

单光子发射计算机断层成像及计算机断层扫描 (SPECT/CT)临床应用进展

陆晓骞¹, 宗凌燕², 沈琪¹

1. 南京医科大学附属常州第二人民医院医学装备科, 江苏 常州 213001;

2. 常州市第一人民医院装备物资采购处, 江苏 常州 213004

摘要: 传统单光子发射计算机断层成像(SPECT)与计算机断层成像(CT)结合使用可显示病灶形态学改变及显像剂分布状态, 可提高肿瘤和非肿瘤疾病成像敏感性和特异性。SPECT/CT 通过一次成像观察多部位病灶, 可用于分析解剖结构及代谢状态, 从而提高了疾病鉴别与诊断准确性。新型混合 SPECT/CT 设备缩短了图像采集时间并提供精准衰减校正和融合成像, 为临床合理选择治疗方案提供了科学基础。本文综述了 SPECT/CT 技术临床应用进展。

关键词: 单光子发射计算机断层成像; 计算机断层成像; 标准摄取值; 核医学; 临床应用

中图分类号: R816 文献标识码: R 文章编号: 1004-714X(2023)02-0198-04

Progress in application of single-photon emission computed tomography/computed tomography (SPECT/CT) imaging in clinical practice

LU Xiaoqian¹, ZONG Lingyan², SHEN Qi¹

1. Department of Medical Devices, Changzhou Second People's Hospital Affiliated to Nanjing Medical University,

Changzhou 213001 China; 2. Department of Equipment and Material Purchase and Supervision,

Changzhou Municipal First People's Hospital, Changzhou 213004 China

Abstract: The combination of conventional single-photon emission computed tomography (SPECT) and computed tomography (CT) may display the morphological changes of lesions and distribution of imaging agents, which is effective to improve the imaging sensitivity and specificity of tumors and non-tumor diseases. SPECT/CT is feasible to analyze the anatomical structure and metabolic status through displaying multi-site lesions with single imaging, thereby improving differential diagnosis and diagnostic accuracy of diseases. In addition, the novel mixed SPECT/CT device shortens the duration of image acquisition and provides precise attenuation correction and fusion imaging, which provides a scientific basis for rational selection of treatment regimens in clinical practice. This review describes the advances in clinical application of SPECT/CT.

Keywords: Single-photon emission computed tomography; Computed tomography; Standard uptake value; Nuclear medicine; Clinical application

Corresponding author: SHEN Qi, E-mail: 15961137361@163.com

单光子发射计算机断层成像(SPECT)是一种常见诊断方法, 用于肿瘤精准诊断、器官或器官系统三维(3D)成像以及体内血流和新陈代谢检查, 该技术需要将发射 γ 的放射性核素注射到患者血液中^[1]。SPECT 经常被用于确认 ^{131}I 、 ^{90}Y 或 ^{177}Lu 标记抗体治疗下所需的示踪剂分布或进行疾病诊断, 这一过程受到光子散射、光子衰减和部分体积伪影的影响, 放射性物质需 SPECT 进行绝对定量^[2]。传统 SPECT 与计

算机断层成像(CT)结合使用构成核医学成像适用于各种临床疾病的诊断应用^[3]。采用新型混合 SPECT/CT 设备的可用性越来越高, 这为缩短采集时间并提供精确的衰减校正和融合成像提供了机会。SPECT/CT 的主要优点表现为更好的衰减校正、更高的特异性以及准确描述疾病的定位和邻近组织的可能受累^[4]。通过 SPECT/CT 准确定位和表征用于内分泌肿瘤、孤立性肺结节、肺癌、脑肿瘤、淋巴瘤、前列腺癌、恶性和

良性骨病变等^[5-6]。此外,混合 SPECT/CT 成像特别适合支持微创手术日益增长的应用,以及精确定义心血管患者诊断和预后特征,SPECT/CT 对其他临床疾病或恶性肿瘤的应用目前正在广泛研究,其诊断准确性进一步得到提高。

1 SPECT/CT 在乳腺癌诊疗中的应用

乳腺癌是女性患者最常见的癌症之一,发病率为 11.7%,约有的 50%~75% 乳腺癌患者发生骨转移^[7]。早期发现骨转移并使用分子成像技术(如 SPECT/CT)将其与退行性病变区分开来,对于治疗乳腺癌患者随访具有重要作用。SPECT/CT 在检测骨转移性病变方面的敏感性在 89%~95%,特异性为 82%~95%^[8]。对转移性骨病乳腺癌患者 SPECT/CT 数据进行定量分析所得最大标准摄取值(SUV),有助于鉴别退行性骨病变的活动性骨转移,根据获得的图像明确诊断,从而提高诊断准确性和患者的临床管理,定量分析可以提供更标准化骨扫描^[9]。

