

瘤内及瘤周¹⁸F-FDG PET 代谢参数 对三阴性乳腺癌的诊断价值

陈桥梁¹ 覃心妍² 来瑞鹤¹ 檀双秀³

¹南京大学医学院附属鼓楼医院核医学科, 南京 210008; ²南京大学医学院, 南京 210008; ³南京大学医学院附属鼓楼医院超声医学科, 南京 210008

通信作者: 檀双秀, Email: tsx950304@163.com

【摘要】 **目的** 探讨瘤内及瘤周¹⁸F-FDG PET 代谢参数对三阴性乳腺癌(TNBC)的诊断价值。**方法** 病例对照研究。回顾性收集 2016 年 11 月至 2024 年 5 月于南京大学医学院附属鼓楼医院诊治的 64 例女性乳腺癌患者[年龄(56.8±11.5)岁]的¹⁸F-FDG PET/CT 图像及临床病理资料。根据免疫组织化学(IHC)结果,将患者分为 TNBC 组(16 例)和非 TNBC 组(48 例)。采用 LIFEx 软件,以 40% SUV_{max} 为阈值勾画感兴趣体积(VOI),获取瘤内代谢相关参数,包括传统代谢参数[SUV_{max} 、 SUV_{mean} 、最小 SUV(SUV_{min})、肿瘤代谢体积(MTV)、病灶糖酵解总量(TLG)]和代谢异质性参数[累积 SUV 体积直方图曲线下面积(AUC-CSH)、异质性指数(HI)、异质性因子(HF)和 CV];使用自动瘤周扩张功能,勾画出肿瘤 40% SUV_{max} 阈值外 5 mm 的范围(即瘤周区域),同样获取以上代谢相关参数。组间比较采用两独立样本 *t* 检验、Mann-Whitney *U* 检验。进一步行 logistic 回归分析,获得诊断 TNBC 的独立影响因素。**结果** TNBC 组与非 TNBC 组在如下指标间的差异有统计学意义:瘤内 SUV_{max} [12.80(8.99, 19.52)和 7.29(4.70, 12.37); $Z=-2.71, P=0.007$]、瘤内 SUV_{mean} [7.36(4.71, 11.04)和 4.23(3.24, 6.51); $Z=-2.82, P=0.005$]、瘤内 SUV_{min} [4.59(2.99, 7.82)和 3.00(2.51, 4.17); $Z=-2.85, P=0.004$]、瘤周 AUC-CSH [0.53(0.48, 0.57)和 0.58(0.54, 0.69); $Z=-2.73, P=0.006$]、瘤周 CV [0.42±0.12 和 0.35±0.10; $t=-2.32, P=0.024$]、瘤周 HI [1.92(1.80, 2.14)和 1.75(1.48, 1.90); $Z=-2.56, P=0.011$]。Logistic 回归分析结果显示,瘤内 SUV_{max} [比值比(OR)=3.009, 95% CI:1.426~16.348; $P=0.004$]和瘤周 AUC-CSH (OR=0.315, 95% CI:0.134~0.740; $P=0.008$)为诊断 TNBC 的独立影响因素。**结论** 瘤内 SUV_{max} 和瘤周 AUC-CSH 具有诊断 TNBC 的潜在价值,可为临床诊疗以及 TNBC 的代谢研究提供相应的参考依据。

【关键词】 三阴性乳腺癌;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;氟脱氧葡萄糖 F18
DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241014-00348

Diagnostic value of intra- and peritumoral ¹⁸F-FDG PET metabolic parameters in triple-negative breast cancer

Chen Qiaoliang¹, Qin Xinyan², Lai Ruihe¹, Tan Shuangxiu³

¹Department of Nuclear Medicine, Nanjing Drum Tower Hospital, Affiliated Hospital of Medical School, Nanjing University, Nanjing 210008, China; ²Medical School, Nanjing University, Nanjing 210008, China;

³Department of Ultrasound Medicine, Nanjing Drum Tower Hospital, Affiliated Hospital of Medical School, Nanjing University, Nanjing 210008, China

Corresponding author: Tan Shuangxiu, Email: tsx950304@163.com

【Abstract】 **Objective** To explore the value of intra- and peritumoral ¹⁸F-FDG PET metabolic parameters in diagnosing triple-negative breast cancer (TNBC). **Methods** A retrospective case-control study was conducted on 64 female breast cancer (BC) patients (age (56.8±11.5) years) who were diagnosed and treated in Nanjing Drum Tower Hospital, Affiliated Hospital of Medical School, Nanjing University from November 2016 to May 2024. The ¹⁸F-FDG PET/CT images, pathological and immunohistochemical data of patients were collected. Patients were divided into TNBC group ($n=16$) and non-TNBC group ($n=48$) according to immunohistochemistry. LIFEx software was employed to delineate the volume of interest (VOI) with 40% SUV_{max} as the threshold value, thereby obtaining relevant parameters related to intra-tumoral metabolism. Traditional metabolic parameters including SUV_{max} , SUV_{mean} , minimum SUV (SUV_{min}), metabolic tumor volume (MTV), and total lesion glycolysis (TLG) were obtained. Additionally, metabolic heterogeneity parameters, including area under the cumulative SUV histograms curve (AUC-CSH), heterogeneity index (HI), heterogeneity factor (HF), and CV, were also obtained. The peritumoral region 5 mm outside the

