

· 综述 ·

MRI 与核素显像在间充质干细胞体内示踪中的应用与挑战

杨预祺 王思宇

云南省第一人民医院(昆明理工大学附属医院)核医学科,昆明 650032

通信作者:王思宇, Email: Siyu_Wang_YN@outlook.com

【摘要】 间充质干细胞(MSCs)因其广阔的治疗前景,已成为再生医学与临床转化研究的前沿领域。明确其在体内的迁移、归巢等动态行为,是评估其治疗效果的关键环节。然而,目前用于示踪 MSCs 的技术体系复杂多样,标记方法尚缺乏统一标准。该文系统综述 MRI、SPECT 及 PET 在 MSCs 体内迁移、归巢、存活、分化及功能整合的全程示踪与评价中的研究进展与应用策略。

【关键词】 间质干细胞;体层摄影术,发射型计算机,单光子;正电子发射断层显像术;磁共振成像;发展趋势

基金项目:云南省科技厅-昆明医科大学应用基础研究联合专项基金(202401AY070001-250)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20251121-00426

Applications and challenges of MRI and radionuclide imaging for *in vivo* tracking of mesenchymal stem cells

Yang Yuqi, Wang Siyu

Department of Nuclear Medicine, the First People's Hospital of Yunnan Province, Affiliated Hospital of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, China

Corresponding author: Wang Siyu, Email: Siyu_Wang_YN@outlook.com

【Abstract】 Mesenchymal stem cells (MSCs), recognized for their broad therapeutic potential, have emerged as a leading area of investigation in regenerative medicine and clinical translation research. Accurately delineating their dynamic *in vivo* behaviors—such as migration and homing—is essential for evaluating treatment efficacy. However, current technologies for tracking MSCs *in vivo* involve complex and diverse systems, and labeling methods have yet to be standardized. This review systematically summarizes recent advances and application strategies in MRI, SPECT, and PET in the whole-process tracking and evaluation of the migration, homing, survival, differentiation, and functional integration of mesenchymal stem cells *in vivo*.

【Key words】 Mesenchymal stem cells; Tomography, emission-computed, single-photon; Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging; Trends

Fund program: Yunnan Provincial Science and Technology Department-Kunming Medical University Basic Research Joint Special Fund (202401AY070001-250)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20251121-00426

间充质干细胞(mesenchymal stem cells, MSCs)治疗在再生医学领域展现出巨大潜力,但其临床转化很大程度上取决于移植细胞在体内的生物学行为,包括其迁移、归巢与长期存活能力^[1-2]。然而,临床转化过程中如何实时并可视化评估 MSCs 的体内动态行为,仍是当前面临的技术挑战。传统组织学方法属于有创性检查,难以动态观察全身 MSCs 分布情况;荧光标记穿透力差,适用于较为表浅的器官或是小动物实验,难以对人体深部器官的 MSCs 示踪,这促使基于影像学示踪 MSCs 技术成为优化治疗方案的理想选择。

本文系统梳理 MRI 对比剂标记与 SPECT、PET 核素标记 MSCs 的最新进展,重点讨论超顺磁性氧化铁纳米颗粒(superparamagnetic iron oxide nanoparticles, SPIONs)、钆对比剂以及¹¹¹In、⁹⁹Tc^m、¹²⁵I、⁶⁴Cu、⁶⁸Ga 和⁸⁹Zr 等核素标记方案的优势与局限性,总结临床转化面临的关键瓶颈,并对未来技术发展进行展望,以期对相关研究提供理论依据与参考。

一、MRI 在 MSCs 体内示踪中的应用

MRI 凭借其高软组织分辨率($\mu\text{m}\sim\text{mm}$ 级)、无电离辐射

等优势,成为 MSCs 体内长期示踪的重要工具。其示踪方案主要依赖于顺磁性对比剂对细胞进行标记,通过改变局部磁场产生信号变化,从而实现细胞可视化。目前常用的 MRI 对比剂主要包括 SPIONs、钆对比剂(表 1)。

