

PET/MR 在分化型甲状腺癌中的研究进展

罗莹莹, 王海岩, 赵军

(同济大学附属东方医院核医学科, 上海 200120)

【摘要】放射性碘主要用于分化型甲状腺癌(differentiated thyroid cancer, DTC)的治疗。¹⁸F-FDG PET/CT 作为有效的诊断工具,是放射性碘扫描的有益补充。PET/MR 是一种新型的显像技术,可为 DTC 患者诊断、治疗或病情评估提供帮助。本文主要综述了目前几种可用放射性药物(包括¹⁸F-FDG、¹²⁴I、¹⁸F-TFB 和⁶⁸Ga-PSMA 在内的多种示踪剂)的物理、生物学特性及其与最先进技术相结合对于 DTC 患者的诊断、治疗和随访的作用。

【关键词】分化型甲状腺癌; PET/MR; 示踪剂

【中图分类号】R736.1 **【文献标志码】**A **【文章编号】**2097-4345(2025)01-0119-06

Research progress of PET/MR in differentiated thyroid cancer

LUO Yingying, WANG Haiyan, ZHAO Jun

(Department of Nuclear Medicine, Shanghai East Hospital, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200120, China)

【Abstract】Radioactive iodine is used mostly in treating differentiated thyroid cancer(DTC) with a therapeutic intent, while PET/CT with ¹⁸F-FDG emerges as a useful tool in the diagnostic management and complements the use of radioactive iodine. The PET/MR imaging may provide a new imaging technique for the diagnosis, treatment or disease assessment of the DTC. This article mainly reviews the physical and biological characteristics of several currently available radiopharmaceuticals(including various tracers such as ¹⁸F-FDG, ¹²⁴I, ¹⁸F-TFB and ⁶⁸Ga-PSMA), and their combination with the most advanced technology provides new possibilities for the diagnosis, treatment and follow-up of DTC patients.

【Key words】differentiated thyroid cancer; PET/MR; tracer

甲状腺癌(thyroid cancer, TC)有4种组织学类型:包括最常见的甲状腺乳头状癌(papillary thyroid carcinoma, PTC)、甲状腺滤泡癌(follicular thyroid carcinoma, FTC)、甲状腺髓样癌(medullary thyroid carcinoma, MTC)以及未分化癌(anaplastic thyroid cancer, ATC)。根据世界卫生组织国际癌症研究机构的GLOBOCAN 2020癌症发病率和死亡率数据库显示,TC在全球癌症发病率中位居第九位,女性约占所有TC患者的75%。TC是16~33岁青少年和成年人最常见的恶性肿瘤,大多数TC(>80%)的死亡和复

发风险较低^[1-2]。2022年,国家癌症中心发布最新统计数据显示^[3],中国TC新发病例数为20.3万例,其中女性患者按世界标准人口年龄标准化发病率为15.81/10万,位居女性恶性肿瘤发病率第三位。

TC较常发生颈部淋巴结转移,其次为肺和骨骼转移,其他器官(如大脑和肝脏)较少受累。目前,不到5%的TC患者发生远处转移,且多发生在高危患者中^[4-5]。局部晚期/复发、转移性进展期碘难治性分化型甲状腺癌(radioactive iodine-refractory differentiated thyroid cancer, RAI-R-DTC)、MTC和

收稿日期:2024-03-04 录用日期:2024-06-01

基金项目:上海市浦东新区卫生系统学科建设重点学科(PWZxk2022-12)

作者简介:罗莹莹(1993—),女,硕士研究生,E-mail:13294655192@163.com

通信作者:王海岩,Email:13816707601@163.com

©同济大学(开放获取CC BY-NC-ND协议)