SPECT/CT 可以确定乳腺癌进展的视觉和定量评估之间的方法间一致性程度,时以绝对单位报告放射性示踪剂的摄取,Kaneta 等^[10]定量分析计算 70 名患者,评估的转移性病变数量显著减少,平均 SUV 值为 20.4 ± 20.8 。Gherghe 等^[11]报道退行性骨病变和转移性骨病变之间的最大 SUV 值存在显著差异,为了评估区分退行性病变和转移性病变的诊断准确性,ROC 曲线下 AUC 具有 0.974 的高值(95%CI 0.95~0.98),其中转移性病变的数值更高,这种差异的机制可能为转移性乳腺癌细胞可以改变参与骨重塑。

Quah 等^[12]对 SPECT/CT 数据的定量分析可以提高区分退行性骨病变和转移性病变的准确性,通过 ROC 曲线分析获得的 SUV 最大临界值为 16.6 g/mL,有助于区分乳腺癌患者的转移性和退行性病变,敏感性为 91.5%、特异性为 93.3%。SPECT/CT SUV 值有益于治疗效果评估、患者随访和患者间比较。

2 SPECT/CT 在前列腺癌诊疗中的应用

前列腺癌(PCa)是老年男性泌尿系统中最常见的癌症,也是癌症相关死亡的第六大原因之一,骨骼是前列腺癌中最常见的远处器官转移部位,8%~35% 的患者在诊断时已经出现远处转移^[13]。前列腺癌的骨转移可通过 CT 和 MRI 监测溶骨性和混合型骨转移,溶骨性转移瘤通常没有明确的边界,因此很难在 CT 或 MRI 图像上精确确定其大小,^{99m}Tc-PSMA-T4

是一种新的放射性药物(Polatom),用于对前列腺癌患者的局部区域转移和/或局部复发进行成像,通过 SPECT / CT 图像可以评估前列腺癌患者骨转移的治疗效果,其相应敏感性范围为 63%~95%^[14]。转移性前列腺癌到骨骼通常以整个骨骼的广泛疾病为特征,在影像学检查中 ≥ 50 个病变的患者通常被认为在骨扫描时有超扫描,SPET/CT 定量评估限制在超级扫描中每个解剖部位一个病变 15 或为每个患者选择最多 5 个病变^[15]。

Harmon 等^[16]测量活动性骨转移负荷的总骨摄取量计算为使用骨 SPECT / CT 在躯干中 [作为标准化摄取值获得的平均摄取值] \times (病变体积)的总和,比较了 61 例有骨转移的前列腺癌患者和 69 例没有骨转移的前列腺癌患者的骨转移和非转移区域,骨转移患者非转移部位的摄取显著低于无转移的患者。Song 等^[17]骨转移的前列腺癌患者 SPECT/CT 诊疗在敏感性和特异性分析显示,平均摄取值 7.0 为阈值水平,在 9 名患者中,有 2 名患者总骨摄取量和骨扫描指数变化之间存在差异,其中总骨摄取量变化与视觉判断相关,但骨扫描指数变化没有,在 2 名患者中,骨扫描指数在整个病程中接近 0,但总骨摄取量呈阳性并发生变化,尽管变化不大。因此,常规 SPECT/CT 在典型前列腺癌形态学影像学表现和放射性示踪剂摄取模式的情况下,可以诊断出转移性病变。

3 SPECT/CT 在骨关节损伤诊疗中的应用

距骨骨软骨损伤在大多数情况下因为早期无症状损伤很容易被忽视,25%~50% 的踝关节扭伤患者在初始损伤(扭伤)后数年内会出现慢性长期踝关节疼痛,研究发现由于踝关节不稳定导致距骨慢性损伤的发生率高达 50%^[18]。SPECT/CT 是一种针对距骨囊性病变患者的新型多模态成像方法,其应用可以实时评估距骨骨软骨损伤的血流动力学代谢状态。软骨下骨囊性病变及其周围区域表现出最高的活动,而距骨的其余部分呈现出正常的生理骨代谢区,硬化区位于病变区和正常组织的交界处显示出活跃的骨代谢,示踪剂浓度明显位于胫骨穹窿前部和胫骨臼骨关节背伸的应力点,其中硬化区最集中,骨代谢最活跃,血流最丰富^[18]。Hamilton 等^[19]报道病理学显示与 SPECT / CT 结果显示曲折的纤维囊壁,致密成纤维细胞增殖多,胶原纤维丰富囊壁周围的肉芽组织和炎性细胞聚集,软骨发生坏死病变周围有骨化和活动成骨,活性软骨发生和骨化 SPECT/CT 静态融合图像

