# 不同呼吸状态下<sup>18</sup>F-FDG PET/CT贝叶斯 正则化似然算法对肺结节半定量 参数的影响

薛伟,杨光杰,刘万亮,李 奔,焦孟章,王振光\*

青岛大学附属医院PET中心,山东 青岛

收稿日期: 2025年3月1日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月2日

# 摘要

目的:探讨贝叶斯正则化似然(BPL)重建算法在不同呼吸状态下对<sup>18</sup>F-FDG PET/CT肺结节半定量参数的影 响。方法:回顾性分析2022年6月至2022年10月间于青岛大学附属医院行<sup>18</sup>F-FDG PET/CT全身扫描的108 例患者,共计139个肺结节。采用自由呼吸OSEM、自由呼吸BPL、屏气OSEM和屏气BPL重建算法对肺结节 PET图像进行重建,比较组间最大标准摄取值(SUVmax)、平均标准摄取值(SUVmean)、峰值标准摄取值 (SUVpeak)、信号/本底比值(SBR)等半定量参数。组间差异采用Wilcoxon秩和检验比较分析。结果: 屏气 OSEM组重建后摄取代谢参数SUVmax、SUVmean、SUVpeak和SBR高于自由呼吸OSEM组,分别是4.65 (2.38, 7.47)和3.02 (1.67, 5.61) (z = -9.53, p < 0.001)、2.71 (1.85, 3.56)和2.25 (1.36, 3.12) (z = -8.67, p <0.001)、2.65 (1.38, 5.52)和2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001)、3.02 (1.45, 5.32)和1.77 (1.01, 3.50) (z=-9.74, p<0.001)。屏气BPL组重建后摄取代谢参数SUVmax、SUVmean、SUVpeak和SBR高于自由呼 吸BPL组,分别是6.8 (3.51, 11.55)和4.45 (2.19, 7.31) (z = -9.99, p < 0.001)、3.42 (2.52, 4.91)和2.71 (1.68, 3.55) (z = -9.30, p < 0.001)、3.70 (2.07, 6.61)和2.69 (1.72, 5.27) (z = -9.30, p < 0.001)、4.44 (2.24, 7.61)和2.59 (1.28, 4.66) (z = -10.07, p < 0.001)。屏气和自由呼吸状态下的BPL组重建后摄取代谢 参数SUVmax、SUVmean、SUVpeak和SBR高于OSEM组,均p < 0.001。屏气BPL组对代谢参数(SUVmax、 SUVmean、SUVpeak和SBR)及其变化率(%ASUVmax、%ASUVmean、%ASUVpeak和%ASBR)的影响显 著大于自由呼吸BPL组(p < 0.001)。结论:屏气BPL重建算法通过减少呼吸运动伪影,显著提升了肺结节 PET图像的半定量参数值检出率,为肺结节的良恶性诊断提供了更精确的影像学依据。

#### 关键词

正电子发射断层显像,图像处理,18F脱氧葡萄糖

<sup>\*</sup>通讯作者。

**文章引用:** 薛伟,杨光杰,刘万亮,李奔,焦孟章,王振光.不同呼吸状态下<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 贝叶斯正则化似然算法对 肺结节半定量参数的影响[J].临床医学进展,2025,15(4):476-482.DOI:10.12677/acm.2025.154956

# The Impact of the Bayesian Regularization Likelihood Algorithm on the Semi-Quantitative Parameters of Pulmonary Nodules in <sup>18</sup>F-FDG PET/CT under Different Respiratory States