40% SUV_{max} threshold was mapped using the spontaneous peritumoral dilation function, and the same parameters were obtained. Independent-sample t test and Mann-Whitney U test were used for inter-group comparison. Logistic regression analysis was performed to identify independent influencing factors for the diagnosis of TNBC. **Results** The results of inter-group comparison showed that intra-tumoral SUV_{max} (12.80(8.99,19.52) vs 7.29(4.70,12.37); $Z=-2.71$, $P=0.007$), SUV_{mean} (7.36(4.71,11.04) vs 4.23(3.24,6.51); $Z=-2.82$, $P=0.005$), SUV_{min} (4.59(2.99,7.82) vs 3.00(2.51,4.17); $Z=-2.85$, $P=0.004$), and peritumoral AUC-CSH (0.53(0.48,0.57) vs 0.58(0.54,0.69); $Z=-2.73$, $P=0.006$), CV (0.42 ± 0.12 vs 0.35 ± 0.10 ; $t=-2.32$, $P=0.024$) and HI (1.92(1.80,2.14) vs 1.75(1.48,1.90); $Z=-2.56$, $P=0.011$) were statistically significant. Logistic regression analysis showed that intra-tumoral SUV_{max} (odds ratio (OR)=3.009, 95% CI: 1.426–16.348; $P=0.004$) and peritumoral AUC-CSH (OR=0.315, 95% CI: 0.134–0.740; $P=0.008$) were independent influencing factors for the diagnosis of TNBC. **Conclusion** Intra-tumoral SUV_{max} and peritumoral AUC-CSH have the potential to diagnose TNBC, which can provide references for clinical diagnosis, treatment as well as metabolic studies related to TNBC.

【Key words】 Triple negative breast neoplasms; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Fluorodeoxyglucose F18

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241014-00348

乳腺癌发病率逐年上升,现居我国女性恶性肿瘤第 2 位,仅低于肺癌^[1]。三阴性乳腺癌(triple-negative breast cancer, TNBC)是乳腺癌的一种亚型,分化程度较低,预后较差。由于 TNBC 肿瘤细胞缺乏雌激素受体(estrogen receptor, ER)、孕激素受体(progesterone receptor, PR)以及人表皮生长因子受体 2 (human epidermal growth factor receptor 2, HER2)表达,内分泌治疗和靶向治疗的效果不佳,现阶段主要治疗手段为手术和化疗^[2]。TNBC 更易发生早期转移,部分患者确诊时已为晚期,因此早诊早治尤为关键^[3]。

在影像学表现方面, TNBC 多表现为类圆形结节或肿块,形态规则,边界清晰,形态学上通常不表现出恶性肿瘤浸润、侵犯周围组织^[4]。¹⁸F-FDG PET/CT 能够提供形态学层面的信息,还可通过功能显像反映肿瘤细胞的活性及代谢情况。¹⁸F-FDG PET 代谢异质性参数是评估肿瘤异质性、侵袭性、转移和预后等的新方法,受到研究者的关注^[5]。既往研究多关注肿瘤内部特征,而瘤周区域包含着与肿瘤生长、侵袭和转移相关的重要生物学信息^[6]。本研究旨在探讨¹⁸F-FDG PET 瘤内及瘤周代谢异质性参数对 TNBC 的诊断价值。

资料与方法

1. 患者资料。本研究为病例对照研究。回顾性收集 2016 年 11 月至 2024 年 5 月于南京大学医学院附属鼓楼医院诊治的女性乳腺癌患者,收集患者年龄、肿瘤长径、病变部位、病理类型、TNM 分期、临床分期、免疫组织化学(immunohistochemistry, IHC)、治疗前¹⁸F-FDG PET/CT 图像资料。通过 IHC 判断 ER、PR 和 HER2 状态:ER、PR 阴性定义为肿瘤细胞核染色率 $\leq 1\%$;HER2 阴性定义为 IHC 0、1+、或

2+且荧光原位杂交(fluorescence in situ hybridization, FISH)试验阴性。TNBC 的诊断标准:ER、PR、HER2 三者均为阴性^[7]。

