

全身 PET: 从三维影像诊断到四维空间对疾病的系统评价

石洪成^{1,2}

¹复旦大学附属中山医院核医学科、上海市影像医学研究所、复旦大学核医学研究所, 上海 200032; ²复旦大学附属中山医院厦门医院核医学科, 厦门 361015

Email: shi.hongcheng@zs-hospital.sh.cn

基金项目: 工业和信息化部攻关项目 (CEIEC-2022-ZM02-0219); 上海市经济与信息化委员会创新医疗器械应用示范项目 (23SHS01200); 2024 年高端医疗装备推广应用项目 (2024TGYY06)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20260614-00207

Total-body PET: paradigm shift from 3D spatial tomographic diagnosis to 4D time-resolved imaging for integrated systemic disease assessment

Shi Hongcheng^{1,2}

¹Department of Nuclear Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University; Shanghai Institution of Medical Imaging; Nuclear Medicine Institute of Fudan University, Shanghai 200032, China; ²Department of Nuclear Medicine, Zhongshan Hospital Xiamen Branch, Fudan University, Xiamen 361015, China

Email: shi.hongcheng@zs-hospital.sh.cn

Fund program: Key Program of Ministry of Industry and Information Technology of China (CEIEC-2022-ZM02-0219); Innovative Medical Device Application Demonstration Program of Shanghai Municipal Commission of Economy and Informatization (23SHS01200); National High-End Medical Equipment Popularization and Application Project 2024 (2024TGYY06)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20260614-00207

全球首台具有 194 cm 轴向视野的全身 PET 于 2019 年 4 月在复旦大学附属中山医院投入使用^[1], 不仅实现了一个床位采集全身影像, 计数率更达到轴向视野 22 cm 常规 PET 的 40 倍^[2]。经过不断的探索与验证, 该技术在临床实践中已逐步实现低剂量 PET 显像^[3]、PET 快速显像^[4]和全身实时动态显像^[5-6], PET 影像的临床应用范围随之拓展^[7]。随着临床证据的持续积累, 长轴向视野 PET 已成为发展的新趋势。目前, 根据轴向视野, 将 PET 分为常规 PET (<35 cm)、长轴 PET (>100 cm) 和全身 PET (>188 cm)^[8], 长轴 PET 在肿瘤等常见病诊疗中的操作规范和指南也已建立^[9-10]。尽管如此, 全身 PET 的临床应用场景仍在持续探索与扩展中。本期全身 PET 临床应用重点号的 3 篇文章, 分别从术前分期精细化、治疗安全性监测和显像方案优化 3 个维度, 分享了全身 PET 在临床实践中的独特价值。

在肿瘤层面, 动态 PET 参数能否比传统静态参数提供更多信息, 是临床关注的重点之一。赵晓雯等^[11]纳入 64 例拟行手术治疗的非小细胞肺癌 (non-small cell lung cancer, NSCLC) 患者, 通过术前 60 min ¹⁸F-FDG 全身 PET 动态采集重建获得 K_i 参数图和 SUV 图, 探讨原发肿瘤与免疫器官动态参数

对淋巴结转移风险的预测价值。结果显示, 靶本比 (target-to-background ratio, TBR) - K_i 是预测 NSCLC 淋巴结转移的独立因素, 其预测效能优于静态 SUV_{mean} ; 在原发肿瘤 TBR- K_i 基础上联合脾脏和骨髓 K_i , 预测效率进一步提升, 联合模型 AUC 达 0.857。这表明, K_i 参数在淋巴结转移风险评估中具有独立价值, 联合免疫器官参数后能为临床提供更丰富的信息。不过, 该研究虽验证了动态 K_i 显像较静态采集的增量获益, 但未进一步探索 K_i 参数在不同肿瘤负荷或更广泛临床分期中的分层价值, 后续可在此基础上做更深入的对比分析。

从诊断延伸到治疗安全性监测, 全身 PET 的全身覆盖优势在新型抗肿瘤治疗评价中展现出独特潜力。免疫检查点抑制剂等治疗手段已广泛应用, 治疗相关不良反应的及时监测与有效处理, 也成为临床关注的重点。唐文鑫等^[12]利用全身 PET 灵敏度高的优势, 对 33 例可切除高危复发风险的肝内胆管癌患者实施了超低剂量 (0.37 MBq/kg; 常规剂量的 1/10) ¹⁸F-FDG PET/CT 显像, 监测其程序性死亡受体 1 (programmed cell death-1, PD-1) 单克隆抗体治疗过程中的免疫相关器官炎性反应。结果显示, 81.8% (27/33) 的患者发生治疗相关炎性反应, 主要累及胃

肠道、甲状腺及淋巴结等;全身 PET/CT 还在 15.2% (5/33) 的患者中发现额外炎性反应灶。这一结果表明,超低剂量条件下全身 PET 仍能获得可靠的全身影像,为短时间内多次检查监测不良反应提供了可能;全身显像覆盖范围广,也为系统性评价治疗引起的多器官变化创造了条件。但该研究仅关注不良反应监测,未同步分析患者接受 PD-1 治疗的实际获益,对于治疗决策的参考价值因此有所受限。

