

# PET 贝叶斯惩罚似然法对单发肺占位诊断的增益价值

李梦春<sup>1</sup> 梁梦<sup>1</sup> 王晋凤<sup>1</sup> 温佳<sup>1</sup> 胡奕奕<sup>2</sup> 武志芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山西医科大学第一医院核医学科,太原 030001;<sup>2</sup>山西医科大学法医学院,太原 030001

通信作者:武志芳, Email: wuzhifang01@163.com

**【摘要】** 目的 对比传统光电倍增管(PMT)及有序子集最大期望值迭代法(OSEM),探究硅光电倍增管(SiPM)及贝叶斯惩罚似然法(BPL)对单发肺占位<sup>18</sup>F-FDG PET 半定量参数及临床诊断效能的影响。方法 前瞻性收集 2020 年 3 月至 2022 年 1 月间山西医科大学第一医院初诊为单发肺内结节和(或)肿块的患者[118 例;男 76 例、女 42 例,年龄(63.0±10.1)岁],先后在不同 PET/CT 设备上行胸部显像,根据采集及重建方法的不同分为 PMT+OSEM、SiPM+OSEM 和 SiPM+BPL 3 组。测量肺占位的 SUV<sub>max</sub>、SUV<sub>mean</sub>、肿瘤代谢体积(MTV)及病灶糖酵解总量(TLG)等指标,并计算得到信噪比(SNR)及信号本底比(SBR)。采用单因素方差分析和 Kruskal-Wallis 秩和检验比较各组间参数的差异,采用 ROC 曲线测定各组 SUV<sub>max</sub> 鉴别良恶性病灶的最佳界值及 AUC。结果 118 例患者中,恶性结节 83 个,良性结节 35 个。SiPM+BPL 组图像质量[(4.23±0.64)分]优于 SiPM+OSEM[(3.57±0.50)分]和 PMT+OSEM 组[(3.58±0.51)分;F=54.85,P<0.001]。SiPM+BPL 和 SiPM+OSEM 组结节的 SUV<sub>max</sub>[7.57(3.86,15.61)和 4.95(2.22,10.48)]、SUV<sub>mean</sub>[4.43(2.28,9.12)和 2.84(1.21,5.71)]、MTV[3.54(1.57,7.67)和 5.09(2.83,11.79) ml]、SNR[28.12(12.55,54.38)和 20.16(8.29,41.45)]及 SBR[4.03(1.83,7.75)和 2.32(0.96,5.03)]的差异均有统计学意义(H 值:16.63~37.05,均 P<0.001)。SiPM+BPL、SiPM+OSEM 及 PMT+OSEM 对<2 cm 肺结节的良恶性鉴别 SUV<sub>max</sub> 最佳界值为 3.31、2.21 及 2.05,AUC 分别为 0.686、0.689、0.615;而对≥2 cm 的结节和(或)肿块则为 10.29、6.49 及 4.33,AUC 分别为 0.775、0.782、0.774。结论 图像质量及肺占位各半定量参数主要受重建算法的影响,BPL 能提高肺结节的 SUV<sub>max</sub>、SUV<sub>mean</sub>、SBR 及 SNR,降低 MTV,而对肝本底无明显影响。SiPM+BPL 较 SiPM+OSEM 及 PMT+OSEM 对孤立性肺占位良恶性鉴别诊断的 SUV<sub>max</sub> 最佳界值提高。

**【关键词】** 孤立性肺结节;图像处理,计算机辅助;贝叶斯定理;似然函数;正电子发射断层显像术

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20220622-00195

## Added value of PET Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm in the diagnosis of solitary pulmonary nodules/masses

Li Mengchun<sup>1</sup>, Liang Meng<sup>1</sup>, Wang Jinfeng<sup>1</sup>, Wen Jia<sup>1</sup>, Hu Yiyi<sup>2</sup>, Wu Zhifang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine, First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China;

<sup>2</sup>School of Forensic Medicine of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

