al. Design, preparation, and evaluation of a novel ^{99m}TcN complex of ciprofloxacin xanthate as a potential bacterial infection imaging agent [J]. *Molecules*, 2020, 25 (24) : 5837. DOI: 10.3390/molecules25245837.
- [28] Modabber A, Schick D, Möhlhenrich SC, et al. Evaluation of SPECT/CT in the assessment of inflammatory jaw pathologies [J]. *Eur J Radiol*, 2020, 125: 108917. DOI: 10.1016/j.ejrad.2020.108917.
- [29] Arıcan P, Okudan B, Şefizade R, et al. Diagnostic value of bone SPECT/CT in patients with suspected osteomyelitis [J]. *Mol Imaging Radionucl Ther*, 2019, 28 (3) : 89–95. DOI: 10.4274/mirt.galenos.2019.20053.
- [30] Song Q, Long L, Cui S, et al. Utility of technetium-99m-methylene diphosphonate single-photon emission computed tomography/computed tomography fusion in detecting post-traumatic chronic-infected nonunion in the lower limb [J]. *Nucl Med Commun*, 2019, 40 (8) : 778–785. DOI: 10.1097/MNM.0000000000001027.
- [31] Nishikawa Y, Fukushima Y, Kirinoki S, et al. Diagnostic performance of quantitative Ga-SPECT/CT for patients with lower-limb osteomyelitis [J]. *Eur J Hybrid Imaging*, 2022, 6 (1) : 27. DOI: 10.1186/s41824-022-00148-z.
- [32] Lee SH, Kim MB. Localization of osteomyelitis lesions for operative eradication of chronic osteomyelitis of the lower extremities by bone SPECT/CT: a feasibility study [J]. *Int Orthop*, 2023, 47 (1) : 5–15. DOI: 10.1007/s00264-022-05617-5.
- [33] 胡适, 孙东, 王舒琳, 等. ^{99m}Tc-MDP SPECT/CT 融合像引导下慢性血源性骨髓炎骨组织清创的有效性评价 [J]. *中华创伤杂志*, 2021, 37 (3) : 243–249. DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20201130-00690.
- Hu S, Sun D, Wang SL, et al. Debridement effectiveness of infected bone tissue of chronic hematogenous osteomyelitis in the lower extremities under the guidance of ^{99m}Tc-MDP SPECT/CT fused images [J]. *Chinese Journal of Trauma*, 2021, 37 (3) : 243–249. DOI: 10.3760/cma.j.cn501098-20201130-00690.
- [34] Kirinoki-Ichikawa S, Takagi G, Fukushima Y, et al. Clinical utility of ⁶⁷Gallium-SPECT/CT for determining osteotomy indication in patients with lower-limb osteomyelitis [J]. *Wound Repair Regen*, 2023, 31 (3) : 384–392. DOI: 10.1111/wrr.13075.
- [35] Heimann I, Kuttnerberger J, Della Chiesa A, et al. Monitoring jaw osteomyelitis therapy with single-photon emission computed tomography/computed tomography [J]. *Nucl Med Commun*, 2021, 42 (1) : 51–57. DOI: 10.1097/MNM.0000000000001297.
- [36] Kitajima K, Noguchi K, Moridera K, et al. Usefulness of quantitative bone SPECT/CT for evaluating treatment response in a patient with mandibular osteomyelitis [J]. *Case Rep Oncol*, 2021, 14 (2) : 820–825. DOI: 10.1159/000516761.

(收稿:2023-10-12 修回:2024-04-08)

(同行评议专家: 江水华, 花奇凯, 郑学建)

(本文编辑: 宁桦)