

¹⁸F-FAPI PET/CT 显像识别肥厚型心肌病受累心肌

王丽¹ 王怡璐² 张雨¹ 苏瑶¹ 董志祥³ 杨敏福¹

¹首都医科大学附属北京朝阳医院核医学科, 北京 100020; ²清华大学附属北京清华长庚医院心内科, 北京 102218; ³北京协和医学院、国家心血管病中心、中国医学科学院阜外医院磁共振影像科, 北京 100037

通信作者: 杨敏福, Email: minfuyang@126.com

【摘要】 目的 通过与心脏 MRI 比较, 探讨¹⁸F-成纤维细胞激活蛋白抑制剂 (FAPI) PET/CT 显像识别肥厚型心肌病 (HCM) 患者受累心肌的能力。**方法** 前瞻性纳入 2021 年 7 月至 2022 年 1 月期间在北京朝阳医院经超声或心脏 MRI 证实为 HCM 的患者 50 例[男 32 例、女 18 例, 年龄(43±13)岁], 所有患者行心脏¹⁸F-FAPI PET/CT 和 MRI。通过后处理软件获得左心室心肌 SUV_{max} 和最大靶/本底比值(TBR_{max}); 将心肌摄取¹⁸F-FAPI 程度不低于阈值(SUV_{max} 的 40%、50%、60%) 的区域定义为阳性摄取心肌, FAPI 总量为 TBR_{max} 与 FAPI 阳性摄取范围 (FAPI%) 的乘积。通过心脏 MRI 后处理软件获得左心室心肌钆对比剂延迟强化 (LGE) 范围 (LGE%)、初始 T₁ 值、细胞外容积分数 (ECV) 及心肌形变特征。采用 Spearman 秩相关评估¹⁸F-FAPI 显像参数和心脏 MRI 参数之间的相关性及 FAPI 总量与 5 年心脏性猝死 (SCD) 风险评分的相关性; 采用线性回归分析确定影响 FAPI 总量的因素。**结果** 左心室心肌¹⁸F-FAPI 阳性摄取的阈值为 60% 时, FAPI 总量及 FAPI% 与 MRI 组织学参数相关性最佳(r_s 值: -0.465~0.460, 均 $P<0.05$)。多因素线性回归分析示, HCM 病程 [$\beta=0.128$ (95% CI: 0.022~0.233), $P=0.008$]、血清 N 末端 B 型利钠肽原 (NT-proBNP) 水平 [$\beta=0.190$ (95% CI: 0.099~0.280), $P<0.001$]、左心室射血分数 [$\beta=-0.005$ (95% CI: -0.011~0.000), $P=0.041$] 是 FAPI60 总量的独立影响因素。阈值分别为 40%、50%、60% 时, 对应的 FAPI 总量与 5 年 SCD 风险评分均相关(r_s 值: 0.32、0.29、0.29, P 值: 0.026、0.039、0.040)。**结论** 当¹⁸F-FAPI 阳性摄取的阈值为 60% 时, ¹⁸F-FAPI PET/CT 显像能够更有效地识别出 HCM 患者的受累心肌。FAPI 总量与 HCM 患者 5 年 SCD 风险评分相关。

【关键词】 心肌病, 肥厚性; 成纤维细胞; 拮抗剂和抑制剂; 正电子发射断层显像术; 体层摄影术, X 线计算机; 磁共振成像

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFF0501400, 2021YFF0501402)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240810-00290

¹⁸F-FAPI PET/CT imaging for identifying the involved myocardium in hypertrophic cardiomyopathy

Wang Li¹, Wang Yilu², Zhang Yu¹, Su Yao¹, Dong Zhixiang³, Yang Minfu¹

¹Department of Nuclear Medicine, Beijing Chaoyang Hospital, Capital Medical University, Beijing 100020, China; ²Department of Cardiology, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing 102218, China; ³Department of Magnetic Resonance Imaging, Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