ATC 是 TC 特异性死亡的主要原因。功能成像是定位残留 TC 病灶的灵敏工具,也可以提供预后信息。原发灶伴 BRAF 基因突变的患者术后残留/复发转移性淋巴结多表现为 FDG 代谢增高而¹³¹I 摄取不佳^[6]。肿瘤灶中放射性碘(radioactive iodine, RAI)的摄取与较好的预后有关,PET/CT 或 PET/MR 上 FDG 的摄取可能与肿瘤的侵袭性有关^[5]。另有研究表明,¹⁸F-FDG PET/MR 显像对甲状腺球蛋白(thyroglobulin, Tg)阳性而¹³¹I 全身显像(¹³¹I whole-body imaging, ¹³¹I-WBS)阴性的分化型甲状腺癌(differentiated thyroid cancer, DTC)患者复发或转移诊断的灵敏度、特异度、精确度均较高^[7-8],因此越来越多的团队开始尝试使用 PET/MR 成像来评估 DTC 患者^[9-11]。本文综述 PET/MR 在 DTC 中的相关进展,为 DTC 患者诊疗提供新的机会。

1 ¹⁸F-PDG PET/MR 成像技术

2015 年,ATA 指南推荐对血清 Tg 升高(一般>10 ng/mL)且 RAI 成像阴性的高危患者应考虑使用¹⁸F-FDG PET/CT 进行扫描,以便更好地管理晚期疾病患者并评估对治疗的反应。¹⁸F-FDG 是最常用的 PET 放射性示踪剂,用于代谢表征、复发检测、分期和治疗反应评估,特别是在侵袭性较强或分化程度较低的肿瘤中,它通过葡萄糖转运蛋白(glucose transporters, GLUT)被细胞捕获,在侵袭性分化和去分化甲状腺肿瘤中,GLUT 基因表达增加,引起己糖激酶-1 过度表达,促进 DTC 细胞摄取 FDG,并且与促甲状腺激素水平相关。目前的证据表明,¹⁸F-FDG PET/CT 可作为检测去分化 TC 局部和远处转移性疾病的可靠诊断工具^[12-13]。PET/MR 成像是一种新兴的成像方式,结合了 MRI 独特的组织特征与 PET 的代谢成像能力,从而优于其他成像方式。与 PET/CT 相比,PET/MR 具有许多潜在的优势。由于 MRI 不使用电离辐射,全身 FDG PET/MR 的有效辐射剂量比 FDG PET/CT 低 70%~80%^[14],有利于癌症患者持续监测治疗进展;MRI 和 PET 数据的采集同时进行,减少了患者在采集之间运动的伪影,从而实现 PET 和 MRI 数据集的高精度空间共配准。PET/MR 更有希望用于以 MRI 为首选解剖成像方式的疾病的局部区域分期。前期研究显示,PET/MR 在脑、肝脏和骨骼的转移病灶检测上具有更高的准确性^[15-16]。PET/MR 在评估头颈部肿瘤、妇科恶性肿瘤、乳腺癌、前列腺癌和膀胱癌患

者治疗反应和预后方面有较高的准确性。在前列腺癌中,PET/MR 也可用于指导靶向活检和局灶治疗。因此,PET/MR 联合应用可能有助于诊断 DTC。

2 ¹⁸F-PDG PET/MR 在 DTC 中的研究

由于 PET/MR 是一种相对较新的成像方式,使用¹⁸F-FDG 或¹²⁴I 作为示踪剂评估 DTC 患者 PET/MR 的研究仍在不断更新(表 1)。

2.1 PET/MR 在识别局部淋巴结转移中的诊断价值

Song 等^[9]对¹⁸F-FDG PET/MR 与 PET/CT 两种显像技术的临床价值进行了对比,得出结论:与 PET/CT 相比,PET/MR 对于综合治疗后 DTC 患者局部区域颈部淋巴结复发转移病灶的检出率更高,且诊断灵敏性和准确性更高,尤其对检测中心性淋巴结转移有很高的特异性;但是对于检测出的同一病灶来说,PET/MR 和 PET/CT 测量所得出的标准摄取值(standard uptake value, SUV)值和病灶的直径是一致的,且二者具有显著的相关性。此外,PET/MR 在追踪 PET 转移淋巴结病灶的形态学相关性方面优于 PET/CT^[17]。对于<10 mm 的转移淋巴结病变,PET/MR 提高了诊断的确定性。