1. SPIONs。SPIONs 是应用最广泛的 MSCs MRI 示踪剂,弛豫率高,低剂量即可在 T₂ 加权成像上产生显著信号降低,标记方法包括被动吞噬^[3-6]、转染剂辅助^[7-8]及表面功能化修饰^[9-11]。其核心优势为检测灵敏度高(可达单细胞水平)、技术成熟,可实现局部组织中 MSCs 的定位示踪;但局限性显著:信号衰减与出血、钙化等混淆,高质量浓度(>50 $\mu\text{g}/\text{ml}$)可能诱导铁死亡,且信号随细胞分裂而稀释^[12],目前研究重点侧向 MSCs 长期存活、分化及功能整合的全程监测。

2. 钆对比剂。钆对比剂通过缩短 T₁ 弛豫时间产生阳性信号对比,易于影像判读,标记策略包括纳米颗粒内吞^[7,13-14]、转染剂介导^[15]及自组装纳米簇^[16]。其优势为可实现双细胞示踪等局部交互监测^[14],且具备多模态潜力^[17],但灵敏度较低、需高胞内浓度,这给 MSCs 全身动态监测及移

植后长期存活与功能整合的示踪研究带来了挑战。

二、SPECT 显像在 MSCs 体内示踪中的应用

SPECT 作为临床常规核素显像手段,在 MSCs 示踪研究中具有独特价值。虽然其空间分辨率低于 MRI 和 PET,但凭借成本较低、临床普及度高等优势,特别适用于需要长期动态观察细胞全身分布的研究。SPECT 示踪常用核素包括¹¹¹In、⁹⁹Tc^m 和¹²⁵I,其特性如表 2 所示。

1. ¹¹¹In 标记。¹¹¹In-8-羟基喹啉(oxine)标记 MSCs 可实现高效稳定放射性示踪,48 h 细胞活性>95%,结合 SPECT 显像可清晰捕捉 MSCs 在肺、肝等器官的早期富集及向靶器官的迁移路径(如心肌梗死模型中向梗死心肌迁移),标记率>95%且不影响细胞活力^[18-19]。在归巢评价中,该标记方案显示 MSCs 向病变组织(如阿尔茨海默病)归巢率显著升高^[20]。存活周期评估显示,通过他达拉非预处理可延长 MSCs 存活至 1 个月以上,适配¹¹¹In 的中短期示踪特性^[19];示踪 MSCs 外泌体时,乙二胺四乙酸螯合¹¹¹In 标记的 MSCs 外泌体在小鼠体内主要聚集于肝、脾、肾,其分布与功能相关,乙二胺四乙酸螯合游离¹¹¹In 可提升准确性^[21]。该核素标记无显像深度限制、灵敏度高、临床转化潜力大,可联合多模态成像^[15]。

¹¹¹In 相较于⁹⁹Tc^m 难以获取,在 PET 逐渐普及后,¹¹¹In 标记 MSCs 方案在近些年研究逐渐减少,未来需开发新型探针以同步解析细胞与微环境相互作用,并建立标准化标记方案及评价体系。

2. ⁹⁹Tc^m 标记。⁹⁹Tc^m 是临床核医学最常用的诊断性核素,因核素易获得、灵敏度较高等优势,⁹⁹Tc^m 标记成为 MSCs 全程示踪的优选方案。部分研究证实,⁹⁹Tc^m 标记 MSCs 能精准反映细胞体内分布特征,且不显著干扰细胞基本特性,为全程动态监测奠定了基础^[22]。体内迁移方面,经静脉注射的⁹⁹Tc^m 标记人脐带 MSC 外泌体(human umbilical cord MSC-derived exosomes, hUCMSC-Exos)主要富集于肝、脾,24 h 内保持稳定^[22];骨髓来源 MSCs 动脉输注后初期聚集于脑,随后向肝、脾、肾迁移,人源 MSCs 清除速度快于大鼠源^[23]。归巢方面, MSCs 可响应肿瘤趋化因子定向迁移,但不同来源