Corresponding author: Yang Minfu, Email: minfuyang@126.com

【Abstract】 Objective To investigate the ability of ¹⁸F-fibroblast activation protein inhibitor (FAPI) PET/CT imaging to identify involved myocardium in patients with hypertrophic cardiomyopathy (HCM) compared with cardiac MRI. **Methods** A prospective study was conducted on 50 patients (32 males, 18 females, age (43±13) years) with HCM confirmed by ultrasound or cardiac MRI in Beijing Chaoyang Hospital from July 2021 to January 2022. All patients underwent both cardiac ¹⁸F-FAPI PET/CT and MRI. The SUV_{max} and maximum target-to-background ratio (TBR_{max}) of the left ventricular myocardium were obtained using post-processing software. Regions with ¹⁸F-FAPI uptake not less than predefined thresholds (SUV_{max} 40%, 50%, 60%) were defined as myocardium with positive uptake. The FAPI amount was defined as the product of TBR_{max} and the extent of FAPI-positive uptake (FAPI%). Cardiac MRI post-processing software was used to measure the extent of left ventricular myocardial late gadolinium enhancement (LGE) (ex-

pressed as LGE%), native T_1 value, extracellular volume fraction (ECV), and myocardial deformation characteristics. Spearman rank correlation analysis was employed to assess the correlation between ^{18}F -FAPI imaging parameters and cardiac MRI parameters, as well as the correlation between FAPI amount and the 5-year risk score for sudden cardiac death (SCD). Linear regression analysis was utilized to identify factors associated with FAPI amount. **Results** When the threshold for ^{18}F -FAPI-positive uptake in the left ventricular myocardium was set at 60%, the correlations between FAPI amount, FAPI%, and MRI parameters were optimal (r_s values: from -0.465 to 0.460, all $P < 0.05$). Multivariate linear regression analysis revealed that HCM duration ($\beta = 0.128$, 95% CI: 0.022–0.233, $P = 0.008$), serum N -terminal pro-B-type natriuretic peptide (NT-proBNP) levels ($\beta = 0.190$, 95% CI: 0.099–0.280, $P < 0.001$), and left ventricular ejection fraction ($\beta = -0.005$, 95% CI: -0.011 to 0.000, $P = 0.041$) were independent predictors of FAPI amount. FAPI amount was positively correlated with the 5-year SCD risk score across different thresholds (40%: $r_s = 0.32$, $P = 0.026$; 50%: $r_s = 0.29$, $P = 0.039$; 60%: $r_s = 0.29$, $P = 0.040$). **Conclusions** When the threshold for ^{18}F -FAPI-positive uptake is set at 60%, ^{18}F -FAPI PET/CT imaging can more effectively identify the involved myocardium in HCM. FAPI amount is correlated with the 5-year SCD risk score in patients with HCM.

【Key words】 Cardiomyopathy, hypertrophic; Fibroblasts; Antagonists and inhibitors; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Magnetic resonance imaging

Fund program: National Key Research and Development Program of China (2021YFF0501400, 2021YFF0501402)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240810-00290

病理性心肌重构是肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)发病与进展的核心机制^[1]。心肌纤维化是该重构过程的关键步骤^[2]。成纤维细胞激活蛋白抑制剂(fibroblast activation protein inhibitor, FAPI) PET/CT 显像能够特异性识别 HCM 患者左心室活化的成纤维细胞,并量化其活化的范围和程度^[3-5]。心脏 MRI 因空间及软组织分辨率高而成为评估心肌重构的可靠手段^[6]。与心脏 MRI 相比, ^{18}F -FAPI 显像可检测出更广泛的阳性摄取区域^[3-4]。既往研究采用左心室 $\text{SUV}_{\max}$ 的 40% 作为 FAPI 阳性摄取的阈值,但此阈值的最优性尚未验证^[3-4]。本研究以心脏 MRI 为参照,通过对比不同阈值下 ^{18}F -FAPI PET/CT 参数与 MRI 参数的相关性,明确 FAPI 显像检测 HCM 患者左心室心肌异常摄取的最佳阈值,以提升该技术在识别 HCM 受累心肌方面的诊断效能。

资料与方法

1. 临床资料。前瞻性纳入 2021 年 7 月至 2022 年 1 月于首都医科大学附属北京朝阳医院经超声心动图或心脏 MRI 确诊为 HCM 的成年患者,按 2020 年美国心脏协会和美国心脏病学会联合发布的 HCM 诊断和治疗指南中相关标准^[7]纳入:(1)左心室任何部位的最大舒张末期厚度 ≥ 15 mm,且没有其他导致心肌肥厚的原因;(2)若患者基因检测阳性或有 HCM 家族史,则心肌厚度 ≥ 13 mm 亦可确诊 HCM。所有入组患者接受血液学标志物检查,包括 N 末端 B 型利钠肽原(N -terminal pro-B-type natriuretic peptide, NT-proBNP)和超敏肌钙蛋白 I(high-sensitive troponin I, hs-cTnI);进行 ^{18}F -FAPI PET/CT