除了¹⁸F-FDG,新型靶向探针与全身 PET 动态采集的结合也为显像时间优化提供了新思路。陈若华等^[13]回顾性分析 4 例胃癌和 8 例胰腺癌患者注射⁶⁸Ga-成纤维细胞激活蛋白抑制剂(fibroblast activation protein inhibitor, FAPI)-04 后 60 min 内的全身动态 PET/CT 数据,重点观察降主动脉(血池本底)、靶病灶和正常器官的显像剂分布时相变化。结果显示,注射后 60 min,病灶与本底比值达峰值,是胃癌和胰腺癌患者较合适的显像时间。通过全身 PET 动态采集获得全身多器官及靶病灶的多时相连续分布特征,较常规 PET 多时间点、非连续采集的对比方式更为简便、客观。该研究的局限在于采集时间仅覆盖注射后 60 min,缺乏更长时窗的信息,且样本量较小、仅纳入胃癌和胰腺癌 2 种肿瘤类型,结果外推性受限。

上述 3 篇文章从不同侧面呈现了全身 PET 的临床价值,其中 2 项研究基于全身 PET 动态采集,通过时间维度挖掘了常规静态显像难以获取的信息;另 1 项研究则依托全身 PET 的高灵敏度,以超低剂量实现了全身静态显像,拓展了显像的适用场景。三者共同表明,全身 PET 无论是动态采集还是低剂量静态应用,均为疾病的精准诊疗提供了更多可能,即动态采集将三维空间影像融入时间要素,形成信息量更丰富的四维时空影像^[14],可获得全身多器官多时相连续信息;低剂量全身显像则为多次随访、长期监测创造了条件^[5,15-16]。这些功能是目前其他影像学方法难以实现的。

展望未来,全身 PET 影像蕴含的信息远未被充分挖掘。随着人工智能及相关技术的进步,更多潜在信息将被提取和应用,如在放射性药物药代动力学研究^[17]、辐射剂量学研究^[18]、药效学研究^[19]等领域的优势已初步显现。相信随着临床证据的持续积累和技术的进一步成熟,全身 PET 将在疾病诊疗及相关领域研究中发挥更为重要的作用。

利益冲突 作者声明无利益冲突

作者贡献声明 石洪成:文献调研、论文撰写

参 考 文 献

- [1] Sui X, Liu G, Hu P, et al. Total-body PET/computed tomography highlights in clinical practice: experiences from Zhongshan Hospital, Fudan University[J]. PET Clin, 2021, 16(1): 9-14. DOI: 10.1016/j.cpet.2020.09.007.
- [2] Badawi RD, Shi H, Hu P, et al. First human imaging studies with the EXPLORER total-body PET scanner[J]. J Nucl Med, 2019, 60(3): 299-303. DOI:10.2967/jnumed.119.226498.
- [3] Hu Y, Liu G, Yu H, et al. Feasibility of acquisitions using total-body PET/CT with an ultra-low ¹⁸F-FDG activity[J]. J Nucl Med, 2022, 63(6): 959-965. DOI:10.2967/jnumed.121.262038.
- [4] Hu P, Zhang Y, Yu H, et al. Total-body ¹⁸F-FDG PET/CT scan in oncology patients; how fast could it be? [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(8): 2384-2394. DOI: 10.1007/s00259-021-05357-5.
- [5] Liu G, Gu T, Chen S, et al. Total-body dynamic PET/CT imaging reveals kinetic distribution of [¹³N]NH₃ in normal organs[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 51(13): 3888-3899. DOI: 10.1007/s00259-024-06826-3.
- [6] 蔡丹杰,石洪成.全身 PET/CT 临床研究的现况与展望[J].中华核医学与分子影像杂志, 2022, 42(1): 41-43. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20210209-00031.
Cai DJ, Shi HC. Total-body PET/CT current research and future perspectives[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 42(1): 41-43. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20210209-00031.
- [7] Gao H, Tang H, Zheng Z, et al. One-stop ⁶⁸Ga-FAPI/¹⁸F-FDG total-body PET/CT scan; more theranostics information available [J]. Clin Nucl Med, 2025, 50(5): e253-e261. DOI: 10.1097/RLU.0000000000005673.
- [8] Mingels C, Caobelli F, Alavi A, et al. Total-body PET/CT or LAFOV PET/CT? Axial field-of-view clinical classification [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 51(4): 951-953. DOI: 10.1007/s00259-023-06534-4.
- [9] Yu H, Gu Y, Fan W, et al. Expert consensus on oncological [¹⁸F] FDG total-body PET/CT imaging (version 1) [J]. Eur Radiol, 2023, 33(1): 615-626. DOI: 10.1007/s00330-022-08960-8.
- [10] Liu G, Gu Y, Sollini M, et al. Expert consensus on workflow of PET/CT with long axial field-of-view[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 52(3): 1038-1049. DOI: 10.1007/s00259-024-06968-4.
- [11] 赵晓雯,程文悦,夏梓豪,等.基于全身动态 PET 参数与免疫器官代谢特征预测非小细胞肺癌淋巴结转移的研究[J].中华核医学与分子影像杂志, 2026, 46(7): 388-394. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20251229-00468.
Zhao XW, Cheng WY, Xia ZH, et al. Study on predicting lymph node metastasis in non-small cell lung cancer based on total-body dynamic PET parameters and immune organ metabolic characteristics[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2026, 46(7): 388-394. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20251229-00468.
- [12] 唐文鑫,谢赞泽,张礼超,等.¹⁸F-FDG 全身 PET/CT 在胆管癌患者免疫治疗相关炎性反应监测中的应用[J].中华核医学与分子影像杂志, 2026, 46(7): 395-400. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250926-00343.
Tang WX, Xie YZ, Zhang LC, et al. Application of ¹⁸F-FDG total-body PET/CT in monitoring immunotherapy-induced organ inflammation in patients with cholangiocarcinoma[J]. Chin J Nucl