Corresponding author: Wu Zhifang, Email: wuzhifang01@163.com

**【Abstract】** **Objective** To investigate the effects of silicon photomultipliers (SiPM) detector and Bayesian penalized likelihood (BPL) reconstruction algorithm on semiquantitative parameters of <sup>18</sup>F-FDG PET/CT and diagnostic efficiency for solitary pulmonary nodules/masses compared with traditional photomultiplier tube (PMT) and ordered subsets expectation maximization (OSEM). **Methods** From March 2020 to January 2022, 118 patients (76 males, 42 females, age (63.0±10.1) years) newly diagnosed with solitary pulmonary nodules/masses in First Hospital of Shanxi Medical University were prospectively enrolled and underwent <sup>18</sup>F-FDG PET/CT imaging with two different PET/CT scanners successively. The images were divided into PMT+OSEM, SiPM+OSEM and SiPM+BPL groups according to PET detector and reconstruction algorithms. The SUV<sub>max</sub>, SUV<sub>mean</sub>, metabolic tumor volume (MTV) and total lesion glycolysis (TLG) of pulmonary nodules/masses were measured, then signal-to-noise ratio (SNR) and signal-to-background ratio (SBR) were calculated. One-way analysis of variance and Kruskal-Wallis rank sum test were performed to compare differences of above parameters among groups. ROC curve analysis was used to analyze the optimal threshold of SUV<sub>max</sub> for the differential diagnosis of pulmonary nodules/masses and AUCs were obtained. **Results** There were 83 malignant nodules and 35 benign nodules. The image quality of SiPM+BPL group (4.23±0.64) was better than that of SiPM+OSEM group (3.57±0.50) or PMT+OSEM group

( $3.58 \pm 0.51$ ;  $F = 54.85$ ,  $P < 0.001$ ). There were significant differences in  $SUV_{max}$  ( $7.57(3.86, 15.61)$  vs  $4.95(2.22, 10.48)$ ),  $SUV_{mean}$  ( $4.43(2.28, 9.12)$  vs  $2.84(1.21, 5.71)$ ),  $MTV$  ( $3.54(1.57, 7.67)$  vs  $5.09(2.83, 11.79)$ ),  $SNR$  ( $28.12(12.55, 54.38)$  vs  $20.16(8.29, 41.45)$ ) and  $SBR$  ( $4.03(1.83, 7.75)$  vs  $2.32(0.96, 5.03)$ ) between SiPM+BPL and SiPM+OSEM groups ( $H$  values:  $16.63-37.05$ , all  $P < 0.001$ ). The optimal threshold values of  $SUV_{max}$  in SiPM+BPL, SiPM+OSEM and PMT+OSEM were 3.31, 2.21, 2.05 with AUCs of 0.686, 0.689, 0.615 for nodules  $< 2$  cm, and were 10.29, 6.49, 4.33 with AUCs of 0.775, 0.782, 0.774 for nodules/masses  $\geq 2$  cm. **Conclusions** Image quality and parameters of pulmonary nodules/masses are mainly affected by the reconstruction algorithms. BPL can improve  $SUV_{max}$ ,  $SUV_{mean}$ ,  $SBR$  and  $SNR$ , but reduce  $MTV$  without significant effect on liver parameters. SiPM+BPL has a higher diagnostic threshold of  $SUV_{max}$  than SiPM+OSEM and PMT+OSEM.

**【Key words】** Solitary pulmonary nodule; Image processing, computer-assisted; Bayes theorem; Likelihood functions; Positron-emission tomography

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220622-00195

根据 2020 年全球癌症统计,新发肺癌占有所有新发肿瘤的 11.4%,其致死率高达 18%<sup>[1]</sup>。肺癌的早诊早治能够提高患者生存率,低剂量胸部 CT 的应用使肺结节检出率显著增高。PET/CT 被推荐用于 0.8 cm 以上实性肺结节的良恶性鉴别,且具有较高的阴性预测价值<sup>[2-3]</sup>,但受分辨率及代谢水平影响,其在肺小结节及磨玻璃密度结节中的应用受到一定限制,尤其是小于 10 mm 的结节及伴有磨玻璃密度的结节<sup>[2-5]</sup>。