与心脏 MRI 检查。此外,依据 2014 年欧洲心脏病学会发布的指南^[8],计算每例患者的 5 年心脏性猝死(sudden cardiac death, SCD)风险评分。本研究已获得首都医科大学附属北京朝阳医院伦理委员会的批准(批件编号:2021-科-387),患者均签署知情同意书。

2. ^{18}F -FAPI PET/CT 显像及图像分析。 ^{18}F -FAPI 由北京原子高科股份有限公司提供,其制备遵循既往研究报道的方法^[9]。简言之,氟离子经 QMA 柱浓缩后,采用氟化铝配合物法进行 FAPI 探针标记,产物经 C18 柱纯化,确保其放化纯 $> 99\%$ 。按患者体质量经肘静脉注射 ^{18}F -FAPI (2.5 ~ 3.5 MBq/kg),1 h 后使用 16 层 PET/CT 仪(Discovery STE, 美国 GE 公司)行胸部显像。先行 CT 图像采集,扫描条件:管电压 140 kV,管电流 120 mA,层厚 5 mm,螺距 1.375;再以三维模式采集胸部 PET 图像,共 2 个床位,每个床位采集 5 min。使用 CT 图像对 PET 图像进行衰减校正,并采用有序子集最大期望值迭代法重建图像,经 2 次迭代生成 14 个子集。

PET/CT 图像处理采用美国 GE 公司 AW Volume-Share 2 软件。在 PET 图像上手动勾画左心室心肌,获得三维感兴趣体积(volume of interest, VOI)内的 $\text{SUV}_{\max}$ 。分别将摄取 $\geq \text{SUV}_{\max}$ 的 40%、50%、60% 的心肌定义为阳性摄取心肌,并获得相应的阳性摄取范围(FAPI%)。FAPI 原始图像经定量灌注 SPECT (quantitative perfusion SPECT, QPS) 3.1 软件(美国 Cedars-Sinai 医学中心)后处理。软件自动识别左心室心肌轮廓,若无法识别左心室基底段,则进行手动调整,最终生成靶心图,同时获得 VOI 内的像素计数占左心室心肌总计数的百分比,该值代表 FAPI%

(图 1)。左心室最大靶/本底比值(maximum target-to-background ratio, $TBR_{\max}$)定义为 VOI 内 $SUV_{\max}$ 和血池 SUV_{mean} 的比值。FAPI 总量为 $TBR_{\max}$ 与 FAPI% 的乘积。

3. 心脏 MRI 方法及数据处理。心脏 MRI 使用 3.0 T MR 扫描仪(Ingenia, 荷兰 Philips 公司), 配备 32 通道心脏专用线圈。扫描序列包括电影序列和钆对比剂延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)序列。电影序列使用平衡稳态自由进动序列。扫描层面包括左心室的两腔心、四腔心、左心室流出道及左心室短轴层面。具体参数: 重复时间 2.8 ms; 回波时间 1.4 ms; 翻转角 45° ; 接收带宽 1 700 Hz; 时间分辨率 34~46 ms。LGE 序列采用相位敏感反转恢复序列。对比剂为钆喷酸葡胺(Magnevist, 美国 Bayer 公司), 剂量: 按体质量 0.15 mmol/kg, 注射后 10~15 min 扫描。在注射对比剂前, 采用了改良 Lock-Locker 反转恢复(modified look-locker inversion recovery, MOLLI) 5 s(3 s) 3 s 方案, 分别获得基底部、中部和心尖部的 3 个短轴层面的初始 T_1 值。

LGE 成像后, 采用 MOLLI 4 s(1 s) 3 s(1 s) 2 s 方案获取 3 个对应短轴层面的增强后 T_1 值。

在 Cvi42 工作站(加拿大 Circle Cardiovascular Imaging 公司)进行图像分析。手动勾画舒张末期和收缩末期的心内膜和心外膜, 软件自动计算左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室舒张末期室壁厚度、心肌质量和容积指数。采用美国心脏协会 16 节段模型评估局部室壁厚度, 以 ≥ 12 mm 为肥厚标准^[10]。在排除血池和乳头肌的干扰后, 分别在径向、环向和纵向 3 个方向上进行左心室应变分析, 软件自动追踪整个心动周期的心肌形变特征, 必要时进行手动校正, 获得径向、环向及纵向应变参数。按照 $\bar{x} \pm 6s$ 标准计算 LGE 范围(LGE%)。 T_1 mapping 图像用于计算初始 T_1 值、增强后 T_1 值及细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV)(%)^[11]。