纳入标准:(1)年龄超过 18 岁;(2)经穿刺或手术病理确诊为乳腺癌;(3)临床、病理、IHC 等资料完整;(4)治疗前接受¹⁸F-FDG PET/CT 检查,且图像质量合格。排除标准:(1)¹⁸F-FDG PET/CT 检查前已行临床治疗;(2)图像未见异常 FDG 摄取增高灶;(3)妊娠、哺乳期者;(4)合并其他恶性肿瘤。

最终纳入 64 例乳腺癌患者,年龄(56.8 \pm 11.5)岁。根据 IHC 结果,将患者分为 TNBC 组(16 例)和非 TNBC 组(48 例)。本研究经南京大学医学院附属鼓楼医院伦理委员会批准(审批件编号:2024-609-01)。

2. 显像方法。使用荷兰 Philips 公司 GXL16 PET/CT 仪对患者行¹⁸F-FDG PET/CT 检查。检查前禁食 6 h 以上,空腹血糖控制在 11.1 mmol/L 以下。根据患者体质量,静脉注射¹⁸F-FDG(南京江原安迪科正电子研究发展有限公司生产,放化纯 $> 95\%$)5.18 MBq/kg。扫描范围从颅底至大腿上部,CT 扫描参数:管电压 120 kV、管电流 100 mA、层厚 2 mm;PET 扫描参数:共采集 7~10 个床位,每个床位采集 1.5 min。CT 数据用于衰减校正,校正后的 PET 图像采用有序子集最大期望值迭代法重建。

3. 图像分析。采用 LIFEx 7.5.15 软件进行图像分析。以 40% SUV_{max} 为阈值,勾画乳腺癌原发灶感兴趣体积(volume of interest, VOI),获取瘤内的传统代谢参数[SUV_{max} 、 SUV_{mean} 、最小 SUV (minimum SUV , SUV_{min})、肿瘤代谢体积(metabolic tumor volume, MTV)、病灶糖酵解总量(total lesion glycolysis, TLG)]和代谢异质性参数[累积 SUV 体积直方图曲线下面积(area under the cumulative SUV histograms curve, AUC-CSH)、 CV 、异质性指数(heterogeneity index, HI)

和异质性因子 (heterogeneity factor, HF)]。AUC-CSH 通过 SUV 体积直方图获取; $HI = \frac{SUV_{max}}{SUV_{mean}}$ 。将 SUV_{max} 阈值设置为 60% 和 80%, 分别获取相应 MTV, HF 为不同阈值与对应 MTV 之间最小二乘法拟合曲线的斜率。使用自动瘤周扩张功能勾画出肿瘤 40% SUV_{max} 阈值外 5 mm 的瘤周区域, 同法获取上述代谢参数; 鉴于瘤周区域 SUV_{max} 相对较低, 且未采用阈值法勾画, 因此不计算 HF。

4. 统计学处理。采用 IBM SPSS Statistics 27.0 与 MedCalc 20.0.27 软件进行统计学分析。采用 Shapiro-Wilk 检验检测定量资料的正常性, 符合正态分布者采用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 行两独立样本 t 检验进行组间比较; 不符合正态分布的定量资料采用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示, 采用 Mann-Whitney U 检验进行组间比较。定性资料采用频数 (百分比) 表示, 行 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法、Mann-Whitney U 检验进行组间比较。将 TNBC 与非 TNBC 组间比较有统计学差异

的瘤内和瘤周变量行多因素 logistic 回归分析, 获得诊断 TNBC 的独立影响因素。运用 ROC 曲线对诊断效能进行分析。采用 Delong 检验比较不同变量间 AUC 的差异。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义 (双侧检验)。

结 果

1. TNBC 与非 TNBC 的组间比较 (表 1, 2)。TNBC 组与非 TNBC 组的一般临床病理指标间差异均无统计学意义 ($t = 0.16, Z$ 值: $-1.57 \sim -0.30, \chi^2$ 值: 1.03 和 1.42, 均 $P > 0.05$; 表 1); 2 组间瘤内 $SUV_{max}, SUV_{mean}, SUV_{min}$ 和瘤周 AUC-CSH、CV、HI 差异有统计学意义 (Z 值: $-2.85 \sim -2.56, t = -2.32, P$ 值: $0.004 \sim 0.024$; 表 2)。TNBC 患者的典型 ^{18}F -FDG PET/CT 显像图见图 1。