众多研究从硬件和算法来提升 PET/CT 探测的灵敏度和特异性<sup>[6]</sup>。探测器从传统的光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 到硅光电倍增管 (silicon photomultipliers, SiPM);常用的图像重建算法包括有序子集最大期望值迭代法 (ordered subsets expectation maximization, OSEM) 和贝叶斯惩罚似然法 (Bayesian penalized likelihood, BPL)<sup>[7]</sup>,目前临床常用的采集和重建方法包括 PMT+OSEM、SiPM+OSEM 和 SiPM+BPL 3 种模式。笔者对比研究了不同采集和重建模式对单发肺占位的图像质量、病灶半定量参数及诊断效能的影响。

## 资料与方法

1.研究对象。前瞻性纳入 2020 年 3 月至 2022 年 1 月间山西医科大学第一医院初诊为肺内单发结节和(或)肿块 118 例患者,男 76 例、女 42 例,年龄 ( $63.0 \pm 10.1$ ) 岁;其中纯磨玻璃密度结节、混杂性结节和实性结节各有 9、10 和 99 例。所有患者在 1 年内随访得到结节的病理结果或治疗后胸部 CT 复查结果,排除检查前已经接受过化疗或放射治疗的患者。本研究经过山西医科大学第一医院医学伦理委员会批准,批件号:[2018]伦审字(K005)号;所有患者均签署知情同意书。

2.图像采集及重建。<sup>18</sup>F-FDG 由日本住友公司 HM-10 型回旋加速器及 FDG 合成模块生产(放化纯 >

99%),PET/CT 仪分别为美国 GE Discovery DMI 及美国 GE Discovery VCT。患者禁食 6 h 以上,按体质量静脉注射 <sup>18</sup>F-FDG 1.2~1.5 MBq/kg,随后安静休息 1 h;患者采用简单随机法选择,先后在 2 台 PET/CT 上行胸部 PET/CT 显像。PET 图像在正常潮气下采集,每个床位 2 min。CT 扫描参数:管电压 120 kV,管电流 60~150 mA,噪声指数为 18,螺距 0.984,层厚 3.75 mm,旋转时间 0.5 s,探测器覆盖范围为 40 mm。DMI 型 PET/CT 仪采集得到的图像分别以 BPL( $\beta = 350$ )<sup>[8]</sup>及 OSEM 重建,获得 SiPM+BPL 和 SiPM+OSEM 图像;VCT 型 PET/CT 仪采集得到的图像用 OSEM 进行重建获得 PMT+OSEM 图像。PET 图像采集完成后,在屏气状态下扫描胸部薄层 CT,管电压 120 kV,管电流 200~350 mA,噪声指数为 24,螺距 0.984,层厚 1.25 mm,旋转时间 0.8 s。

3.图像分析。(1)图像质量评价。3 组图像均传至 AW47 工作站进行融合,由 2 名经验丰富的核医学副主任医师阅读。观察全身最大密度投影 (maximum intensity projection, MIP) 图及重建后轴位图像,根据图像的清晰度及是否符合临床诊断的要求对图像质量进行评分:1 分表示差(图像缺损或严重模糊,严重影响临床阅片,导致报告不能完成);2 分表示可接受(图像模糊并对阅片有影响,但不改变最终的报告结论);3 分表示好(图像虽然有些模糊,但是完全不影响阅片及最终的报告);4 分表示非常好(图像大体都比较清晰,只存在极小的不清晰的地方);5 分表示极好(图像整体都十分清晰,没有不清晰的地方)<sup>[9]</sup>。