- Med Mol Imaging, 2026, 46(7): 395-400. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250926-00343.
- [13] 陈若华,陈翹楚,王成,等.胃癌和胰腺癌患者⁶⁸Ga-FAPI-04 全身动态 PET/CT 摄取动力学及显像时间优化[J].中华核医学与分子影像杂志, 2026, 46(7): 401-405. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20260409-00107.
- Chen RH, Chen QC, Wang C, et al. Dynamic uptake kinetics and imaging time optimization of ⁶⁸Ga-FAPI-04 total-body PET/CT in gastric and pancreatic cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2026, 46(7): 401-405. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20260409-00107.
- [14] 陈若华,刘建军,黄钢.分子影像从静态到动态:开创全身四维时空分子影像时代[J].中华核医学与分子影像杂志, 2022, 42(12): 705-707. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20221101-00328.
- Chen RH, Liu JJ, Huang G. From static to dynamic molecular imaging: inaugurating the era of total-body molecular imaging with four-dimensional spatiotemporal[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 42(12): 705-707. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20221101-00328.
- [15] Tang Y, Xie Y, Gu T, et al. How organs react under fasting or glucose-insulin status; a self-controlled study using ¹⁸F-FDG total-body PET/CT[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2026, in press. DOI:10.1007/s00259-026-07924-0.
- [16] Sun L, Wu Y, Sun T, et al. Influence of diabetes mellitus on metabolic networks in lung cancer patients: an analysis using dynamic total-body PET/CT imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 52(6): 2145-2156. DOI:10.1007/s00259-025-07081-w.
- [17] Liu G, Xu H, Lv J, et al. Detailed pharmacokinetic features of a novel bis-boron ¹⁸F-trifluoroborate acid in healthy volunteers: comparable and additional values of total-body PET-imaging-derived analysis[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2026, in press. DOI:10.1007/s00259-026-08004-z.
- [18] Hu P, Lin X, Zhuo W, et al. Internal dosimetry in F-18 FDG PET examinations based on long-time-measured organ activities using total-body PET/CT: does it make any difference from a short-time measurement? [J]. EJNMMI Phys, 2021, 8(1): 51. DOI:10.1186/s40658-021-00395-2.
- [19] Xie Y, Tang W, Zhang L, et al. A hybrid curve-fitting method for radiation dosimetry evaluation and simultaneous multi-organ biodistribution assessment in total-body dynamic PET/CT: application to a novel PD-L1-targeted tracer[J]. EJNMMI Phys, 2025, 13(1): 15. DOI:10.1186/s40658-025-00828-2.
- (收稿日期:2026-06-14)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

2026 年本刊可直接用缩写的常用词汇

ATP(adenosine-triphosphate),三磷酸腺苷

AUC(area under curve),曲线下面积

CI(confidence interval),可信区间

CT(computed tomography),计算机体层摄影术

CV(coefficient of variation),变异系数

DNA(deoxyribonucleic acid),脱氧核糖核酸

FDG(fluorodeoxyglucose),脱氧葡萄糖

HAV(hepatitis A virus),甲型肝炎病毒

Hb(hemoglobin),血红蛋白

HBsAg(hepatitis B surface antigen),乙型肝炎表面抗原

HBV(hepatitis B virus),乙型肝炎病毒

HCV(hepatitis C virus),丙型肝炎病毒

MRI(magnetic resonance imaging),磁共振成像

PBS(phosphate buffered solution),磷酸盐缓冲液

PCR(polymerase chain reaction),聚合酶链反应

PET(positron emission tomography),正电子发射体层摄影术

PLT(platelet count),血小板计数

RBC(red blood cells),红细胞

RNA(ribonucleic acid),核糖核酸

ROC(receiver operating characteristic),受试者工作特征

ROI(region of interest),感兴趣区

SPECT(single photon emission computed tomography),单光子发射计算机体层摄影术

SUV(standardized uptake value),标准摄取值

SUV_{max}(maximum standardized uptake value),最大标准摄取值

SUV_{mean}(mean standardized uptake value),平均标准摄取值

WBC(white blood cells),白细胞

WHO(World Health Organization),世界卫生组织

本刊编辑部