2. 诊断效能分析。将 TNBC 与非 TNBC 组间差异具有统计学意义的瘤内和瘤周变量纳入多因素

表 1 TNBC 与非 TNBC 组患者的临床及病理资料比较

组别	例数	年龄 (岁; $\bar{x} \pm s$)	长径 [cm; $M(Q_1, Q_3)$]	肿瘤位置 (例)		病理类型 (例)		T 分期 (例)			N 分期 (例)			M 分期 (例)				临床分期 (例)			
				左	右	IBC-NST	IBC-ST	T1~2	T3	T4	N0	N1~2	N3	M0	M1	I~II	III	IV			
TNBC 组	16	56.4 ± 11.3	4.4 (2.3, 6.0)	12	4	14	2	8	5	3	4	5	7	7	9	2	5	9			
非 TNBC 组	48	57.0 ± 11.7	2.6 (2.2, 4.1)	28	20	44	4	36	4	8	12	12	24	28	20	13	15	20			
检验值		0.16 ^a	-1.57 ^b	1.42		-		-1.56 ^b			-0.30 ^b		1.03		-1.23 ^b						
P 值		0.877	0.117	0.233		0.635		0.120			0.762		0.389		0.220						

注: ^a 为 t 值, ^b 为 Z 值, 余检验值为 χ^2 值; - 为 Fisher 确切概率法, 无 χ^2 值; TNBC 为三阴性乳腺癌, IBC-NST 为浸润性乳腺癌-非特殊类型, IBC-ST 为浸润性乳腺癌-特殊类型

表 2 TNBC 与非 TNBC 组患者的瘤内和瘤周 ^{18}F -FDG PET/CT 代谢参数比较 [$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

组别	例数	瘤内代谢参数				
		SUV_{max}	SUV_{mean}	SUV_{min}	MTV (cm^3)	TLG (g)
TNBC 组	16	12.80 (8.99, 19.52)	7.36 (4.71, 11.04)	4.59 (2.99, 7.82)	14.40 (4.56, 40.50)	104.93 (18.93, 431.62)
非 TNBC 组	48	7.29 (4.70, 12.37)	4.23 (3.24, 6.51)	3.00 (2.51, 4.17)	4.86 (2.72, 14.10)	29.83 (10.96, 77.62)
检验值		-2.71	-2.82	-2.85	-1.50	-1.72
P 值		0.007	0.005	0.004	0.135	0.085

组别	瘤内代谢参数				瘤周代谢参数	
	AUC-CSH	CV	HI	HF	SUV_{max}	SUV_{mean}
TNBC 组	0.62 (0.58, 0.65)	0.22 (0.20, 0.25)	1.64 (1.56, 1.82)	0.31 (0.10, 0.92)	4.88 (2.92, 6.36)	2.47 (1.45, 2.85)
非 TNBC 组	0.63 (0.60, 0.71)	0.22 (0.17, 0.25)	1.63 (1.41, 1.72)	0.10 (0.06, 0.30)	3.00 (2.50, 4.79)	1.92 (1.64, 2.44)
检验值	-1.09	-0.57	-1.05	-1.63	-1.82	-0.37
P 值	0.277	0.566	0.292	0.103	0.068	0.710

组别	瘤周代谢参数					
	SUV_{min}	MTV (cm^3)	TLG (g)	AUC-CSH	CV	HI
TNBC 组	0.48 (0.29, 0.76)	26.69 (10.56, 52.56)	62.36 (17.43, 148.14)	0.53 (0.48, 0.57)	0.42 ± 0.12	1.92 (1.80, 2.14)
非 TNBC 组	0.57 (0.33, 0.79)	11.94 (8.72, 24.64)	25.59 (16.05, 48.93)	0.58 (0.54, 0.69)	0.35 ± 0.10	1.75 (1.48, 1.90)
检验值	-0.74	-1.36	-1.38	-2.73	-2.32 ^a	-2.56
P 值	0.461	0.172	0.168	0.006	0.024	0.011

注: ^a 为 t 值, 余检验值为 Z 值; SUV_{min} 为最小 SUV, MTV 为肿瘤代谢体积, TLG 为病灶糖酵解总量, AUC-CSH 为累积 SUV 体积直方图曲线下面积, HI 为异质性指数, HF 为异质性因子