(2)半定量分析。图像融合后手动勾画 ROI,本底的测量选择肝脏(肝右叶并且避开血管,ROI 直径约 3.0 cm),测量肝脏的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$  及 SUV 标准差 (standard deviation of SUV,  $SUV_{SD}$ )。肺结节手动勾画 ROI,以 41% $SUV_{max}$  为阈值,测得每个肺结节病灶的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$ 、肿瘤代谢体积 (metabolic

tumor volume, MTV)及病灶糖酵解总量(total lesion glycolysis, TLG)。计算信号本底比(signal-to-background ratio, SBR)及信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), SBR=结节  $SUV_{max}$ /肝脏  $SUV_{mean}$ , SNR=结节  $SUV_{max}$ /肝脏  $SUV_{SD}$ 。

4.统计学处理。采用 IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析,符合正态分布的定量资料用  $\bar{x} \pm s$  表示,不符合正态分布的定量资料用  $M(Q_1, Q_3)$  表示,多组间比较采用单因素方差分析或 Kruskal-Wallis 秩和检验,组间两两比较采用最小显著差异  $t$  检验或 Bonferroni 校正法调整检验水平;采用 ROC 曲线分析得到不同采集模式鉴别良恶性结节的  $SUV_{max}$  最佳界值。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

### 结 果

1.临床一般资料。118 例患者中,恶性结节 83 个(代谢均高于本底,5 个低于纵隔,78 个高于纵隔,平均  $SUV_{max} = 11.69$ ),其中腺癌 73 个、鳞状细胞癌 8 个、小细胞肺癌 1 个、转移瘤 1 个;良性结节 35 个(代谢均高于本底,6 个低于纵隔,29 个高于纵隔,平均  $SUV_{max} = 6.88$ ),其中炎性假瘤 2 个、结核结节 14 个(除 1 个不能明确外,其余均为活动性结核)、其他炎性结节 19 个(16 个为活动期)。获得病理结果(通过手术切除或细针穿刺活组织检查)的有 105 例,部分良性结节( $n = 13$ )通过治疗后随访得到。结节的短径中位数为 16 mm(范围:3~60 mm),长径中位数为 20 mm(范围:3~70 mm)。118 例患者中,51 例患者先在 DMI 扫描,67 例患者先在 VCT 采集,患者在 2 台设

备分别行 PET/CT 的时间间隔为(56.5±21.6) min。

2.不同采集及重建方法图像视觉评估及半定量参数比较。(1)视觉评估。3 组图像质量得分差异有统计学意义( $F = 54.85, P < 0.001$ ),其中 SiPM+BPL 组[(4.23±0.64)分]高于 SiPM+OSEM 组[(3.57±0.50)分]和 PMT+OSEM 组[(3.58±0.51)分];均  $P < 0.001$ ];而 SiPM+OSEM 组及 PMT+OSEM 组间的差异无统计学意义( $P = 0.907$ )。

(2)肝脏半定量参数比较。3 组肝脏  $SUV_{max}$  差异有统计学意义( $F = 19.62, P < 0.001$ ),其中 SiPM+BPL 组(3.06±0.51)高于 PMT+OSEM 组(2.64±0.46; $P < 0.001$ ),SiPM+OSEM 组(2.91±0.57)高于 PMT+OSEM 组( $P < 0.001$ );但 SiPM+BPL 组及 SiPM+OSEM 组间的差异无统计意义( $P = 0.250$ )。

(3)结节半定量参数的比较(表 1)。3 组测定的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$ 、MTV、SNR 及 SBR 差异均有统计学意义( $H$  值:16.63~37.05,均  $P < 0.001$ ),而 TLG 差异无统计学意义( $H = 0.31, P = 0.857$ )。SiPM+BPL 组测得结节的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$ 、SNR 及 SBR 均高于另外 2 组[均  $P < 0.001$  (Bonferroni 校正法)],而 MTV 小于另外 2 组[均  $P < 0.001$  (Bonferroni 校正法)];但 SiPM+OSEM 组及 PMT+OSEM 组  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$ 、MTV、TLG、SNR 及 SBR 之间的差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。