Wei Xue, Guangjie Yang, Wanliang Liu, Ben Li, Mengzhang Jiao, Zhenguang Wang\*

PET Center, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao Shandong

Received: Mar. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2025

#### Abstract

Objective: To investigate the impact of the Bayesian Penalized Likelihood (BPL) reconstruction algorithm on the semi-quantitative parameters of lung nodules in <sup>18</sup>F-FDG PET/CT under different respiratory states. Methods: A retrospective analysis was conducted on 108 patients with a total of 139 lung nodules who underwent <sup>18</sup>F-FDG PET/CT whole-body scans at the Affiliated Hospital of Qingdao University from June 2022 to October 2022. PET images of lung nodules were reconstructed using four algorithms: free-breathing OSEM, free-breathing BPL, breath-hold OSEM, and breath-hold BPL. The semi-quantitative parameters, including maximum standardized uptake value (SUVmax), mean standardized uptake value (SUVmean), peak standardized uptake value (SUVpeak), and signal-tobackground ratio (SBR), were compared among the groups. Intergroup differences were analyzed using the Wilcoxon rank-sum test. Results: The SUVmax, SUVmean, SUVpeak, and SBR values in the breath-hold OSEM group were higher than those in the free-breathing OSEM group, with values of 4.65 (2.38, 7.47) vs. 3.02 (1.67, 5.61) (z = -9.53, p < 0.001), 2.71 (1.85, 3.56) vs. 2.25 (1.36, 3.12) (z = -8.67, p < 0.001), 2.65 (1.38, 5.52) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001), and 3.02 (1.45, 1.26) vs. 2.05 (1.29, 1.26) vs5.32) vs. 1.77 (1.01, 3.50) (z = -9.74, p < 0.001), respectively. The SUVmax, SUVmean, SUVpeak, and SBR values in the breath-hold BPL group were higher than those in the free-breathing BPL group, with values of 6.8 (3.51, 11.55) vs. 4.45 (2.19, 7.31) (z = -9.99, p < 0.001), 3.42 (2.52, 4.91) vs. 2.71 (1.68, 3.55) (z = -9.30, p < 0.001), 3.70 (2.07, 6.61) vs. 2.69 (1.72, 5.27) (z = -9.30, p < 0.001), and 4.44 (2.24, 7.61) vs. 2.59 (1.28, 4.66) (z = -10.07, p < 0.001), respectively. The SUVmax, SUVmean, SUVpeak, and SBR values in the BPL groups were higher than those in the OSEM groups under both breath-hold and free-breathing conditions (all p < 0.001). The breath-hold BPL group had a significantly greater impact on the metabolic parameters (SUVmax, SUVmean, SUVpeak, and SBR) and their changes (%ΔSUVmax, %ΔSUVmean, %ΔSUVpeak, and %ΔSBR) compared to the free-breathing BPL group (p < 0.001). Conclusion: The breath-hold BPL reconstruction algorithm reduces respiratory motion artifacts, significantly enhancing the detection rate of semi-quantitative parameters in PET images of pulmonary nodules, thereby providing a more precise imaging basis for the diagnosis of their benign or malignant nature.

# **Keywords**

Positron Emission Tomography, Image Processing, <sup>18</sup>F-Fluorodeoxyglucose

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 显像技术已广泛应用于肺部结节的诊断定性、分期和疗效评估[1]。PET/CT 采集过程中的技术因素会影响 PET 图像质量和定量准确性,例如呼吸带来的脏器运动产生脏器及病灶伪影[2]。呼吸伤影使得 PET 图像质量下降,肺结节显示不清,量化不准确,严重影响肺结节的诊断和治疗计划的制订[3]。 有序子集最大期望值(Ordered Subsets Expectation Maximization, OSEM)算法广泛用于 PET 图像重建,但背景噪声会随迭代次数的增加而累加。有研究证明贝叶斯正则化似然(Bayesian penalized likelihood, BPL)重建算法,通过增加迭代次数,并引入基于相邻体素方差的噪声抑制功能,使得获得的半定量参数更为精确[4]。 研究中的屏气扫描是指对同一肺结节分别进行屏住呼吸 20 秒的 CT 扫描和 PET 采集,屏气扫描的目的在于消除呼吸运动对于 CT 图像和 PET 图像的影响。本研究通过对比 BPL 算法和 OSEM 算法在肺结节半定量参数的差异,进一步验证 BPL 算法对于提高肺结节半定量参数准确性的临床价值。

# 2. 资料与方法

#### 2.1. 研究对象

回顾性分析 2022 年 6 月至 2022 年 10 月在青岛大学附属医院 PET 中心行 <sup>18</sup>F-FDG PET/CT 全身扫描 和屏气扫描的患者 108 例(共 139 个肺结节)。

#### 2.2. 仪器与方法

检查前嘱患者至少空腹 6 小时以上, 空腹血糖小于 11.1 mmol/L。静脉注射 <sup>18</sup>F-FDG (放化纯大于 95%), 患者安静休息约 60 分钟后, 采用 GE DMI PET/CT 扫描仪,进行图像采集。分别采用 OSEM 组(点扩散函 数 + 飞行时间 +3 次迭代, 16 个子集, 6.4 mm 高斯滤波器)及 BPL 组(点扩散函数 + 飞行时间 + 正则化 算法,惩罚因子 β 为 450) 2 种算法重建图像。屏气扫描是指对同一肺结节分别进行屏住呼吸 20 秒的 CT 扫 描和 PET 采集,图像采集完成后进行 OSEM 和 BPL 重建,参数与自由呼吸采集后重建一致。两位经验丰 富的核医学诊断医师对不同的重建方法的 PET 图像进行视觉分析,对肺结节图像噪声、对比度和组织边缘 清晰度评分(1 分差、2 分一般、3 分良好、4 分很好和 5 分优秀)。