MSCs 归巢效率差异显著^[24]。存活周期上,⁹⁹Tc^m-hUCMSC-Exos 血循环半衰期快速分布相和消除相分别为(0.85±0.28) min 和(25.22±20.76) min,而牛奶来源外泌体的血半衰期为 3.84 min,提示细胞来源是影响存活周期的关键因素^[22]。功能发挥上, MSCs 在肝脏可维持 CD9、CD63 表达,且 CD63 表达显著上调^[22],但分化效率的影响研究证据不足。

目前⁹⁹Tc^m 标记 MSCs 的不足:标记方法效率与稳定性差异未明^[22];缺乏 MSCs 与宿主神经环路整合的直接示踪证据,长期示踪可能存在脱标偏差^[15]。未来需优化标记方案,聚焦细胞来源、给药途径及微环境的调控机制,为临床转化提供支撑。

3. ¹²⁵I 标记。¹²⁵I 标记的 MSCs 在下咽癌模型中,1 h 即可检测到肿瘤部位显像剂浓聚,证实其靶向迁移能力^[25]。在脑缺血模型中,¹²⁵I 标记的 MSCs 移植后,可连续示踪 7 d 内的细胞分布^[26]。该技术还能揭示 MSCs 存活周期与影响因素,如含体积分数 10% 胎牛血清的培养体系可延长¹²⁵I 标记 MSCs 的体外碘摄取时长至 8 h 以上^[25],而原卟啉钴的缓释可提升缺血脑内 MSCs 存活率^[26]。此外,¹²⁵I 标记结合报告基因,可关联 MSCs 分化与功能发挥,如在胶质母细胞瘤模型中,通过¹²⁵I 示踪发现 MSCs 移植后 10 d 在肿瘤与肺组织达分布峰值,17 d 为最佳治疗时间窗^[27]。

¹²⁵I 标记示踪技术突破了传统方法的局限,实现了 MSCs 体内全程动态可视化,但仍存在辐射、长期示踪稳定性等问题。未来需优化标记策略以降低细胞损伤,进一步阐明 MSCs 定向分化调控机制及与宿主微环境的相互作用,为临床转化提供更精准的依据。

三、PET 显像在 MSCs 体内示踪中的应用

PET 技术基于正电子核素湮灭辐射原理,凭借其卓越的灵敏度和精准的定量能力,在 MSCs 动态示踪领域展现出独特价值。随着新型正电子核素的开发与应用,PET 显像为 MSCs 的体内示踪提供了有力工具。目前常用的 MSCs 标记正电子核素包括⁶⁴Cu、⁶⁸Ga 和⁸⁹Zr,其特性如表 3 所示。

1. ⁶⁴Cu、⁶⁸Ga 标记。⁶⁴Cu 半衰期 12.7 h,适合中短期示踪,其与*N*-甲基硫代氨基酸结合可实现 MSCs 高效标记,优化浓

表 1 MRI 用于 MSCs 标记的常用对比剂特性比较

对比剂	成像原理	灵敏度	主要优势	局限性
SPIONs	引起 T ₂ /T ₂ [*] 弛豫时间缩短	高(可达单细胞水平)	弛豫率高,检测灵敏度高;技术成熟	信号特异性不足易误判,高浓度存毒性,信号随细胞分裂稀释影响长期监测
钆对比剂	引起 T ₁ 弛豫时间缩短	中等	阳性对比,易于解读;部分材料具备多模态潜力	弛豫率低需高胞内浓度,钆离子长期蓄积有安全风险,限制临床转化