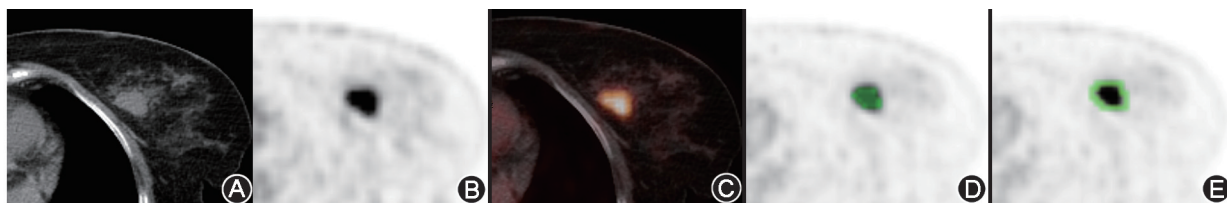


图1 左乳三阴性乳腺癌(TNBC)患者(女,60岁) ^{18}F -FDG PET/CT 显像图及图像分析图(病灶大小约 $2.7\text{ cm}\times 1.7\text{ cm}$) A~C. PET/CT 显示左乳内椭圆形软组织肿块影,形态规则,密度均匀,边界清晰;病灶显像剂摄取增高, $\text{SUV}_{\text{max}} = 12.8$, $\text{SUV}_{\text{mean}} = 5.8$,最小 SUV(SUV_{min})= 2.5,肿瘤代谢体积(MTV)= 5.70 cm^3 ,病灶糖酵解总量(TLG)= 46.17 g ;D.使用 $40\%\text{SUV}_{\text{max}}$ 阈值勾画原发病灶的示意图;E.使用自动瘤周扩张功能勾画出原发病灶 $40\%\text{SUV}_{\text{max}}$ 阈值外 5 mm 的瘤周区域示意图,绿色示瘤周 5 mm 区域感兴趣体积

logistic 回归分析,结果显示瘤内 SUV_{max} [比值比(odds ratio, OR)= 3.009 , $95\%\text{ CI}$: $1.426\sim 16.348$; $P = 0.004$]和瘤周 AUC-CSH(OR= 0.315 , $95\%\text{ CI}$: $0.134\sim 0.740$; $P = 0.008$)为诊断 TNBC 的独立影响因素。ROC 曲线(图 2)分析显示,瘤内 SUV_{max} 诊断 TNBC 的 AUC 为 0.728 ($95\%\text{ CI}$: $0.602\sim 0.832$),瘤周 AUC-CSH 诊断 TNBC 的 AUC 为 0.729 ($95\%\text{ CI}$: $0.604\sim 0.833$),两者 AUC 差异无统计学意义($Z = 0.02$, $P = 0.986$)。瘤内 SUV_{max} 诊断 TNBC 的界值为 8.24 ,灵敏度为 $12/16$,特异度为 64.6% ($31/48$)。瘤周 AUC-CSH 诊断 TNBC 的界值为 0.53 ,灵敏度为 $9/16$,特异度为 79.2% ($38/48$)。

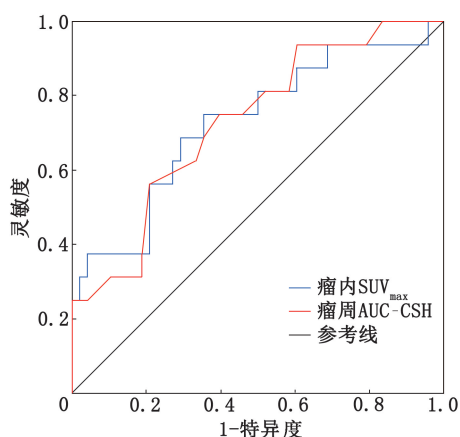


图2 瘤内 SUV_{max} 和瘤周累积 SUV 体积直方图曲线下面积(AUC-CSH)诊断 64 例三阴性乳腺癌(TNBC)患者的 ROC 曲线

讨 论

TNBC 占有乳腺癌的 $15\%\sim 20\%$,预后不佳^[8],部分患者在确诊时已丧失手术机会。在转移性 TNBC 患者中,仅 30% 生存期超过 5 年^[9]。IHC 需要通过活组织检查来获取结果,但该有创检查取材少,且难以反复实施。 ^{18}F -FDG PET/CT 可对疾病进行诊断和分期,还可提供多种代谢参数评估肿瘤异质性、预测预后等^[10]。本研究采用瘤内及瘤周 ^{18}F -FDG PET 代谢参数诊断 TNBC,简便易行,有望为乳

腺癌诊疗提供新的参考思路。

肿瘤细胞的活性越高及增殖能力越强,其在 ^{18}F -FDG PET 图像上的显像剂摄取就越高。本研究结果显示,TNBC 的 SUV_{max} 、 SUV_{mean} 相对较高,意味着瘤内代谢旺盛、肿瘤细胞增殖较快,整体活性水平较高。文献报道,相较于乳腺癌其他亚型,TNBC 的糖酵解途径异常活跃,使其能够在营养匮乏的肿瘤微环境中仍能存活并迅速增殖,即使是在氧供充足的情况下,癌细胞也优先利用糖酵解获取能量^[11]。本研究中 MTV 和 TLG 在 TNBC 与非 TNBC 组间未显示出差异,这与肺癌^[12]、淋巴瘤^[13]等其他肿瘤不同亚型间比较结果存在差异,可能是因为 MTV 代表显像剂摄取增高的肿瘤体积,而 TLG 是 SUV_{mean} 和 MTV 的乘积,更多反映肿瘤负荷,往往与患者预后关系更密切^[14]。肿瘤异质性与肿瘤增殖、侵袭性相关,代谢异质性是其中的一类,可通过多种参数反映。但在本研究的组间比较中,TNBC 组与非 TNBC 组间的瘤内 AUC-CSH、HI、CV 和 HF 差异均未显示出统计学意义。在 logistic 回归中,瘤内 SUV_{max} 为诊断 TNBC 的独立影响因素,其 AUC 为 0.728 ($95\%\text{ CI}$: $0.602\sim 0.832$),与既往研究结果类似^[15]。