2.2 PET/MR 在 Tg 高水平或 Tg 阳性、¹³¹I-WBS 显像阴性患者中的诊断价值

¹⁸F-FDG PET 显像对血清 Tg 水平升高的 DTC 患者有较高的诊断准确性。Klain 等^[7]的研究指出,与 PET/CT 成像相比,PET/MR 并没有更好的优势。但是 Binse 等^[18]的研究却显示,PET/MR 在检测 DTC 碘阳性病变方面优于 PET/CT。Li 等^[8]采用¹⁸F-FDG PET/MR 在 Tg 水平升高但¹³¹I-WBS 扫描阴性的 DTC 患者中分析复发或转移性病灶的诊断效果,结果显示,在所研究的 29 例患者中,18 例患者的¹⁸F-FDG PET/MR 为真阳性,¹⁸F-FDG PET/MR 阳性和¹⁸F-FDG PET/MR 阴性患者间的血清 Tg 水平差异有统计学意义($P=0.04$),PET/MR 显像阳性组患者 Tg 水平高于阴性组。该研究进一步发现,2.4 ng/mL 的 Tg 是预测¹⁸F-FDG PET/MR 检测复发或转移病灶结果的最佳临界值,与 Tg 水平较低的患者相比,PET/MR 对于 Tg 水平>2.4 ng/mL 的复发或转移病灶具有更高的灵敏度和特异性。根据¹⁸F-FDG PET/MR 对复发或转移性病灶的检测结果,其中 7 名患者(24.1%)的临床治疗方案发生了改变。

表 1 PET/MR 在 DTC 中的研究
Tab. 1 The study of PET/MR in differentiated thyroid cancer

文献	研究设计	TC 类型	示踪剂	临床应用领域	研究结果
Klain 等 ^[7] , 2020	前瞻性研究	DTC	¹⁸ F-FDG	初步诊断、反应评估和复发检测	PET/MR 阳性 11 例, PET/CT 阳性 10 例; PET/MR 检出病灶 33 个, PET/CT 检出病灶 30 个; PET/MR 与 PET/CT 成像提供了相似的信息; FDG PET 研究对血清 Tg 水平升高的 DTC 患者诊断准确性高
Li 等 ^[8] , 2021	回顾性研究	DTC	¹⁸ F-FDG	疾病监测、反应评估和复发检测	PET/MR 对 Tg 水平 > 2.4 ng/mL 的 DTC 诊断灵敏度和特异性更高
Song 等 ^[9] , 2021	回顾性研究	DTC	¹⁸ F-FDG	疾病监测、反应评估和复发检测	与 PET/CT 相比, PET/MR 的检出率 (91.5% vs 80.8%)、图像显著性 (2.74 ± 0.60 vs 1.9 ± 0.50, P < 0.001) 和灵敏度 (80.5% vs 61.0%) 均优于 PET/CT; PET/MR 在判断复发和转移性病变方面都更准确
Jentzen 等 ^[10] , 2018	回顾性研究	TC	¹²⁴ I	治疗方案	基于 PET/MR 的 ¹²⁴ I 活性浓度有助于 TC 颈部病变治疗前剂量的确定
Nagarajah 等 ^[17] , 2011	回顾性研究	DTC	¹²⁴ I	疾病监测和反应评估	PET/MR 在追踪 PET 病灶形态学方面优于 PET/CT
Binse 等 ^[18] , 2016	回顾性研究	DTC	¹²⁴ I	疾病监测和反应评估	颈部 PET/MR 在检测 DTC 碘阳性病变方面优于 PET/CT
Vrachimis 等 ^[19] , 2016	回顾性研究	DTC	¹⁸ F-FDG	疾病监测和反应评估	对于颈部病变的评估, ¹⁸ F-FDG PET/MR 与增强颈部 ¹⁸ F-FDG PET/CT 相同
Vrachimis 等 ^[20] , 2016	前瞻性研究	RAIR-DTC	⁶⁸ Ga-DOTATATE	疾病监测、反应评估和复发检测	¹⁸ F-FDG PET/CT、 ⁶⁸ Ga-DOTATATE PET/MR 和 DWI 的总体病变检出率分别为 79/85 (93%)、69/85 (81%) 和 27/82 (33%)