注:MSCs 为间充质干细胞,SPIONs 为超顺磁性氧化铁纳米颗粒

表 2 SPECT 用于 MSCs 标记的常用核素特性比较

核素	半衰期	主要 γ 射线能量(keV)	标记机制	主要优势	局限性
¹¹¹ In	67.3 h	171, 245	脂溶性螯合物被动跨膜,胞内结合	半衰期适中,适合中短期示踪	分辨率低,脱标记与假阳性现象影响示踪结果可靠性
⁹⁹ Tc ^m	6 h	140	直接标记或基因转染法	来源广泛,成本低;图像质量好	半衰期短,仅能覆盖短期示踪,无法满足长期监测需求
¹²⁵ I	59.4 d	27~35	直接标记或基因转染法	半衰期长,适合长期示踪研究	γ 射线穿透力弱致灵敏度不足,长期辐射可能损伤细胞与机体

表 3 PET 用于间充质干细胞(MSCs)标记的常用核素特性比较

核素	半衰期	标记机制	主要优势	局限性
⁶⁴ Cu	12.7 h	直接标记或螯合剂标记	适合 24~48 h 短期动态观察	半衰期有限,无法捕捉细胞长期存活、分化及功能整合过程
⁶⁸ Ga	68 min	螯合剂标记	发生器制备,来源便利	显像时间受限,仅能监测早期即时分布,动态示踪不完整
⁸⁹ Zr	78.4 h	⁸⁹ Zr-oxine 胞内滞留	可实现长达 2 周的动态监测	辐射剂量累积影响安全性,肝、脾部位易出现非特异性信号干扰

注:oxine 为 8-羟基喹啉

度下不影响细胞活力与分化潜能,能精准监测细胞迁移路径与归巢特异性。⁶⁸Ga 半衰期 68 min,适用于短期示踪,通过 oxine 标记 MSCs,结合铁螯合剂可减少游离核素干扰,提升示踪准确性,为评估细胞早期存活与即时归巢效率提供支持^[28]。这两类核素标记均能覆盖 MSCs 体内全程链条;迁移过程中可示踪细胞从注射部位向靶器官的转运规律;归巢监测中能验证其对损伤组织的靶向性;存活周期评估可揭示微环境对细胞存续的影响;分化与功能示踪则助力解析细胞定向分化效率及旁分泌等作用路径^[28-29]。但现有研究仍存在争议,如不同标记方式对细胞功能的潜在影响、长期示踪稳定性等。未来需进一步优化标记策略,结合多模态成像技术,实现对 MSCs 与宿主组织整合模式的精准动态评估。

2. ⁸⁹Zr 标记。⁸⁹Zr 以其 78.4 h 的半衰期成为实现长期动态示踪的理想核素^[30]。研究证实,以每 2.2 MBq ⁸⁹Zr-oxine 标记 1×10⁶ MSCs 的方案,可在不影响 MSCs 形态、增殖及分化能力的前提下,实现高效稳定标记^[31],标记后 7 d 细胞放射性滞留率仍达 66.7%^[32]。⁸⁹Zr 标记结合 PET/CT 显像,清晰揭示了 MSCs 体内全程动态:尾静脉注射后初始富集于肺,随后迁移至肝、脾并长期滞留^[31-32],证明迁移规律在不同疾病模型中具有一致性^[28]。在归巢特异性监测中,⁸⁹Zr 示踪发现 MSCs 对损伤组织的靶向性依赖其表面标志物表达,而铁螯合剂去铁胺的联合使用可减少游离核素干扰,可有效提升归巢信号辨识度^[28]。存活周期方面,示踪结果显示 MSCs 在正常大鼠体内存活超过 10 d,而疾病微环境可进一步延长其存活时间^[15,31]。分化监测中,⁸⁹Zr 标记对于 MSCs 成脂、成骨分化潜能影响较小,结合特异性标志物检测可实现分化效率评估^[31]。

上述正电子核素标记方案仍存在短板:如肝、脾部位信号可能源于细胞碎片而非活细胞^[31],且缺乏与宿主神经环路整合的直接示踪证据。未来需优化标记方案降低放射性流出率,开发特异性引物联合实时荧光定量 PCR 验证^[31],并拓展至大动物模型,为临床转化提供更可靠的全程示踪方案^[28,32]。