肿瘤微环境与肿瘤生长、增殖和转移有关,且与淋巴细胞浸润、淋巴浸润、血管浸润有关^[16-17]。当肿瘤浸润或侵犯周围组织时,形态学通常表现为边缘模糊、毛刺或条索等征象,但 TNBC 的形态相对规则,边界相对清晰,与其具有高度侵袭性的生物学行为不相符。 ^{18}F -FDG PET/CT 能显示肿瘤形态,还能从功能学角度反映 TNBC 的生物学特征。研究发现,乳腺癌边缘毛刺是癌细胞向周围组织浸润所致,与血管内皮生长因子有关;而 HER2 具有促血管内皮生成作用,TNBC 缺乏 HER2 导致血管内皮生成不足,故形态学往往不出现毛刺征^[18-19]。也有研究认为,TNBC 生长过快,周围组织来不及发生成纤维反应,故表现为形态规则、边界清晰^[20]。但肿瘤对

瘤周组织的侵犯是持续性的,肿瘤细胞对瘤周组织代谢的影响可被¹⁸F-FDG PET/CT 功能显像捕捉。本研究中,瘤周区域传统代谢参数组间比较差异均无统计学意义,可能是因为本研究以瘤内 40% SUV_{max} 为阈值界定瘤内和瘤周区域,使得瘤周区域摄取普遍较低,且病灶均球形外扩 5 mm,形成包壳样空间范围,体积上较难表现出明显差异,故瘤周传统代谢参数对鉴别诊断 TNBC 的价值有限。然而,瘤周 AUC-CSH、CV 和 HI 组间差异均具有统计学意义,提示 TNBC 瘤周区域的代谢具有异质性。Logistic 回归分析显示,瘤周 AUC-CSH 对 TNBC 的诊断价值更高,AUC-CSH 越低,异质性程度越高,当小于 0.53 时对诊断 TNBC 具有一定价值。有学者使用 AUC-CSH 预测原发性皮肤恶性黑色素瘤预后、纵隔 B 细胞淋巴瘤预后、神经母细胞瘤预后等,但这些研究均局限于肿瘤内部^[21-23]。另一些研究通过提取瘤周纹理特征来鉴别乳腺肿瘤良恶性、预测乳腺癌腋窝淋巴结转移状态,建立的模型取得了较好的效果^[24-26],但纹理特征提取相对繁琐,应用门槛较高,目前难以在临床中广泛应用。AUC-CSH 作为一种新方法,克服了传统代谢参数无法评估肿瘤代谢异质性的局限性,且易于操作、重复性好,具有在实践中推广使用的潜力^[27]。

本研究存在一定的局限性。首先,本研究为回顾性研究,患者来自单中心,结论尚需多中心前瞻性研究进一步验证;其次,TNBC 组与非 TNBC 组样本比例差异较大,样本量不足,可能对结果产生一定影响,未来将扩大样本量并进行亚组分析对研究结果进行验证。

综上,瘤内 SUV_{max} 和瘤周 AUC-CSH 对 TNBC 的诊断具有一定价值,可为临床提供参考,也为从代谢层面揭示 TNBC 的生物学特征提供了依据。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 陈桥梁:研究设计、研究实施、论文撰写;覃心妍、来瑞鹤:数据收集、统计学分析;檀双秀:研究设计、研究指导、论文修改

参 考 文 献

- [1] 郑荣寿,陈茹,韩冰峰,等. 2022 年中国恶性肿瘤流行情况分析[J]. 中华肿瘤杂志, 2024, 46(3): 221-231. DOI:10.3760/cma.j.cn112152-20240119-00035.
- Zheng RS, Chen R, Han BF, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. Chin J Oncol, 2024, 46(3): 221-231. DOI: 10.3760/cma.j.cn112152-20240119-00035.
- [2] Yin L, Duan JJ, Bian XW, et al. Triple-negative breast cancer molecular subtyping and treatment progress[J]. Breast Cancer Res, 2020, 22(1): 61. DOI:10.1186/s13058-020-01296-5.
- [3] Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, et al. Cancer statistics, 2023