4. 统计学处理。使用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行数据分析。定量资料根据是否符合正态分布以 $\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$ 表示, 定性资料以频数(百分

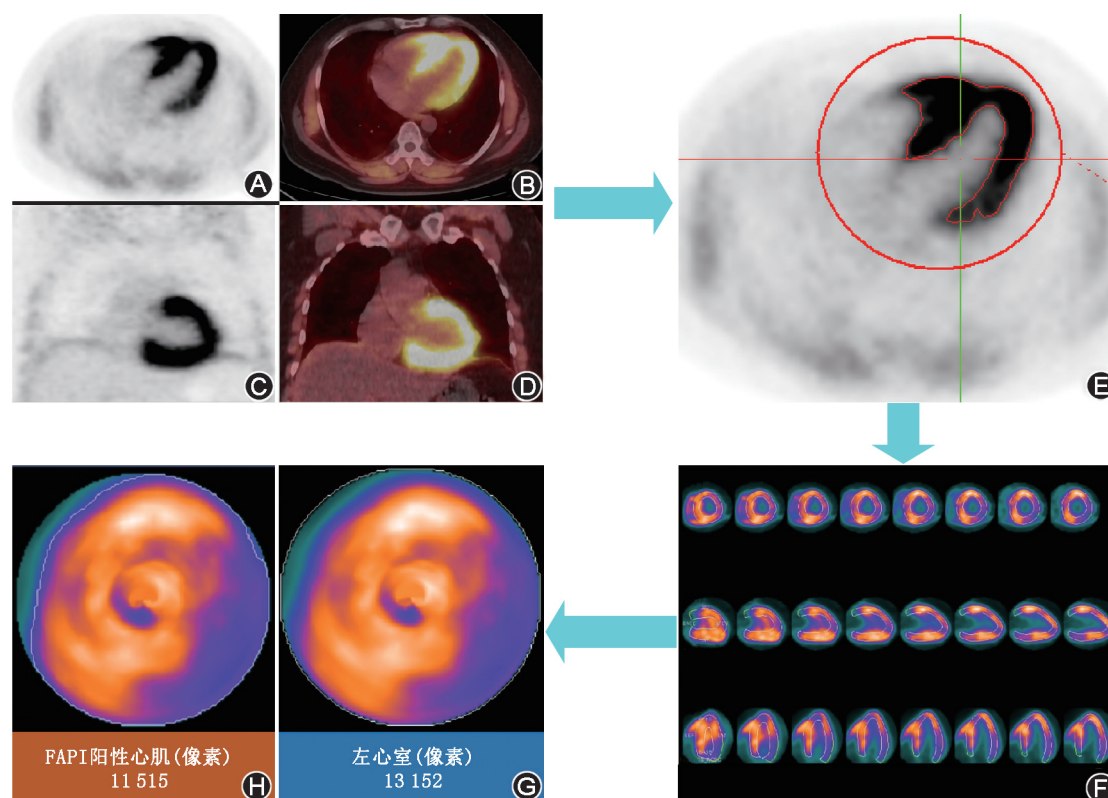


图 1 肥厚型心肌病(HCM)患者(男, 52 岁) ^{18}F -成纤维细胞激活蛋白抑制剂(FAPI) PET/CT 图像解析示意图。A~D. ^{18}F -FAPI PET/CT 显像轴位 PET 图像、PET/CT 融合图像、冠状位 PET 图像、PET/CT 融合图像; E. 在 PET 图像上手工勾画左心室心肌感兴趣体积(VOI), 设定左心室心肌 $SUV_{\max}$ 的 40% 为阈值以识别 FAPI 阳性心肌; F. FAPI 原始图像通过定量灌注 SPECT(QPS) 软件进行后处理, 软件自动识别左心室心肌轮廓, 若无法准确识别左心室基底段, 则手动调整基底段位置; G, H. 靶心图所示左心室整体 FAPI 摄取、阈值为 40% 时阳性心肌范围以及对应的像素, 计算获得 FAPI 阳性摄取范围(FAPI%), 即 FAPI 阳性心肌范围内的像素占左心室心肌总像素的百分比, 本例 40% 阈值下 FAPI% 为 88% (11 515/13 152)

比)表示。采用 Spearman 秩相关分析 FAPI 参数与 MRI 参数、FAPI 总量与 5 年 SCD 风险评分的相关性。以年龄、病程、左心室流出道压差、左心室最大室壁厚度、血清 NT-proBNP 水平、血清 hs-cTnI 水平、左心房前后径、肥厚节段数、LVEF、左心室舒张末期容积、左心室心肌质量为自变量,FAPI 总量为因变量,进行单变量线性回归分析,再采用向后剔除法筛选变量,对有意义者进行多因素线性回归分析。计算自变量的方差膨胀因子以检测多重共线性。双侧检验 $P < 0.05$ 为差异或相关性有统计学意义。