上显示囊性腔中示踪剂的异常浓度。囊性病变内成骨修复活动的存在继发于损伤, 胫骨损伤的局灶性坏死与明显的充血和炎症反应、活动性纤维和骨修复以及囊性病变周围快速形成保护性新骨的硬化性外壳同时发生, 在相当大的应力下保持距骨关节表面的整体完整性和正常形态^[20-21]。

内侧隔室骨关节炎(OA)易引起膝关节内翻畸形, 临床症状为膝关节疼痛, 多发年轻患者, 内侧开口楔形高位胫骨截骨术(MOWHTO)治疗为主可减轻膝关节内侧隔室的负荷。⁹⁹Tc^m 羟亚甲基二膦酸盐(HDP)SPECT/CT 是一种常用来确定退行性膝关节内侧隔室骨关节炎的进展程度和临床症状的方法, 且其使用量逐渐增加^[22]。Kim 等^[23]研究了接受胫骨截骨术的患者在 SPECT / CT 上的摄取变化, 结果显示术后 12 个月和 24 个月膝关节内侧隔室放射性示踪剂摄取显著减少以及骨关节炎指数评分的显著改善。Hopwood 等^[24]与 Yao 等^[25]在 SPECT / CT 分析中观察到最小的临床重要差异组的胫骨前外侧室有显著改善, 治疗可能导致侧室支超负荷, 因为在楔形高位胫骨截骨术之后, 承重线从内侧转移到外侧隔室, 这会导致膝关节外侧的承重增加并恶化该区域的放射性示踪剂摄取。SPECT/CT 的定量评估在近些年越来越被临床认可, 通过定量分析进行相对或绝对的数值评估, 分析图像数据客观, 诊断准确性进一步得到提高。

4 SPECT/CT 在甲状腺疾病诊疗中的应用

甲状腺疾病的发病率逐年上升, 甲状腺产生左旋甲状腺素(T₄)和三碘甲状腺原氨酸(T₃)调节新陈代谢, 甲状腺激素不足可能导致甲状腺功能减退和甲状腺功能亢进^[26]。甲状腺摄取百分比的测量已经在核医学领域使用多年, 鉴别诊断甲状腺功能改变的疾病, 定量 SPECT/CT 在测量甲状腺摄取百分比方面比传统方法更准确。

Dong 等^[27]报道在 50 例患者中, 46 例甲状腺刺激素(TSH)水平低于正常, T₃ 或游离 T₄ 水平升高或正常, 之前经实验室使用放射免疫测定法(RIA)或酶联免疫吸附测定进行确诊, 患者通过定量 SPECT/CT 观察甲状腺摄取百分比差异显著, Graves 患者的数值最高(5.28 ± 5.19)%, 其次是甲状腺功能正常患者(0.78 ± 0.50)% 和是甲状腺炎患者(0.33 ± 0.40)%。Shao 等^[28]报道 SPECT/CT 观察标准化摄取值在 Graves 病患者中最大为 83.77 ± 52.53, 其次是甲状腺

功能正常和甲状腺炎患者分别为 33.51 ± 23.54 和 11.34 ± 13.72。SPECT/CT 可以评估甲状腺疾病复发危险度, 给临床制定个体化治疗方案提供指导, 以减少并发症的发生。

5 小 结

SPECT/CT 是一种核医学影像方法, 经过近年发展, 可以提供自动化图像分析, 且图像质量和诊断可信度有了显著提高, 如混合 SPECT/CT 设备的实现、衰减校正的实现和迭代重建技术, 由多个连续床位采集的全身 SPECT/CT 图像已经开始增加。在未来, 将出现具有更高光子灵敏度的新准直器和探测器, 如在 SPECT/CT 中使用迭代 CT 重建, 可为新的自动化图像分析方法奠定基础, 并有助于临床诊断和 SPECT/CT 图像解释的标准化。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 陆晓骞、宗凌燕负责文献检索, 收集和分析数据, 文章撰写; 沈琪负责论文构思、论文修改和定稿