- [J]. CA Cancer J Clin, 2023, 73(1): 17-48. DOI:10.3322/caac.21763.
- [4] 高君蓉,曹曼卿,李翔宇,等.超声联合临床特征术前预测三阴性乳腺癌的价值[J]. 中国超声医学杂志, 2024, 40(3): 261-264. DOI:10.3969/j.issn.1002-0101.2024.03.006.
- Gao JR, Cao MQ, Li XY, et al. The value of ultrasonography combined with clinical features in preoperative prediction of triple negative breast cancer[J]. Chin J Ultrasound Med, 2024, 40(3): 261-264. DOI:10.3969/j.issn.1002-0101.2024.03.006.
- [5] Liu J, Ren Q, Xiao H, et al. Whole-tumoral metabolic heterogeneity in ¹⁸F-FDG PET/CT is a novel prognostic marker for neuroblastoma[J]. Cancer Imaging, 2024, 24(1): 72. DOI:10.1186/s40644-024-00718-3.
- [6] Wang H, Chen W, Jiang S, et al. Intra- and peritumoral radiomics features based on multicenter automatic breast volume scanner for noninvasive and preoperative prediction of HER2 status in breast cancer: a model ensemble research[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 5020. DOI:10.1038/s41598-024-55838-4.
- [7] 贾童童,史津宇,李继会,等.基于¹⁸F-FDG PET/CT 的影像组学在预测乳腺癌分子分型和 Ki-67 表达中的价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(2): 86-91. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230923-00059.
- Jia TT, Shi JY, Li JH, et al. Value of radiomics signatures based on ¹⁸F-FDG PET/CT for predicting molecular classification and Ki-67 expression of breast cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(2): 86-91. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230923-00059.
- [8] Keenan TE, Tolaney SM. Role of immunotherapy in triple-negative breast cancer[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2020, 18(4): 479-489. DOI:10.6004/jnccn.2020.7554.
- [9] Zou Y, Xie J, Zheng S, et al. Leveraging diverse cell-death patterns to predict the prognosis and drug sensitivity of triple-negative breast cancer patients after surgery[J]. Int J Surg, 2022, 107: 106936. DOI:10.1016/j.ijssu.2022.106936.
- [10] Schwenck J, Sonanini D, Cotton JM, et al. Advances in PET imaging of cancer[J]. Nat Rev Cancer, 2023, 23(7): 474-490. DOI:10.1038/s41568-023-00576-4.
- [11] Wang Z, Jiang Q, Dong C. Metabolic reprogramming in triple-negative breast cancer[J]. Cancer Biol Med, 2020, 17(1): 44-59. DOI:10.20892/j.issn.2095-3941.2019.0210.
- [12] Kim DH, Jung JH, Son SH, et al. Prognostic significance of intratumoral metabolic heterogeneity on ¹⁸F-FDG PET/CT in pathological N0 non-small cell lung cancer[J]. Clin Nucl Med, 2015, 40(9): 708-714. DOI:10.1097/RLU.0000000000000867.
- [13] 鲁心宇,王云华,马晓伟,等.¹⁸F-FDG PET/CT 在常见原发性胃淋巴瘤组织病理学分型鉴别诊断和预后评估中的价值[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(6): 327-337. DOI:10.3760/cma.j.cn121381-202301011-00310.
- Lu XY, Wang YH, Ma XW, et al. The value of ¹⁸F-FDG PET/CT in differential diagnosis and prognosis evaluation of histopathological classification of common primary gastric lymphoma[J]. Int J Radiat Med Nucl Med, 2023, 47(6): 327-337. DOI:10.3760/cma.j.cn121381-202301011-00310.
- [14] 刘建井,边海曼,付蕾,等.¹⁸F-FDG PET/CT 在三阴性乳腺癌分子分型诊断中的价值[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2024, 44(5): 421-427. DOI:10.3760/cma.j.cn112271-20230811-00041.
- Liu JJ, Bian HM, Fu Q, et al. Predictive value of ¹⁸F-FDG PET/CT in molecular subtyping for triple-negative breast cancer[J].