3.肺结节良恶性鉴别界值。将结节按照大小分为 4 组,以  $SUV_{max} 2.5$  为界值<sup>[10-11]</sup>,不同采集及重建方法下  $SUV_{max}$  诊断肺结节良恶性的灵敏度、特异性及准确性见表 2。

表 1 PET 不同采集及重建方法用于 118 例肺内单发肺占位患者的半定量参数的比较 [ $M(Q_1, Q_3)$ ]

采集及重建方法	$SUV_{max}$	$SUV_{mean}$	MTV (ml)	TLG (g)	SNR	SBR
SiPM+BPL	7.57(3.86, 15.61)	4.43(2.28, 9.12)	3.54(1.57, 7.67)	12.00(4.58, 43.85)	28.12(12.55, 54.38)	4.03(1.83, 7.75)
SiPM+OSEM	4.95(2.22, 10.48)	2.84(1.21, 5.71)	5.09(2.83, 11.79)	13.70(4.78, 43.33)	20.16(8.29, 41.45)	2.32(0.96, 5.03)
PMT+OSEM	3.41(1.59, 6.76)	1.90(0.96, 4.20)	7.33(3.76, 14.18)	13.25(5.88, 30.83)	16.78(7.09, 34.25)	1.74(0.77, 4.01)
$H$ 值	37.05	32.46	21.79	0.31	16.63	32.68
$P$ 值	<0.001	<0.001	<0.001	0.857	<0.001	<0.001

注:BPL 为贝叶斯惩罚似然法,MTV 为肿瘤代谢体积,OSEM 为有序子集最大期望值迭代法,PMT 为光电倍增管,SBR 为信号本底比,SiPM 为硅光电倍增管,SNR 为信噪比,TLG 为病灶糖酵解总量

表 2 不同大小结节组患者采用不同采集及重建方法下  $SUV_{max}$  诊断肺结节良恶性的价值

结节大小	例数	SiPM+BPL			SiPM+OSEM			PMT+OSEM		
		灵敏度	特异性	准确性	灵敏度	特异性	准确性	灵敏度	特异性	准确性
<1 cm	16	9/10	3/6	12/16	2/10	5/6	7/16	2/10	6/6	8/16
≥1 cm 且 <2 cm	43	88.6%(31/35)	3/8	79.1%(34/43)	71.4%(25/35)	5/8	69.8%(30/43)	54.3%(19/35)	5/8	55.8%(24/43)
≥2 cm 且 <3 cm	31	20/20	2/11	71.0%(22/31)	19/20	4/11	74.2%(23/31)	16/20	4/11	64.5%(20/31)
≥3 cm	28	18/18	0/10	64.3%(18/28)	18/18	1/10	67.9%(19/28)	16/18	4/10	71.4%(20/28)

注:括号内为例数比;以  $SUV_{max} 2.5$  为诊断界值

鉴于大结节及肿块代谢水平与小结节不同,将结节分为最大径<2 cm 组(59 例)和最大径≥2 cm 组(59 例)(典型病例见图 1、2),SiPM+BPL、SiPM+OSEM 和 PMT+OSEM 对<2 cm 肺结节良恶性鉴别的  $SUV_{max}$  最佳界值为 3.31、2.21 和 2.05, AUC 分别为 0.686、0.689 和 0.615, 灵敏度和特异性分别为 78.3%和 64.3%、65.2%和 71.4%、58.7%和 71.4%; 对≥2 cm 肺结节及肿块良恶性鉴别的  $SUV_{max}$  最佳界值为 10.29、6.49 和 4.33, AUC 分别为 0.775、0.782 和 0.774, 灵敏度和特异性分别为 70.3%和 76.2%、75.7%和 77.2%、75.7%和 76.2%。