2.3 PET/MR 在局部晚期或高危 DTC 的诊断、分期中的价值

Vrachimis 等^[19] 在一项评估 ¹⁸F-FDG PET/MR 与 ¹⁸F-FDG PET/CT 对去分化甲状腺癌患者的诊断效能的研究中发现, 96% 的去分化甲状腺癌患者均能被 PET/CT 和 PET/MR 正确识别, 但是 PET/MR 对肺转移的评估不像预期的那样灵敏。随后, Vrachimis 等^[20] 进行了另一项研究, 证明了 ¹⁸F-FDG PET/CT 在评估 RAIR-DTC 方面比 ⁶⁸Ga-DOTATATE PET/MR 更灵敏, 而在肺外病变的评估中, ⁶⁸Ga-DOTATATE PET/MR 更灵敏, 但 ¹⁸F-FDG PET/CT 更特异。MRI 的弥散加权成像 (diffusion weighted imaging, DWI) 序列不能取代 ¹⁸F-FDG PET/CT 用于疑似 RAIR-DTC 患者的术后监测。在临床实践中, ⁶⁸Ga-DOTATATE PET/MR 可以用于确定符合肽受体放射性核素治疗 (例如使用 ¹⁷⁷Lu-DOTATATE 进行治疗) 条件的 RAIR-DTC 患者, 或者其可作为 ¹⁸F-FDG PET/CT 的补充, 在 ¹⁸F-FDG PET/CT 诊断为阴性时来完成疾病分期, 或者用于可能需要改变治疗方法的其他病灶的确定。

2.4 联合显像技术的应用

与 ¹⁸F-FDG PET/CT 相比, 无论是从患者角度还是从病变角度, PET/MR 在确定复发和转移性病变方面更准确。相关研究建议: 在全身 PET/CT 检查后,

增加局部 PET/MR, 可以提供更精确的诊断信息和手术切除范围, 且这种联合显像技术也无需接受到额外的电离辐射^[9]。Wen 等^[21] 发现, ¹⁸F-FDG PET/低剂量 CT 和 MRI 是互补的成像方式, 应二者结合使用以提高高危 TC 患者局部复发和淋巴结转移的检出率。Hempel 等^[22] 评估了 ¹⁸F-FDG PET/低剂量 CT 和 MRI 联合使用来检测 Tg 水平升高、超声和 ¹³¹I-WBS 均为阴性的患者局部复发和远处转移的诊断效果, 发现了这两种诊断方式的协同作用, 建议对高危 DTC 患者采用 ¹⁸F-FDG PET/低剂量 CT 和 MRI 联合使用的诊断方法。由于 MRI 检查对肺部病灶检测具有一定的局限性, 因此有研究建议 PET/MR 联合肺部 CT 平扫以提高肺部病变的检出率。混合 PET/MR 成像可能有潜力改善一种模式与另一种模式的信息含量, 并为 DTC 患者提供新的机会。

3 其他示踪剂在 DTC 中的研究

尽管 FDG 在肿瘤成像中取得了成功, 但对 DTC 的价值有限, 因此需要其他肿瘤特异性 PET 标记物来满足临床需求。几种有前途的 PET 示踪剂目前正在临床前和临床肿瘤学试验中开发和评估。目前, TC 的 PET 示踪研究主要集中于 ¹²⁴I 和 ⁶⁸Ga 前列腺特异性膜抗原 (⁶⁸Ga prostate-specific membrane antigen, ⁶⁸Ga-PSMA), 多用于 DTC 的诊断和分期 (表 2)。

表 2 其他示踪剂在 DTC 中的研究
Tab. 2 The study of other tracers in differentiated thyroid cancer