四、展望

MSCs 体内示踪技术虽已形成 MRI 与 SPECT、PET 核素显像为主导的体系,但临床转化仍面临多模态融合缺乏标准、探针毒性与信号稳定性不足、数据解读依赖经验等核心挑战。未来,多模态融合将成为核心突破方向,需开发兼具低毒性与多信号响应的多功能纳米探针,整合 MRI 高空间分辨率与 PET 高灵敏度优势,通过时空配准算法实现“解剖-功能-代谢”一体化监测,并建立多中心标准化流程。人工智能技术的深度融入将重构数据解读模式,借助深度学习实现细胞迁移轨迹自动识别与动力学参数量化,通过机器学习构建疗效预测模型,推动示踪从“被动监测”升级为“主动导航”。同时,基因编码与纳米技术的协同创新将解决假阳性与信号

稀释问题。通过跨学科协作,有望建立高精度、高实用的示踪体系,推动再生医学从经验性治疗迈向精准化导航治疗,为细胞治疗临床转化提供关键支撑。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 杨预祺:论文撰写;王思宇:论文修改、经费支持

参 考 文 献

[1] 何佳慧,刘建兴,金亮.间充质干细胞在癌症治疗中应用和挑战[J].沈阳药科大学学报, 2025, 42(1): 34-41. DOI:10.14066/j.cnki.cn21-1349/r.2024.0056.
He JH, Liu JX, Jin L. Progress of mesenchymal stem cells in cancer treatment[J]. J Shenyang Pharm Univ, 2025, 42(1): 34-41. DOI:10.14066/j.cnki.cn21-1349/r.2024.0056.

[2] Augustine R, Gezek M, Nikolopoulos VK, et al. Stem cells in bone tissue engineering: progress, promises and challenges[J]. Stem Cell Rev Rep, 2024, 20(7): 1692-1731. DOI:10.1007/s12015-024-10738-y.

[3] Wu MR, Lee CH, Hsiao JK. Bidirectional enhancement of cell proliferation between iron oxide nanoparticle-labeled mesenchymal stem cells and choroid plexus in a cell-based therapy model of ischemic stroke[J]. Int J Nanomedicine, 2020, 15: 9181-9195. DOI:10.2147/IJN.S278687.

[4] Sheu JJ, Sung PH, Wallace CG, et al. Intravenous administration of iPS-MSCSPIONs mobilized into CKD parenchyma and effectively preserved residual renal function in CKD rat[J]. J Cell Mol Med, 2020, 24(6): 3593-3610. DOI:10.1111/jcmm.15050.

[5] Huang DM, Lu CW, Hsiao JK. Transplanted iron oxide nanoparticle-labeled mesenchymal stem cells exhibit *ex vivo* neuronal firing activity in ischemic stroke rats[J]. Int J Nanomedicine, 2025, 20: 10469-10486. DOI:10.2147/IJN.S518933.

[6] Schmehl J, Stoll H, Danalache M, et al. Intravascular application of labelled cell spheroids: an approach for ischemic peripheral artery disease[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(13): 6831. DOI:10.3390/ijms22136831.

[7] Moonshi SS, Wu Y, Ta HT. Visualizing stem cells *in vivo* using magnetic resonance imaging[J]. Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol, 2022, 14(2): e1760. DOI:10.1002/wnan.1760.

[8] Wei N, Chen X, Liu D, et al. A multi-modality imaging strategy to determine the multiple *in vivo* fates of human umbilical cord mesenchymal stem cells at different periods of acute liver injury treatment[J]. J Mater Chem B, 2024, 12(37): 9213-9228. DOI:10.1039/d4tb00914b.