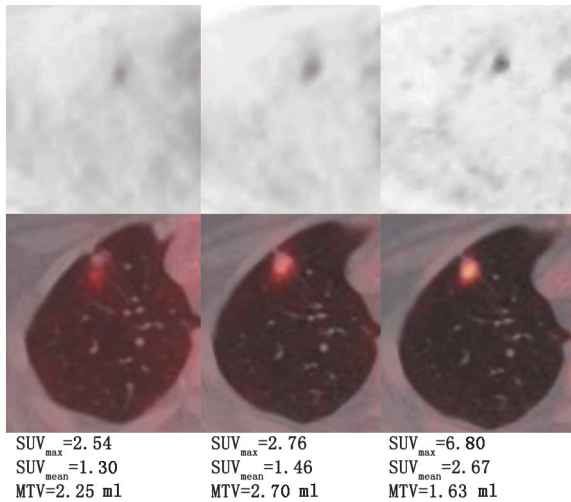


图 1 结肠癌术后患者(女,64 岁)不同采集及重建方法的 PET/CT 显像图。PET/CT 可见右肺上叶前段一 0.9 cm×0.8 cm 大小结节,边界清楚,浅分叶,术后证实为肺腺癌。从左到右依次为光电倍增管(PMT)+有序子集最大期望值迭代法(OSEM),硅光电倍增管(SiPM)+OSEM 及 SiPM+贝叶斯惩罚似然法(BPL)图像,可看到结节的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$  逐渐增高。MTV 为肿瘤代谢体积

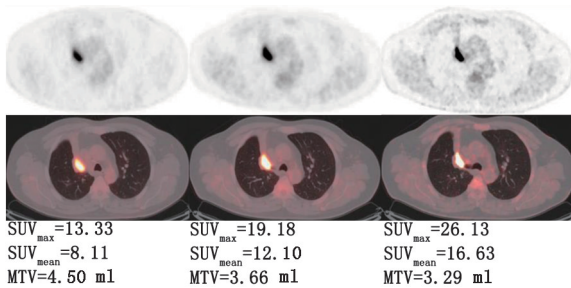


图 2 右肺上叶鳞状细胞癌患者(男,55 岁)不同采集及重建方法的 PET/CT 显像图。PET/CT 可见病灶大小约 3.3 cm×2.2 cm,继发远端肺组织不张。从左到右依次为 PMT+OSEM, SiPM+OSEM 及 SiPM+BPL 图像,可看到结节的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$  逐渐增高,MTV 逐渐减低

### 讨 论

不同探测器和重建算法均会影响 PET 图像质

量和各代谢参数。本研究表明图像质量的提高主要受算法的影响,BPL 较 OSEM 能明显提高图像质量。OSEM 随着迭代次数的增加,噪声也不断增加<sup>[12]</sup>; 而 BPL 加入相邻体素之间差值惩罚函数,起到抑制噪声的作用<sup>[13]</sup>,从而提高图像质量。

采集条件相同时,BPL 较 OSEM 明显提高肺结节的  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$ 、SNR 及 SBR,降低 MTV,而对于肝脏本底无明显影响。OSEM 因迭代次数受限,不可能运行到完全收敛,造成病灶  $SUV_{max}$  及  $SUV_{mean}$  的低估<sup>[12]</sup>。而 BPL 中的相对差值惩罚函数能够抑制噪声、增加迭代次数、实现完全收敛,从而使  $SUV_{max}$ 、 $SUV_{mean}$  更接近真实值;而  $SUV_{max}$  增高、背景噪声降低会导致 SBR 及 SNR 增高。与 Vallot 等<sup>[13]</sup>的研究结果一致,BPL 得到的 MTV 小于 OSEM,由于 SNR 及  $SUV_{max}$  提高,MTV 的边界以 41% $SUV_{max}$  为阈值进行勾画,BPL 得到的病灶边界较 OSEM 缩小变得更清晰。均采用 OSEM 重建时,SiPM 采集的图像,其肝脏  $SUV_{max}$  虽略高于 PMT 采集,两者得到的结节半定量参数差异无统计学意义,表明探测器对于肝脏及结节各半定量参数的影响并不显著。