参考文献

- [1] Ljungberg M, Pretorius PH. SPECT/CT: an update on technological developments and clinical applications[J]. *Br J Radiol*, 2018, 91 (1081) : 20160402. DOI: 10.1259/bjr.20160402.
- [2] Mariani G, Bruselli L, Kuwert T, et al. A review on the clinical uses of SPECT/CT[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2010, 37 (10) : 1959-1985. DOI: 10.1007/s00259-010-1390-8.
- [3] Hoogendam JP, Veldhuis WB, Hobbelen MGG, et al. ^{99m}Tc SPECT/CT versus planar lymphoscintigraphy for preoperative sentinel lymph node detection in cervical cancer: a systematic review and metaanalysis[J]. *J Nucl Med*, 2015, 56 (5) : 675-680. DOI: 10.2967/jnumed.114.152439.
- [4] Togami S, Kawamura T, Yanazume S, et al. Comparison of lymphoscintigraphy and single photon emission computed tomography with computed tomography (SPECT/CT) for sentinel lymph node detection in endometrial cancer[J]. *Int J Gynecol Cancer*, 2020, 30 (5) : 626-630. DOI: 10.1136/ijgc-2019-001154.
- [5] Wang YF, Chuang MH, Chiu JS, et al. On-site preparation of technetium-99m labeled human serum albumin for clinical application[J]. *Tohoku J Exp Med*, 2007, 211 (4) : 379-385. DOI: 10.1620/tjem.211.379.
- [6] Chen Z, Chen XQ, Wang RF. Application of SPECT and PET/CT with computer-aided diagnosis in bone metastasis of prostate cancer: a review[J]. *Cancer Imaging*, 2022, 22 (1) : 18. DOI: 10.1186/s40644-022-00456-4.