- Chin J Radiol Med Prot, 2024, 44(5): 421-427. DOI:10.3760/cma.j.cn112271-20230811-00041.
- [15] Soussan M, Orlhac F, Boubaya M, et al. Relationship between tumor heterogeneity measured on FDG-PET/CT and pathological prognostic factors in invasive breast cancer[J]. PLoS One, 2014, 9(4): e94017. DOI:10.1371/journal.pone.0094017.
- [16] 朱凯,刘彩云,辛文斌,等.靶向肿瘤免疫微环境放射性药物研究进展[J].中华核医学与分子影像杂志,2024,44(9):559-563. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230817-00023. Zhu K, Liu CY, Xin WB, et al. Research progress in radiopharmaceuticals targeting tumor immune microenvironment[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(9): 559-563. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230817-00023.
- [17] 李红岩,夏晓天,兰晓莉,等. PET 分子影像与肿瘤微环境的可视化[J].中华核医学与分子影像杂志,2019,39(3):174-177. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.03.014. Li HY, Xia XT, Lan XL, et al. Visualization of tumor microenvironment and PET molecular imaging[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2019, 39(3): 174-177. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.03.014.
- [18] Wang D, Zhu K, Tian J, et al. Clinicopathological and ultrasonic features of triple-negative breast cancers; a comparison with hormone receptor-positive/human epidermal growth factor receptor-2-negative breast cancers[J]. Ultrasound Med Biol, 2018, 44(5): 1124-1132. DOI:10.1016/j.ultrasmedbio.2018.01.013.
- [19] Wang K, Zou Z, Shen H, et al. Calcification, posterior acoustic, and blood flow; ultrasonic characteristics of triple-negative breast cancer[J]. J Healthc Eng, 2022, 2022: 9336185. DOI:10.1155/2022/9336185.
- [20] Costantini M, Belli P, Bui E, et al. Association between sonographic appearances of breast cancers and their histopathologic features and biomarkers[J]. J Clin Ultrasound, 2016, 44(1): 26-33. DOI:10.1002/jcu.22312.
- [21] 谭千倩,赵莲君,何健,等.基线¹⁸F-FDG PET/CT 肿瘤内代谢异质性参数在原发性皮肤恶性黑色素瘤中的预后价值[J].中华核医学与分子影像杂志,2025,45(3):154-158. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240511-00163. Tan QQ, Zhao LJ, He J, et al. Prognostic value of intratumoral metabolic heterogeneity parameters of baseline ¹⁸F-FDG PET/CT in primary cutaneous malignant melanoma[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(3): 154-158. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240511-00163.
- [22] Ceriani L, Milan L, Martelli M, et al. Metabolic heterogeneity on baseline ¹⁸F-FDG-PET/CT scan is a predictor of outcome in primary mediastinal B-cell lymphoma[J]. Blood, 2018, 132(2): 179-186. DOI:10.1182/blood-2018-01-826958.
- [23] Liu J, Si Y, Zhou Z, et al. The prognostic value of ¹⁸F-FDG PET/CT intra-tumoural metabolic heterogeneity in pretreatment neuroblastoma patients[J]. Cancer Imaging, 2022, 22(1): 32. DOI:10.1186/s40644-022-00472-4.
- [24] Wang S, Sun Y, Li R, et al. Diagnostic performance of perilesional radiomics analysis of contrast-enhanced mammography for the differentiation of benign and malignant breast lesions[J]. Eur Radiol, 2022, 32(1): 639-649. DOI:10.1007/s00330-021-08134-y.
- [25] Zhang S, Shao H, Li W, et al. Intra- and peritumoral radiomics for predicting malignant BiRADS category 4 breast lesions on contrast-enhanced spectral mammography: a multicenter study[J]. Eur Radiol, 2023, 33(8): 5411-5422. DOI:10.1007/s00330-023-09513-3.
- [26] Wang Z, Zhang H, Lin F, et al. Intra- and peritumoral radiomics of contrast-enhanced mammography predicts axillary lymph node metastasis in patients with breast cancer: a multicenter study[J]. Acad Radiol, 2023, 30 Suppl 2: S133-S142. DOI:10.1016/j.acra.2023.02.005.
- [27] Pinho DF, King B, Xi Y, et al. Value of intratumoral metabolic heterogeneity and quantitative ¹⁸F-FDG PET/CT parameters in predicting prognosis for patients with cervical cancer[J]. AJR Am J Roentgenol, 2020, 214(4): 908-916. DOI:10.2214/AJR.19.21604.

(收稿日期:2024-10-14)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于参考文献

请按 GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》,采用顺序编码制著录。依照文献在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出,并将序号置于方括号中,排列于文后。同一文献作者不超过 3 人全部著录;超过 3 人只著录前 3 人,后依文种加表示“等”的文字。作者姓名一律姓氏在前、名字在后,外国人的名字采用首字母缩写形式,缩写名后不加缩写点;不同作者姓名之间用“,”隔开,不用“和”“and”等连词。题名后标注文献类型和载体类型标识代码,文献类型和电子文献载体标识代码参照 GB/T 7714—2015《信息与文献参考文献著录规则》之《文献类型和文献载体标识代码》。中文期刊用全名;外文期刊名称用缩写,以美国国立医学图书馆编辑出版的医学索引(Index Medicus)中的格式为准;Index Medicus 未收录者,依次选用文献自身对刊名的缩写、期刊全称。每条参考文献著录起止页码。文献 DOI 号著录在该条文献最后,并需列出中文参考文献的英文表述(双语著录)。作者必须将参考文献与其原文核对无误。

本刊编辑部