[9] Andersen C, Uvebrant K, Mori Y, et al. Human integrin $\alpha_{10}\beta_1$ -selected mesenchymal stem cells home to cartilage defects in the rabbit knee and assume a chondrocyte-like phenotype[J]. Stem Cell Res Ther, 2022, 13(1): 206. DOI:10.1186/s13287-022-02884-2.

[10] Liu T, Zhu Y, Zhao R, et al. Visualization of exosomes from mesenchymal stem cells *in vivo* by magnetic resonance imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2020, 68: 75-82. DOI:10.1016/j.mri.2020.02.001.

- [11] Wang Y, Lv Y, Li Y, et al. Ferromagnetic vortex iron oxide nanorings modified with integrin $\beta 1$ antibody for targeted MRI tracking of human mesenchymal stem cells[J]. J Biomed Nanotechnol, 2022, 18(4): 1044-1051. DOI:10.1166/jbn.2022.3319.
- [12] Pan Y, Li J, Wang J, et al. Ferroptotic MSCs protect mice against sepsis via promoting macrophage efferocytosis[J]. Cell Death Dis, 2022, 13(9): 825. DOI:10.1038/s41419-022-05264-z.
- [13] Mohseni M, Shojaei S, Mehravi B, et al. Natural polymeric nanoparticles as a non-invasive probe for mesenchymal stem cell labelling[J]. Artif Cells Nanomed Biotechnol, 2020, 48(1): 770-776. DOI:10.1080/21691401.2020.1748641.
- [14] Kalubowilage M, Bossmann SH. Magnetic resonance imaging of single cells[J]. Methods Mol Biol, 2020, 2126: 95-106. DOI:10.1007/978-1-0716-0364-2_9.
- [15] 高皓玥, 薛文婷, 吴世满. 间充质干细胞活体无创示踪技术研究进展[J]. 生命科学, 2023, 35(2): 233-240. DOI:10.13376/j.cbbs/2023030.
Gao HY, Xue WT, Wu SM. Research progress of noninvasive tracing technique for mesenchymal stem cells *in vivo*[J]. Chin Bull Life Sci, 2023, 35(2): 233-240. DOI:10.13376/j.cbbs/2023030.
- [16] Zhang P, Zhang Y, Li B, et al. Cell-assembled nanoclusters of MSC-targeting Gd-DOTA-peptide as a T2 contrast agent for MRI cell tracking[J]. J Pept Sci, 2018, 24(4-5): e3077. DOI:10.1002/psc.3077.
- [17] Chetty SS, Praneetha S, Vadivel Murugan A, et al. Human umbilical cord Wharton's Jelly-derived mesenchymal stem cells labeled with Mn^{2+} and Gd^{3+} co-doped $CuInS_2$ -ZnS nanocrystals for multimodality imaging in a tumor mice model[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(3): 3415-3429. DOI:10.1021/acsami.9b19054.
- [18] Sier VQ, de Vries MR, van der Vorst JR, et al. Cell-based tracers as trojan horses for image-guided surgery[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(2): 755. DOI:10.3390/ijms22020755.
- [19] Elmadbouh I, Ashraf M. Tadalafil, a long acting phosphodiesterase inhibitor, promotes bone marrow stem cell survival and their homing into ischemic myocardium for cardiac repair[J]. Physiol Rep, 2017, 5(21): e13480. DOI:10.14814/phy2.13480.
- [20] Park BN, Lim TS, Yoon JK, et al. *In vivo* tracking of intravenously injected mesenchymal stem cells in an Alzheimer's animal model[J]. Cell Transplant, 2018, 27(8): 1203-1209. DOI:10.1177/0963689718788067.
- [21] Lu CH, Chen YA, Ke CC, et al. Preclinical characterization and *in vivo* imaging of ^{111}In -labeled mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles[J]. Mol Imaging Biol, 2021, 23(3): 361-371. DOI:10.1007/s11307-020-01562-0.
- [22] Chung YH, Ho YP, Farn SS, et al. *In vivo* SPECT imaging of $Tc-99m$ radiolabeled exosomes from human umbilical-cord derived mesenchymal stem cells in small animals[J]. Biomed J, 2024, 47(5): 100721. DOI:10.1016/j.bj.2024.100721.