- [7] Gherghe M, Mutuleanu MD, Stanciu AE, et al. Quantitative analysis of SPECT-CT data in metastatic breast cancer patients-The clinical significance[J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14 (2) : 273. DOI: [10.3390/cancers14020273](https://doi.org/10.3390/cancers14020273).
- [8] Brook N, Brook E, Dharmarajan A, et al. Breast cancer bone metastases: pathogenesis and therapeutic targets[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2018, 96: 63-78. DOI: [10.1016/j.biocel.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.biocel.2018.01.003).
- [9] Donohoe KJ, Cohen EJ, Giammarile F, et al. Appropriate use criteria for bone scintigraphy in prostate and breast cancer: summary and excerpts[J]. *J Nucl Med*, 2017, 58 (4) : 14N-17N.
- [10] Kaneta T, Ogawa M, Daisaki H, et al. SUV measurement of normal vertebrae using SPECT/CT with Tc-99m methylene diphosphonate[J]. *Am J Nucl Med Mol Imaging*, 2016, 6 (5) : 262-268.
- [11] Gherghe M, Bordea C, Blidaru A. Clinical significance of the lymphoscintigraphy in the evaluation of non-axillary sentinel lymph node localization in breast cancer[J]. *Chirurgia (Bucur)*, 2015, 110 (1) : 26-32.
- [12] Quah GS, French JR, Gordon DJ, et al. Incidental findings on single-photon emission computed tomography/computed tomography (SPECT/CT) lymphoscintigraphy in breast cancer: the proposed Westmead SPECT/CT incidental findings classification[J]. *ANZ J Surg*, 2022, 92 (6) : 1434-1439. DOI: [10.1111/ans.17659](https://doi.org/10.1111/ans.17659).
- [13] Umeda T, Koizumi M, Fukai S, et al. Evaluation of bone metastatic burden by bone SPECT/CT in metastatic prostate cancer patients: defining threshold value for total bone uptake and assessment in radium-223 treated patients[J]. *Ann Nucl Med*, 2018, 32 (2) : 105-113. DOI: [10.1007/s12149-017-1224-x](https://doi.org/10.1007/s12149-017-1224-x).
- [14] Sergieva S, Mangalgiev R, Dimcheva M, et al. SPECT-CT imaging with [^{99m}Tc]PSMA-T4 in patients with recurrent prostate cancer[J]. *Nucl Med Rev Cent East Eur*, 2021, 24 (2) : 70-81. DOI: [10.5603/NMR.2021.0018](https://doi.org/10.5603/NMR.2021.0018).
- [15] Zhang Y, Lin ZY, Li T, et al. Head-to-head comparison of ^{99m}Tc-PSMA and ^{99m}Tc-MDP SPECT/CT in diagnosing prostate cancer bone metastasis: a prospective, comparative imaging trial[J]. *Sci Rep*, 2022, 12 (1) : 15993. DOI: [10.1038/s41598-022-20280-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-20280-x).
- [16] Harmon SA, Perk T, Lin C, et al. Quantitative assessment of early [¹⁸F] sodium fluoride positron emission tomography/computed tomography response to treatment in men with metastatic prostate cancer to bone[J]. *J Clin Oncol*, 2017, 35 (24) : 2829-2837. DOI: [10.1200/JCO.2017.72.2348](https://doi.org/10.1200/JCO.2017.72.2348).
- [17] Song QT, Zeng XT, Huang HJ, et al. SPECT/CT imaging features of cystic degeneration of the talus and their relation to pathological findings[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17 (1) : 449. DOI: [10.1186/s13018-022-03344-6](https://doi.org/10.1186/s13018-022-03344-6).
- [18] Nakasa T, Ikuta Y, Sawa M, et al. Evaluation of articular cartilage injury using computed tomography with axial traction in the ankle joint[J]. *Foot Ankle Int*, 2018, 39 (9) : 1120-1127. DOI: [10.1177/1071100718777489](https://doi.org/10.1177/1071100718777489).
- [19] Hamilton C, Burgul R, Kourkounis G, et al. Osteochondral defects of the talus: radiological appearance and surgical candidate profiling-A retrospective analysis[J]. *Foot*, 2021, 46: 101767. DOI: [10.1016/j.foot.2020.101767](https://doi.org/10.1016/j.foot.2020.101767).
- [20] Liu HJ, Guo HL, Guo SN, et al. Novel treatment of 99Tc-MDP improves clinical and radiographic results for patients with osteochondral lesions of the talus[J]. *Q J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 63 (2) : 199-206. DOI: [10.23736/S1824-4785.16.02872-7](https://doi.org/10.23736/S1824-4785.16.02872-7).
- [21] Hassink G, Testa EA, Leumann A, et al. Intra- and inter-observer reliability of a new standardized diagnostic method using SPECT/CT in patients with osteochondral lesions of the ankle joint[J]. *BMC Med Imaging*, 2016, 16 (1) : 67. DOI: [10.1186/s12880-016-0169-1](https://doi.org/10.1186/s12880-016-0169-1).
- [22] Sung YG, Yoon H, Park DC, et al. Clinical usefulness of SPECT/CT for assessing postoperative outcomes after medial opening-wedge high tibial osteotomy[J]. *Orthop J Sports Med*, 2022, 10 (10) : 23259671221121083. DOI: [10.1177/23259671221121083](https://doi.org/10.1177/23259671221121083).
- [23] Kim MS, Koh IJ, Choi KY, et al. The minimal clinically important difference (MCID) for the WOMAC and factors related to achievement of the MCID after medial opening wedge high tibial osteotomy for knee osteoarthritis[J]. *Am J Sports Med*, 2021, 49 (9) : 2406-2415. DOI: [10.1177/03635465211016853](https://doi.org/10.1177/03635465211016853).
- [24] Hopwood S, Khan W, Agarwal S. The biplanar open wedge high tibial osteotomy preserving the tibial tubercle[J]. *J Orthop Sci*, 2016, 21 (6) : 786-790. DOI: [10.1016/j.jos.2016.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jos.2016.07.006).
- [25] Yao RZ, Liu WQ, Sun LZ, et al. Effectiveness of high tibial osteotomy with or without other procedures for medial compartment osteoarthritis of knee: an update meta-analysis[J]. *J Knee Surg*, 2021, 34 (9) : 952-961. DOI: [10.1055/s-0039-1700978](https://doi.org/10.1055/s-0039-1700978).
- [26] Lee H, Kim JH, Kang YK, et al. Quantitative single-photon emission computed tomography/computed tomography for technetium pertechnetate thyroid uptake measurement[J]. *Medicine*, 2016, 95 (27) : e4170. DOI: [10.1097/MD.0000000000004170](https://doi.org/10.1097/MD.0000000000004170).
- [27] Dong F, Li L, Bian YZ, et al. Standardized uptake value using thyroid quantitative SPECT/CT for the diagnosis and evaluation of Graves' disease: a prospective multicenter study[J]. *Biomed Res Int*, 2019, 2019: 7589853. DOI: [10.1155/2019/7589853](https://doi.org/10.1155/2019/7589853).
- [28] Shao FQ, Long Y, Chen XM, et al. SPECT/CT demonstrating ¹³¹I accumulation in gallbladder stone in a thyroid cancer patient[J]. *Clin Nucl Med*, 2020, 45 (3) : 244-245. DOI: [10.1097/RLU.0000000000002875](https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000002875).