文献	TC 类型	示踪剂	研究结果
Binse 等 ^[18] ,2016	DTC	¹²⁴ I	¹²⁴ I PET/MR 在检测 DTC 碘阳性病变方面优于 PET/CT
Grafe 等 ^[23] ,2022	DTC	¹²⁴ I	与 PET/CT 相比,PET/MR 中的 PET 采集显示出更高的灵敏度,PET/MR 检测到的 ¹²⁴ I 活动性病变总数更高
Nagarajah 等 ^[24] ,2017	RAIR-DTC	¹²⁴ I	¹²⁴ I PET 能够量化 RAIR-DTC 患者使用曲美替尼进行再分化治疗后 NIS 表达的增加
张召奇等 ^[25] ,2023; Verma 等 ^[26] ,2021	DTC	⁶⁸ Ga-PSMA	⁶⁸ Ga-PSMA PET/CT 在 DTC 转移灶诊断方面优于 ¹³¹ I SPECT/CT,并且能够对 ¹⁸ F-FDG PET/CT 在 DTC 诊断方面进行有益补充
Santhanam 等 ^[27] ,2020	RAIR-DTC	¹⁸ F-DCFPyL PSMA	¹⁸ F-DCFPyL PSMA PET/CT 有助于 RAIR-DTC 转移灶的检出
De Vries 等 ^[28] ,2020	RAIR-DTC	¹⁷⁷ Lu-PSMA 617	¹⁷⁷ Lu-PSMA 617 能够检测出 RAIR-DTC 中不摄取 ¹⁸ F-FDG 的病灶
Sammick 等 ^[29] ,2018	DTC	¹⁸ F-TFB	¹⁸ F-TFB PET/CT 检测到 DTC 局部复发或转移的患者明显多于 ¹³¹ I dxWBS/SPECT-CT
吴骥等 ^[30] ,2022; Fu 等 ^[31] ,2022	DTC	⁶⁸ Ga-FAPI	⁶⁸ Ga-FAPI PET/CT 在识别转移性 DTC,尤其是淋巴结和肺转移灶方面优于 ¹⁸ F-FDG PET/CT
王俊等 ^[33] ,2023	DTC	⁶⁸ Ga-NODAGA-RGD	⁶⁸ Ga-NODAGA-RGD PET/CT 可以有效反映肿瘤新生血管情况,可在早期预测酪氨酸激酶抑制剂疗效,从而为远处转移 DTC 患者 TKI 治疗提供影像证据

¹²⁴I 是 TC 诊疗的首选示踪核素,主要用于高危和复发性 TC 患者。¹²⁴I PET/CT 对转移灶的检测灵敏度较高,证实了¹²⁴I PET/CT 对 DTC 患者分期的较高价值。Binse 等^[18]的研究证实了¹²⁴I PET/MR 在检测颈部碘阳性病变方面优于¹²⁴I PET/CT。另一项关于甲状腺切除术后 DTC 肿瘤患者¹²⁴I PET/CT 和 PET/MR 之间的定性和定量差异的研究显示,与 PET/CT 相比,PET/MR 中的 PET 采集显示出更高的灵敏度,PET/MR 检测到的¹²⁴I 活动性病变总数更高^[23]。Nagarajah 等^[24]的研究显示,¹²⁴I PET 能够量化 RAIR-DTC 患者在使用曲美替尼进行再分化治疗后钠碘同向转运体(sodium iodide symporter, NIS)表达的增加。

PSMA 是一种在前列腺癌细胞中高度表达的跨膜糖蛋白受体,其在 TC 新生血管中呈高表达。PSMA 在 DTC 转移灶中以及碘难治性病灶中有更高的表达率及表达量。DTC 病灶高表达 PSMA 提示病变侵袭性强,预后不良。多项研究显示,⁶⁸Ga-PSMA PET/CT 在 DTC 转移灶诊断方面优于¹³¹I SPECT/CT,并且能够对¹⁸F-FDG PET/CT 诊断 DTC 进行有益补充^[25-26]。也有研究显示,¹⁸F-DCFPyL PSMA PET/CT 有助于 RAIR-DTC 转移灶的检出^[27]。¹⁷⁷Lu-PSMA 617 同样能够检测出 RAIR-DTC 中不摄取¹⁸F-FDG 的病灶^[28],不过其在 DTC 中应用价值有待进一步证实。