以  $SUV_{max}$  2.5 为界值鉴别肺结节的良恶性,对于 1 cm 以下的小结节,OSEM 鉴别诊断的灵敏度只有 2/10,既往研究对小于 1 cm 肺结节不推荐做 PET/CT<sup>[4-5]</sup>; 而 BPL 的灵敏度可达 9/10,但特异性不高(仅为 3/6),准确性虽有提升但并不理想,为 12/16;在 ≥1 cm 且 <2 cm 的结节中,SiPM+BPL 的灵敏度及准确性分别为 88.6%(31/35)、79.1%(34/43),均有所提升,但仍受特异性影响,准确性不理想。以上结果表明 SiPM 探测及 BPL 对 2 cm 以下结节特别是 1 cm 以下的小结节诊断灵敏度有明显提升,这与文献报道一致<sup>[9-10,14]</sup>,但其特异性减低,因而准确性提升并不显著。而对于 2 cm 以上的大结节或肿块,PMT+OSEM、SiPM+OSEM、SiPM+BPL 诊断效能较为接近,SiPM+BPL 对其诊断并无显著增益;当诊断界值为 2.5 时,SiPM+OSEM 及 SiPM+BPL 诊断特异性太低,影响准确性,表明增加 SiPM 探测和(或)BPL 后,2.5 的界值已不适用。

本研究对于 2 cm 以下的肺结节,3 组采集及重建方法勾画的 ROC 曲线得到的界值分别为 3.31、2.21 及 2.05,SiPM+BPL 灵敏度最高(78.3%),特异性为 64.3%,再次验证 SiPM 及 BPL 对于小结节探测灵敏度的提升,但是受特异性较低的影响,诊断增益并不明显。文献报道,BPL 及 OSEM 鉴别肺结节(0~3 cm)良恶性的  $SUV_{max}$  界值分别为 4.00~5.74

及 3.000~4.335<sup>[6-8,10-11]</sup>,均高于本研究得到的 3.31、2.21 及 2.05,可能与本研究 2 cm 以下结节中包含 8 个磨玻璃密度结节及 8 个亚实性结节,其 SUV<sub>max</sub> 较纯实性结节减低有关;而 2 cm 以上的结节或肿块,良恶性界值分别为 4.33、6.49 及 10.29,较传统界值明显提高,但 3 组采集及重建方法的特异性及灵敏度差异并不明显,表明对于 2 cm 以上的大结节或肿块,传统 PMT+OSEM 能够满足临床诊断需求,SiPM+BPL 无明显诊断增益价值。但随着探测器及算法的改善,界值应有所提升。鉴于此,肺结节良恶性鉴别的界值再延用 2.5 不适合,应根据采集设备、重建方法及病灶大小而相应调整,但目前无统一标准,需要纳入更多数据进一步分析。

综上,图像质量及肺占位各半定量参数主要受 BPL 影响,BPL 能提高肺结节的 SUV<sub>max</sub>、SUV<sub>mean</sub>、SBR 及 SNR,降低 MTV,而对肝本底无明显影响。对孤立性肺占位进行良恶性鉴别时,SiPM+BPL 较 SiPM+OSEM 及 PMT+OSEM 的 SUV<sub>max</sub> 诊断界值应提高,但其诊断增益并不显著。

本研究存在以下不足:首先,本研究的样本量较小,尤其是 1 cm 以下结节的数目较少,未能对 2 cm 以下结节再进行分组计算界值;并且包含部分磨玻璃密度结节及亚实性结节,数据可能存在一定偏倚。此外,同 1 例患者先后进行 2 次胸部扫描,第 2 次扫描的图像相当于延迟显像,可能会提高 SNR 及恶性结节的 SUV<sub>max</sub>,从而对结果造成一定的影响。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 李梦春:研究实施、数据采集、论文撰写;梁梦、胡奕奕:统计学分析;王晋凤、温佳:数据采集、数据处理;武志芳:研究指导、论文修改、经费支持