#### 2.3. 图像分析

采用 AW4.7 工作站对图像进行分析,将四种算法的重建 PET 分别同 CT 图像加载到 PETVCAR 软件 中,自动测量 ROI 代谢参数,包括最大标准摄取值(maximum standard uptake value, SUVmax)和平均标准 摄取值(mean standard uptake value, SUVmean)还有峰值标准摄取值(peak standard uptake value, SUVpeak)等 参数。在降主动脉测量直径为 1 cm 球形 ROI 的 SUVmean,计算信号/本底比值(signal to background ratio, SBR), SBR = 结节 SUVmax/降主动脉 SUVmean。不同算法间 SUV 变化率称为%ΔSUV,如屏气 BPL 和 自由呼吸 OSEM 间 SUVmax 变化率%ΔSUVmax = (屏气 BPL SUVmax – 自由呼吸 OSEM SUVmax)/自由 呼吸 OSEM SUVmax × 100%。

#### 2.4. 统计分析

采用 IBM SPSS27.0 统计软件进行数据分析,数据均不符合正态分布,以中位数[M(P25,P75)]表示不符

合正态分布的计量资料,行 Wilcoxon 秩和检验。用 Cohen's Kappa 分析 PET 图像的一致性。P < 0.05 为 差异有统计学意义。

#### 3. 结果

屏气 OSEM 组重建后摄取代谢参数 SUVmax、SUVmean、SUVpeak 和 SBR 高于自由呼吸 OSEM 组, 分别是 4.65 (2.38, 7.47)和 3.02 (1.67, 5.61) (z = -9.53, p < 0.001)、 2.71 (1.85, 3.56)和 2.25 (1.36, 3.12) (z = -8.67, p < 0.001)、 2.65 (1.38, 5.52)和 2.05 (1.29, 4.01) (z = -7.75, p < 0.001)、 3.02 (1.45, 5.32)和 1.77 (1.01, 3.50) (z = -9.74, p < 0.001)。 屏气 BPL 组重建后摄取代谢参数 SUVmax、SUVmean、SUVpeak 和 SBR 高于自由呼吸 BPL 组, 分别是 6.8 (3.51, 11.55)和 4.45 (2.19, 7.31) (z = -9.99, p < 0.001)、 3.42 (2.52, 4.91)和 2.71 (1.68, 3.55) (z = -9.30, p < 0.001)、 3.70 (2.07, 6.61)和 2.69 (1.72, 5.27) (z = -9.30, p < 0.001)、 4.44 (2.24, 7.61)和 2.59 (1.28, 4.66) (z = -10.07, p < 0.001), 见表 1。屏气和自由呼吸状态下的 BPL 组重建后摄取代谢参数 SUVmax、 SUVmean、SUVpeak 和 SBR 高于 OSEM 组,均 p < 0.001, 见表 2。屏气 BPL 在 SUVmax、SUVmean、 SUVpeak 和 SBR 等指标上明显优于自由呼吸 BPL, Z 值分别是-9.99、-9.3、-9.3、-10.07,均 p < 0.001, 屏气 BPL 组中%ΔSBR 变化最大,表明屏气采集能够显著提高图像的信噪比,利于提高图像质量和诊断准 确性;%ΔSUVmean 变化最小,因为 SUVmean 相对稳定,受呼吸运动的影响较小,见表 3。两位经验丰富 的核医学诊断医师对自由呼吸 OSEM、自由呼吸 BPL、屏气 OSEM 和屏气 BPL 重建算法的肺结节 PET 图 像视觉评分具有一致性(Kappa 值分别为: 0.658、0.723、0.745、和 0.813,均 p < 0.05)。