¹⁸F-四氟硼酸盐(¹⁸F tetrafluoroborate, ¹⁸F-TFB)

是碘的类似物,可用于对表达 NIS 的细胞成像。研究显示,¹⁸F-TFB PET/CT 检测到 DTC 局部复发或转移的患者明显多于¹³¹I dxWBS/SPECT-CT^[29]。目前¹⁸F-TFB 已被用于 DTC 患者的原发分期。

成纤维细胞激活蛋白抑制剂(fibroblast activation protein inhibitor, FAPI)具有半衰期短、放射性低及清除速度快等优势。研究^[30-31]显示,在 35 例 DTC 患者中,⁶⁸Ga-FAPI 衍生的最大标准化摄取值(maximum standardized intake value, SUVmax)比¹⁸F-FDG 衍生的 SUVmax 在转移侧(6.0:3.5, $P=0.001$)、腋窝(8.5:4.3, $P=0.01$)、纵隔淋巴结(9.1:5.0, $P=0.001$)和肺转移(1.7:1.1, $P=0.004$)均更高;⁶⁸Ga-FAPI PET/CT 比¹⁸F-FDG PET 识别颈部病变[83%(65/78),95%CI: 73%~90%;65%(51/78),95%CI: 54%~75%, $P=0.01$]以及识别远处转移[79%(87/110),95%CI: 71%~86%;59%(65/110),95%CI: 50%~68%, $P<0.001$]的灵敏度更高,因此⁶⁸Ga-FAPI PET/CT 在识别转移性 DTC,尤其是淋巴结和肺转移灶方面优于¹⁸F-FDG PET/CT,但由于研究样本量的限制,该结果仍需进一步验证。兰晓丽教授^[32]的综述指出:多项基于小-中样本的“头对头”前瞻性临床报告发现,FAPI PET 可能在乳腺癌、肝癌、胰腺癌、胃癌、结直肠癌、肺腺癌、卵巢癌、腹膜癌、肉瘤等的原发和(或)转移病灶的诊断效能高于¹⁸F-FDG PET,在胶质瘤、甲状腺癌、鼻咽癌、淋巴瘤、多发性骨髓瘤等肿瘤中的诊断对比价值可能相近或低

于¹⁸F-FDG PET。⁶⁸Ga-环(L-精氨酸甘氨酸-L-α-天冬氨酸-D-酪氨酸-N6-((4,7-双(羧甲基)-1,4,7-三唑-1-基)乙酰基))-L-赖氨酸(NODAGA-RGD) PET/CT能有效反映肿瘤新生血管情况,可早期预测酪氨酸激酶抑制剂(tyrosine kinase inhibitor, TKI)疗效,为远处转移DTC患者TKI治疗提供有力的影像证据^[33]。这些新的示踪剂可以帮助患者在治疗前进行更好的分期,从而制定更好的靶向计划。此外,这些新的生物标志物也有助于更好地评估治疗反应。

4 总结与展望

综上所述,笔者建议在以下几种情况下,推荐使用PET/MR显像,如检测DTC碘阳性病变、治疗前评估颈部淋巴结、治疗后评估颈部淋巴结复发转移(尤其是中心性淋巴结转移)、检测Tg水平升高(尤其是>2.4 ng/mL)但¹³¹I-WBS扫描阴性的复发或转移性病灶;对于RAIR-DTC肺转移的评估目前不推荐使用PET/MR;而对于肺外病变的评估,推荐使用⁶⁸Ga-DOTATATE PET/MR检查。

尽管目前关于PET/MR成像在DTC患者中应用的文献相对有限,但初步数据表明,PET/MR多模态显像实现了解剖影像与分子代谢的强强联合,具有较好的诊断效能,可对DTC患者¹³¹I-WBS的扫描结果提供补充资料,有助于疾病的初始分期、再分期、治疗方案的选择以及随访评估。

利益冲突声明 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献说明 罗莹莹: 论文撰写;王海岩、赵军: 研究指导、论文审核。

【参考文献】

[1] CHEN D W, LANG B H H, MCLEOD D S A, et al. Thyroid cancer[J]. *Lancet*, 2023,401(10387): 1531-1544.