- [23] Khabbal J, Kerkelä E, Mitkari B, et al. Differential clearance of rat and human bone marrow-derived mesenchymal stem cells from the brain after intra-arterial infusion in rats[J]. Cell Transplant, 2015, 24(5): 819-828. DOI:10.3727/096368914X679336.
- [24] Belmar-Lopez C, Mendoza G, Oberg D, et al. Tissue-derived mesenchymal stromal cells used as vehicles for anti-tumor therapy exert different *in vivo* effects on migration capacity and tumor growth[J]. BMC Med, 2013, 11: 139. DOI:10.1186/1741-7015-11-139.
- [25] Wang J, Kong D, Zhu L, et al. Human bone marrow mesenchymal stem cells modified hybrid baculovirus-adenoviral vectors targeting ^{131}I therapy of hypopharyngeal carcinoma[J]. Hum Gene Ther, 2020, 31(23-24): 1300-1311. DOI:10.1089/hum.2020.081.
- [26] Yao M, Shi X, Zuo C, et al. Engineering of SPECT/photoacoustic imaging/antioxidative stress triple-function nanoprobe for advanced mesenchymal stem cell therapy of cerebral ischemia[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(34): 37885-37895. DOI:10.1021/acsami.0c10500.
- [27] Shi S, Zhang M, Guo R, et al. Bone marrow-derived mesenchymal stem cell-mediated dual-gene therapy for glioblastoma[J]. Hum Gene Ther, 2019, 30(1): 106-117. DOI:10.1089/hum.2018.092.
- [28] 徐倩. 铁螯合剂药物再利用以改善追踪放射性金属 oxine 标记细胞移植的 PET 成像[D]. 南京: 南京医科大学, 2024. DOI:10.27249/d.cnki.gnjyu.2024.000562.
Xu Q. Repurposing iron chelators for accurate positron emission tomography imaging tracking of radiometal-labeled cell transplants[D]. Nanjing: Nanjing Med University, 2024. DOI:10.27249/d.cnki.gnjyu.2024.000562.
- [29] 朱可. 导电水凝胶联合间充质干细胞植入治疗心肌梗死及 PET/CT 无创监控[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.003788.
Zhu K. Conductive nanocomposite hydrogel and mesenchymal stem cells for the treatment of myocardial infarction and non-invasive monitoring via PET/CT[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. DOI:10.27249/d.cnki.ghzku.2022.003788.
- [30] 王辛宇, 刘青峰, 刘宇航, 等. ^{89}Zr 标记间充质干细胞的制备及对系统性红斑狼疮小鼠的 PET 监测[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(2): 106-110. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20211126-00419.
Wang XY, Liu QF, Liu YH, et al. Preparation of ^{89}Zr -labeled mesenchymal stem cells and PET monitoring in mice with systemic lupus erythematosus[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 43(2): 106-110. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20211126-00419.
- [31] 王舒哲. ^{89}Zr 标记人骨髓间充质干细胞移植后在 SD 大鼠体内的活体示踪研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2022. DOI:10.27715/d.cnki.gshgj.2022.000056.
Wang SZ. *In vivo* tracing of ^{89}Zr -labeled human bone marrow-derived mesenchymal stem cells after transplantation in SD rats[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2022. DOI:10.27715/d.cnki.gshgj.2022.000056.
- [32] Wang S, Wang Y, Xu B, et al. Biodistribution of ^{89}Zr -oxine-labeled human bone marrow-derived mesenchymal stem cells by micro-PET/computed tomography imaging in Sprague-Dawley rats[J]. Nucl Med Commun, 2022, 43(7): 834-846. DOI:10.1097/MNM.0000000000001562.

(收稿日期: 2025-11-21)