业合具会数		OSEM			BPL			
十止里参奴 -	自由呼吸	屏气	z 值	р	自由呼吸	屏气	z 值	р
SUVmax	3.02 (1.67, 5.61)	4.65 (2.38, 7.47)	-9.53	< 0.001	4.45 (2.19, 7.31)	6.8 (3.51, 11.55)	-9.99	<0.001
SUVmean	2.25 (1.36, 3.12)	2.71 (1.85, 3.56)	-8.67	< 0.001	2.71 (1.68, 3.55)	3.42 (2.52, 4.91)	-9.30	< 0.001
SUVpeak	2.05 (1.29, 4.01)	2.65 (1.38, 5.52)	-7.75	< 0.001	2.69 (1.72, 5.27)	3.70 (2.07, 6.61)	-9.30	< 0.001
SBR	1.77 (1.01, 3.50)	3.02 (1.45, 5.32)	-9.74	< 0.001	2.59 (1.28, 4.66)	4.44 (2.24, 7.61)	-10.07	< 0.001

Table 1. Comparison of semi-quantitative parameters of lung nodules under the same respiratory state using different reconstruc-
tion algorithms $(n = 139)$
表 1. 不同重建算法在相同呼吸状态下肺结节半定量参数的比较(n = 139)

Table 2. Comparison of	of semi-quantitative	parameters of	of lung no	odules b	between	OSEM	and B	PL re	econstruction	algorit	hms
under different respirate	ory states $(n = 139)$										

表 2. 不同呼吸状态下 OSEM 与 BPL 重建算法肺结节半定量参数的比较(n = 139)

北宁昌会粉		自由呼吸				屏气		
十止里参奴	OSEM	BPL	z 值	р	OSEM	BPL	z 值	р
SUVmax	3.02 (1.67, 5.61)	4.45 (2.19, 7.31)	-9.99	< 0.001	4.65 (2.38, 7.47)	6.8 (3.51, 11.55)	-9.75	< 0.001
SUVmean	2.25 (1.36, 3.12)	2.71 (1.68, 3.55)	-9.20	< 0.001	2.71 (1.85, 3.56)	3.42 (2.52, 4.91)	-9.40	< 0.001

续表								
SUVpeak	2.05 (1.29, 4.01)	2.69 (1.72, 5.27)	-10.09	< 0.001	2.65 (1.38, 5.52)	3.70 (2.07, 6.61)	-10.06	<0.001
SBR	1.77 (1.01, 3.50)	2.59 (1.28, 4.66)	-9.68	< 0.001	3.02 (1.45, 5.32)	4.44 (2.24, 7.61)	-9.10	< 0.001

**Table 3.** Comparison of semi-quantitative parameters of lung nodules reconstructed with BPL algorithm under different respiratory states (n = 139)

表 3. BPL 重建算法在不同呼吸状态肺结节半定量参数比较(n = 139)

组别	SUVmax	SUVmean	SUVpeak	SBR	%∆SUVmax	%∆SUVmean	%∆SUVpeak	%ΔSBR
自由呼吸 BPL	4.45 (2.19, 7.31)	2.71 (1.68, 3.55)	2.69 (1.72, 5.27)	2.59 (1.28, 4.66)	31.73 (16.25, 50.00)	18.79 (9.12, 32.41)	27.03 (15.37, 37.84)	32.01 (12.78, 50.71)
屏气 BPL	6.8 (3.51, 11.55)	3.42 (2.52, 4.91)	3.70 (2.07, 6.61)	4.44 (2.24, 7.61)	88.69 (56.30, 165.25)	58.70 (27.74, 91.02)	60.27 (31.94, 89.86)	99.23 (65.38, 189.22)
Z	-9.99	-9.30	-9.30	-10.07	-9.94	-8.94	-9.27	-10.07
р	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

#### 4. 讨论

OSEM 重建算法是 PET 图像重建的主流技术,随着技术的进步引入了飞行时间(Time of Flight, TOF) 和点扩散函数(Point Spread Function, PSF)技术,这些技术显著提升了 PET 图像的质量[5]。尽管 OSEM 算法因其在临床中的广泛应用而被熟知,但为了防止因噪声过高而限制迭代次数,TOF 和 PSF 技术在 OSEM 的基础上部分改善了 PET 图像的质量和分辨率[6]-[8],但由于迭代次数通常限制在两次,导致图像未能完全收敛,从而影响了图像质量和定量的准确性[9] [10],而通过增加迭代次数的数量来达到足够的对比度恢复又将以降低信噪比为代价。为了解决这一问题,数字化 PET/CT 开始采用 BPL 重建算法,相较于传统重建方法,BPL 算法可达到 25 次零噪声迭代,在同一 PET 数据集的同质区域提供了焦点活动峰值的完全收敛和高信噪比。BPL 通过增加迭代次数,并引入基于相邻体素方差的噪声抑制功能,使定量参数更为精确,与传统的 OSEM 和 TOF + PSF 算法相比,BPL 算法提高 PET 图像分辨率和信噪比,还原最真实的病灶形态及摄取情况[4]。