## 参 考 文 献

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020; GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71(3): 209-249. DOI:10.3322/caac.21660.
- [2] 中华医学会放射学分会心胸学组.低剂量螺旋 CT 肺癌筛查专家共识[J].中华放射学杂志, 2015, 49(5): 328-335. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.05.003. Cardiothoracic Group of Radiology Society of Chinese Medical Association. Expert consensus on low-dose spiral CT lung cancer screening [J]. Chin J Radiol, 2015, 49(5): 328-335. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.05.003.
- [3] 张雪,王振光,杨光杰,等.长期吸烟者合并肺纤维化的孤立性肺结节<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 恶性风险预测模型的建立[J].中华核医学与分子影像杂志, 2021, 41(3): 140-144. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20200331-00134.
- [4] Zhang X, Wang ZG, Yang GJ, et al. Prediction model for probability of malignancy in solitary pulmonary nodules on <sup>18</sup>F-FDG PET/CT of smokers with pulmonary fibrosis [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 41(3): 140-144. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20200331-00134.
- [5] Maffione AM, Grassetto G, Rampin L, et al. Molecular imaging of pulmonary nodules [J]. AJR Am J Roentgenol, 2014, 202(3): W217-223. DOI:10.2214/AJR.13.11733.
- [6] van Tinteren H, Hoekstra OS, Smit EF, et al. Effectiveness of positron emission tomography in the preoperative assessment of patients with suspected non-small-cell lung cancer; the PLUS multicentre randomised trial [J]. Lancet, 2002, 359(9315): 1388-1393. DOI:10.1016/s0140-6736(02)08352-6.
- [7] 赵斌,郭彬威,黄斌,等.<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 不同重建算法对肺结节 SUV 的影响 [J].中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(4): 224-230. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20191122-00266. Zhao B, Guo BW, Huang B, et al. Effects of different reconstruction algorithms on SUV of pulmonary nodules in <sup>18</sup>F-FDG PET/CT [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 40(4): 224-230. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20191122-00266.
- [8] Khalaf M, Abdel-Nabi H, Baker J, et al. Relation between nodule size and <sup>18</sup>F-FDG-PET SUV for malignant and benign pulmonary nodules [J]. J Hematol Oncol, 2008, 1: 13. DOI:10.1186/1756-8722-1-13.
- [9] Howard BA, Morgan R, Thorpe MP, et al. Comparison of Bayesian penalized likelihood reconstruction versus OSEM for characterization of small pulmonary nodules in oncologic PET/CT [J]. Ann Nucl Med, 2017, 31(8): 623-628. DOI:10.1007/s12149-017-1192-1.
- [10] Messerli M, Stolzmann P, Egger-Sigg M, et al. Impact of a Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm on image quality in novel digital PET/CT: clinical implications for the assessment of lung tumors [J]. EJNMMI Phys, 2018, 5(1): 27. DOI:10.1186/s40658-018-0223-x.
- [11] Teoh EJ, McGowan DR, Bradley KM, et al. Novel penalised likelihood reconstruction of PET in the assessment of histologically verified small pulmonary nodules [J]. Eur Radiol, 2016, 26(2): 576-584. DOI:10.1007/s00330-015-3832-y.
- [12] Teoh EJ, McGowan DR, Bradley KM, et al. <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 [J]. Eur Radiol, 2016, 26(11): 4098-4106. DOI:10.1007/s00330-016-4253-2.
- [13] Adams MC, Turkington TG, Wilson JM, et al. A systematic review of the factors affecting accuracy of SUV measurements [J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 195(2): 310-320. DOI:10.2214/AJR.10.4923.
- [14] Vallot D, Caselles O, Chaltiel L, et al. A clinical evaluation of the impact of the Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm on PET FDG metrics [J]. Nucl Med Commun, 2017, 38(11): 979-984. DOI:10.1097/MNM.0000000000000729.
- [15] Messerli M, Kotasidis F, Burger IA, et al. Impact of different image reconstructions on PET quantification in non-small cell lung cancer: a comparison of adenocarcinoma and squamous cell carcinoma [J]. Br J Radiol, 2019, 92(1096): 20180792. DOI:10.1259/bjr.20180792.

(收稿日期:2022-06-22)