[2] PIZZATO M, LI M M, VIGNAT J, et al. The epidemiological landscape of thyroid cancer worldwide: GLOBOCAN estimates for incidence and mortality rates in 2020[J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2022, 10(4): 264-272.

[3] ZHENG R, ZHANG S, ZENG H, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2016[J]. *J Natl Cancer Cent*, 2022,2(1): 1-9.

[4] SIMÕES-PEREIRA J, MOURINHO N, FERREIRA T C, et al. Avidity and outcomes of radioiodine therapy for distant metastasis of distinct types of differentiated thyroid cancer[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2021,106(10): e3911-e3922.

[5] AVRAM A M, ZUKOTYNSKI K, NADEL H R, et al. Management of differentiated thyroid cancer: the standard of care[J]. *J Nucl Med*, 2022,63(2): 189-195.

[6] 蒋永继,刘思敏,霍艳雷,等. DTC术后残留/复发转移性淋巴结¹⁸F-FDG和¹³¹I代谢与临床病理和¹³¹I疗效的相关性[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2023,44(3): 387-393.

[7] KLAIN M, NAPPI C, NICOLAI E, et al. Comparison of simultaneous ¹⁸F-FDG PET/MR and PET/CT in the follow-up of patients with differentiated thyroid cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020,47(13): 3066-3073.

[8] LI H Y, CHEN X M, ZHANG Y J, et al. Value of ¹⁸F-FDG hybrid PET/MR in differentiated thyroid cancer patients with negative ¹³¹I whole-body scan and elevated thyroglobulin levels[J]. *Cancer Manag Res*, 2021,13: 2869-2876.

[9] SONG Y, LIU F, RUAN W W, et al. Head-to-head comparison of neck ¹⁸F-FDG PET/MR and PET/CT in the diagnosis of differentiated thyroid carcinoma patients after comprehensive treatment [J]. *Cancers*, 2021,13(14): 3436.

[10] JENTZEN W, PHAOSRICHARON J, GOMEZ B, et al. Quantitative performance of ¹²⁴I PET/MR of neck lesions in thyroid cancer patients using ¹²⁴I PET/CT as reference[J]. *EJNMMI Phys*, 2018,5(1): 13.

[11] 程欣玮,赵军. PET/MR与PET/CT在肿瘤中的临床应用对比研究进展[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2023,43(6): 377-381.

[12] PICCARDO A, TRIMBOLI P, FOPPIANI L, et al. PET/CT in thyroid nodule and differentiated thyroid cancer patients. The evidence-based state of the art [J]. *Rev Endocr Metab Disord*, 2019,20(1): 47-64.

[13] LEBBINK C A, DE VRIES L H, BOREL RINKES I H M, et al. FDG PET/CT in differentiated thyroid cancer patients with low thyroglobulin levels[J]. *Eur J Endocrinol*, 2022,187(1): 101-110.

[14] MARTIN O, SCHAARSCHMIDT B M, KIRCHNER J, et al. PET/MRI versus PET/CT for whole-body staging: results from a single-center observational study on 1 003 sequential examinations [J]. *J Nucl Med*, 2020,61(8): 1131-1136.