王旭等[11]比较了 BPL (TOF + PSF + BPL)组和非 BPL (TOF + PSF)组处理的 206 个恶性肿瘤病灶, BPL 组病灶 SUVmax、SUVmean 及 SBR 均明显高于非 BPL 组,在本研究中,随着重建算法的改进,所 有肺结节的 SUVmax、SUVmean、SUVpeak 和 SBR 值等数据 BPL 算法均明显高于 OSEM 算法。Teoh 等 [12]的结果也证实这一点,Teoh 等比较了 OSEM + TOF 和 BPL 处理的 121 例肺结节图像,发现不管是小 结节组,还是大结节组中,OSEM + TOF 算法所得 SUVmax 均明显低于 BPL 算法。然而,Teoh 等[12] [13]以往的研究表明,BPL 算法并没有显著提高区分良性和恶性病灶的能力,高美佳等[14]的研究也提出 BPL 算法对结节病灶的良恶性无特异性,恶性病灶可能表现出低摄取,而良性病灶可能表现出高摄取, 这两者的表现存在重叠。本研究中对比 OSEM 算法,BPL 算法中 SBR 明显提高,BPL 算法能够有效提 升 <sup>18</sup>F-FDG 高代谢病灶的 SUV,同时保持本底组织代谢参数不变,从而显著提高结节的 SBR,进而提升 图像质量,最终增加病灶的检出率[11]。BPL 算法的主要价值在于提高结节的检出率和代谢参数,能够为 临床提供更优的视觉效果和更精确的半定量参数。

肺结节摄取 <sup>18</sup>F-FDG 后,在一段扫描时间内的放射性计数是相同,无论该结节其静止还是运动,而 呼吸运动引起病灶大小发生明显变化,这将减弱病灶内每个体素的放射性活性计数[15],导致肺结节的 SUV 降低,病灶边缘模糊,从而高估 MTV [16],尤其 SUVmax 受图像噪声影响最为明显。本研究中对肺结节进行屏气 20 秒 PET 采集,明显提高 SUVmax、SUVmean、SUVpeak 和 SBR,与呼吸门控提高肺结节 SUV 的相关研究结果一致[17]。Yip 等[18]和戴东等[15]研究相互对照,表明即使在延长扫描时间的前提下,呼吸门控技术也无法降低图像噪声。本研究中,屏气采集 PET 图像 20 秒,杜绝了肺结节的运动 伪影,BPL 算法和 OSEM 算法中肺结节的 SUV 都有所提升,通过数据对比 BPL 算法提升的更明显。

本研究存在一定的局限性:1)本研究需要患者配合屏气,配合差的患者不能进行屏气 CT 扫描和 PET 采集。2)本研究是回顾性单中心研究,可能存在患者批次选择的差异,需要扩大样本量及引入多中心数 据以进一步研究。3)本研究仅分析采用常用 β 值时, BPL 算法重建对半定量参数的影响,未进一步分析 研究不同 β 值对图像的影响。

综上, 屏气 BPL 重建算法通过减少呼吸运动伪影, 显著提升了肺结节 PET 图像的半定量参数值和图像质量, 不仅提高了肺结节的检出率, 还为肺结节的良恶性诊断提供了更精确的影像学依据。

#### 参考文献

- [1] El-Hussein, A., Manoto, S.L., Ombinda-Lemboumba, S., Alrowaili, Z.A. and Mthunzi-Kufa, P. (2020) A Review of Chemotherapy and Photodynamic Therapy for Lung Cancer Treatment. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 21, 149-161. <u>https://doi.org/10.2174/1871520620666200403144945</u>
- [2] 中华医学会呼吸病学分会,中国肺癌防治联盟专家组.肺结节诊治中国专家共识(2024 年版)[J].中华结核和呼吸杂志, 2024, 47(8): 716-729.
- [3] Lopci, E., Kobe, C., Gnanasegaran, G., Adam, J.A. and de Geus-Oei, L. (2021) "PET/CT Variants and Pitfalls in Lung Cancer and Mesothelioma". *Seminars in Nuclear Medicine*, **51**, 458-473. https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2021.04.002
- [4] Matti, A., Lima, G.M., Pettinato, C., Pietrobon, F., Martinelli, F. and Fanti, S. (2019) How Do the More Recent Reconstruction Algorithms Affect the Interpretation Criteria of PET/CT Images? *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 53, 216-222. <u>https://doi.org/10.1007/s13139-019-00594-x</u>
- [5] Lin, L.J., Wang, Y.T., et al. (2021) Impact of Bayesian Penalized Likelihood Algorithm on the Metabolism Parameters and Image Quality in <sup>18</sup>F-FDG PET/CT Background Tissues. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 6, 155-160.
- [6] 黄克敏, 冯彦林, 梁伟棠, 等. 飞行时间和点扩散函数对 PET/CT 图像质量和标准摄取值影响的模型研究[J]. 中 华核医学与分子影像杂志, 2021, 41(7): 420-424.
- [7] Kamikawa, Y., Yoshida, Y. and Kawahara, Y. (2023) Effects of Point Spread Function Correction and Time-of-Flight on Visual Contrast Level and Pixel Values in Brain PET Images. *Nuclear Medicine Communications*, 44, 442-456. <u>https://doi.org/10.1097/mnm.00000000001681</u>
- [8] Leung, E.K., Abdelhafez, Y.G., Berg, E., Xie, Z., Zhang, X., Bayerlein, R., et al. (2022) Relating <sup>18</sup>F-FDG Image Signalto-Noise Ratio to Time-of-Flight Noise-Equivalent Count Rate in Total-Body PET Using the Uexplorer Scanner. *Physics in Medicine & Biology*, 67, Article 125007. <u>https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac72f1</u>
- [9] 崔碧霄, 卢洁, 王曼, 等. TOF-PET 图像重建技术评价小肿瘤病灶的临床价值[J]. 医学影像学杂志, 2016, 26(7): 1237-1239.
- [10] 庄静文,谢峰,吴天棋,等.不同重建条件对一体化 PET-MR 图像空间分辨率影响的研究[J].中国医学装备, 2017,14(11):12-15.
- [11] 王旭, 许莎莎, 王卓, 等.<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 贝叶斯正则化似然重建算法对肿瘤定量参数的影响[J]. 中国医学影像 技术, 2021, 37(11): 1720-1724.
- [12] Teoh, E.J., McGowan, D.R., Bradley, K.M., Belcher, E., Black, E. and Gleeson, F.V. (2015) Novel Penalised Likelihood Reconstruction of PET in the Assessment of Histologically Verified Small Pulmonary Nodules. *European Radiology*, 26, 576-584. <u>https://doi.org/10.1007/s00330-015-3832-y</u>
- [13] Teoh, E.J., McGowan, D.R., Bradley, K.M., Belcher, E., Black, E., Moore, A., et al. (2016) <sup>18</sup>F-FDG PET/CT Assessment of Histopathologically Confirmed Mediastinal Lymph Nodes in Non-Small Cell Lung Cancer Using a Penalised Likelihood Reconstruction. European Radiology, 26, 4098-4106. <u>https://doi.org/10.1007/s00330-016-4253-2</u>
- [14] 高美佳,刘瑶,周洁,等.正则化重建算法对恶性肿瘤病灶 18F-FDG PET/CT 半定量参数的影响及其影响因素分

析[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(13): 84-86.

- [15] 戴东, 刘建井, 卢笛, 等. Flex 技术提高肺结节 PET/CT 图像质量和定量准确性的临床研究[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(2): 98-103.
- [16] Guerra, L., Ponti, E.D., Morzenti, S., Spadavecchia, C. and Crivellaro, C. (2017) Respiratory Motion Management in PET/CT: Applications and Clinical Usefulness. *Current Radiopharmaceuticals*, **10**, 85-92. https://doi.org/10.2174/1874471010666170519165918
- [17] Robin, P., Bourhis, D., et al. (2018) Feasibility of Systematic Respiratory-Gated Acquisition in Unselected Patients Referred for 18F-Fluorodeoxyglucose Positron Emission Tomography/Computed Tomography. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29516001/
- [18] Yip, S., McCall, K., Aristophanous, M., Chen, A.B., Aerts, H.J.W.L. and Berbeco, R. (2014) Comparison of Texture Features Derived from Static and Respiratory-Gated PET Images in Non-Small Cell Lung Cancer. *PLOS ONE*, 9, e115510. <u>https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115510</u>