- [15] WEBER W. Clinical PET/MR [J]. *Recent Results Cancer Res*, 2020,216: 747-764.
- [16] MORSING A, HILDEBRANDT M G, VILSTRUP M H, et al. Hybrid PET/MRI in major cancers: a scoping review [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46(10): 2138-2151.
- [17] NAGARAJAH J, JENTZEN W, HARTUNG V, et al. Diagnosis and dosimetry in differentiated thyroid carcinoma using ^{124}I PET: comparison of PET/MRI vs PET/CT of the neck [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2011,38(10): 1862-1868.
- [18] BINSE I, POEPEL T D, RUHLMANN M, et al. Imaging with ^{124}I in differentiated thyroid carcinoma: is PET/MRI superior to PET/CT? [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016,43(6): 1011-1017.
- [19] VRACHIMIS A, BURG M C, WENNING C, et al. [^{18}F] FDG PET/CT outperforms [^{18}F] FDG PET/MRI in differentiated thyroid cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016,43(2): 212-220.
- [20] VRACHIMIS A, STEGGER L, WENNING C, et al. [^{68}Ga] dotatate PET/MRI and [^{18}F] FDG PET/CT are complementary and superior to diffusion-weighted mr imaging for radioactive-iodine-refractory differentiated thyroid cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016,43(10): 1765-1772.
- [21] WEN X Z, WANG B, JIN Q M, et al. Thyroid antibody status is associated with central lymph node metastases in papillary thyroid carcinoma patients with Hashimoto's thyroiditis [J]. *Ann Surg Oncol*, 2019,26(6): 1751-1758.
- [22] HEMPEL J M, KLOECKNER R, KRICK S, et al. Impact of combined FDG-PET/CT and MRI on the detection of local recurrence and nodal metastases in thyroid cancer [J]. *Cancer Imaging*, 2016,16(1): 37.
- [23] GRAFE H, LINDEMANN M E, WEBER M, et al. Intra-individual comparison of ^{124}I -PET/CT and ^{124}I -PET/MR hybrid imaging of patients with resected differentiated thyroid carcinoma: aspects of attenuation correction [J]. *Cancers*, 2022,14(13): 3040.
- [24] NAGARAJAH J, JANSSEN M, HETKAMP P, et al. Iodine symporter targeting with $^{124}\text{I}/^{131}\text{I}$ theranostics [J]. *J Nucl Med*, 2017,58(Suppl 2): 34S-38S.
- [25] 张召奇,赵新明. $^{68}\text{Ga}/^{18}\text{F}$ 标记 PSMA 在非前列腺癌肿瘤诊疗中的应用进展 [J]. *肿瘤影像学*, 2023, 32(3): 213-225.
- [26] VERMA P, MALHOTRA G, MESHARAM V, et al. Prostate-specific membrane antigen expression in patients with differentiated thyroid cancer with thyroglobulin elevation and negative iodine scintigraphy using ^{68}Ga -PSMA-HBED-CC PET/CT [J]. *Clin Nucl Med*, 2021,46(8): e406-e409.
- [27] SANTHANAM P, RUSSELL J, ROOPER L M, et al. The prostate-specific membrane antigen (PSMA)-targeted radiotracer ^{18}F -DCFPyL detects tumor neovasculature in metastatic, advanced, radioiodine-refractory, differentiated thyroid cancer [J]. *Med Oncol*, 2020,37(11): 98.
- [28] DE VRIES L H, LODEWIJK L, BRAAT A J A T, et al. ^{68}Ga -PSMA PET/CT in radioactive iodine-refractory differentiated thyroid cancer and first treatment results with ^{177}Lu -PSMA-617 [J]. *EJNMMI Res*, 2020, 10(1): 18.
- [29] SAMNICK S, AL-MOMANI E, SCHMID J S, et al. Initial clinical investigation of ^{18}F tetrafluoroborate PET/CT in comparison to ^{124}I iodine PET/CT for imaging thyroid cancer [J]. *Clin Nucl Med*, 2018,43(3): 162-167.
- [30] 吴骥,张春银. ^{18}F -FDG 与 ^{68}Ga -FAPI PET/CT 诊断分化型甲状腺癌甲状腺全切术后转移 [J]. *中国医学影像技术*, 2022,38(9): 1316-1321.
- [31] FU H, WU J, HUANG J X, 等. ^{68}Ga -FAPI PET/CT 检测转移性甲状腺癌: 与 ^{18}F -FDG PET/CT 比较 [J]. *国际医学放射学杂志*, 2022,45(5): 607-608.
- [32] 兰晓莉. FAPI: 构建核医学肿瘤诊疗一体化的新篇章 [J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2023,43(6): 321-324.
- [33] 王俊,付晶晶,唐潇伟,等. ^{68}Ga -NODAGA-RGD PET/CT 预测酪氨酸激酶抑制剂治疗远处转移性分化型甲状腺癌短期疗效的研究 [J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2023,43(8): 459-464.