结 果

1. 患者临床资料。共纳入 HCM 患者 50 例,其中男 32 例、女 18 例,年龄(43 ± 13)岁。HCM 确诊至研究入组的病程为 9(4,18)年(范围:2~40 年)。 ^{18}F -FAPI PET/CT 与心脏 MRI 2 项检查的间隔时间为 2(1,20) d(范围:1~47 d)。50 例中 11 例(22.0%)有 SCD 家族史,5 年 SCD 风险评分为 2.8%(2.1%,4.1%);10 例(20%)患者伴随左心室流出道梗阻。

2. PET/CT 图像参数及统计分析。50 例 HCM 患者的 $\text{TBR}_{\max}$ 为 8.8(7.2, 10.3),在不同阈值($\text{SUV}_{\max}$ 的 40%、50%、60%)设定下,FAPI 摄取范围分别为 46.9%(33.0%,55.1%)、35.9%(22.9%,43.0%)

和 24.2%(16.2%,32.8%),且随着阈值的增大,FAPI% 逐渐缩小(图 2)。当左心室心肌 FAPI 摄取阈值为 60%时,FAPI 总量及 FAPI% 与 MRI 各参数的相关性最佳(r_s 值:-0.465~0.460,均 $P < 0.05$;表 1)。多因素线性回归分析显示,HCM 病程、血清 NT-proBNP 水平、LVEF 是 FAPI60 总量的独立影响因素(表 2)。在 40%、50%、60%阈值设定下,FAPI 总量均与 5 年 SCD 风险评分相关(r_s 值:0.32、0.29、0.29, P 值:0.026、0.039、0.040)。

讨 论

心肌纤维化是多种心脏疾病的重要病理机制之一,是 HCM 心肌病理性重构的核心环节^[2,12]。近年来,FAPI 显像在 HCM 患者心肌纤维化的识别中展现出巨大潜力。既往研究将心肌 ^{18}F -FAPI 摄取不低于左心室心肌 $\text{SUV}_{\max}$ 的 40%界定为 FAPI 阳性摄取心肌,并发现 ^{18}F -FAPI PET/CT 显像识别的异常心肌的范围大于心脏 MRI^[3-4]。但值得注意的是,FAPI 阳性摄取的心肌范围与阈值设定密切相关,而目前缺乏相关研究。

心脏 MRI LGE 指标已被纳入 HCM 患者 SCD 的风险分层^[13]。研究表明,初始 T_1 值、ECV 以及心肌应变特征均有望成为 HCM 风险分层的新型生物

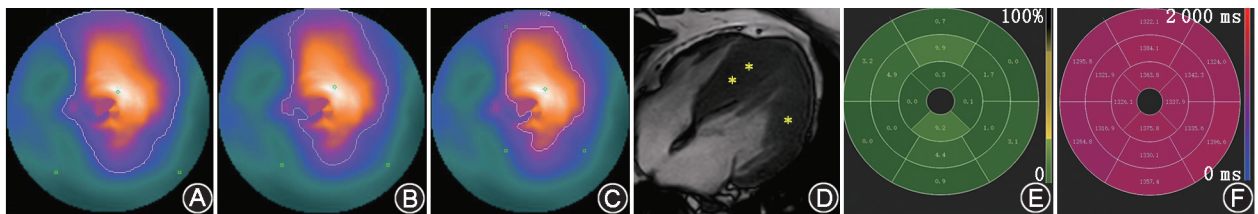


图 2 肥厚型心肌病患者(男,52 岁)不同阈值下左心室心肌 ^{18}F -成纤维细胞激活蛋白抑制剂(FAPI)阳性摄取心肌范围及心脏 MRI。A~C. ^{18}F -FAPI 摄取阈值分别为 $\text{SUV}_{\max}$ 的 40%、50%及 60%,白线环绕区域为软件识别的 FAPI 阳性摄取心肌,对应的阳性摄取范围(FAPI%)分别为 38.9%、30.1%、21.4%;D~F.心脏 MRI 示左心室中部心肌肥厚,最厚为 26 mm(D;* 为肥厚区域),钆对比剂延迟强化(LGE)范围(LGE%)为 3.4%(E),初始 T_1 值为 1 338.7 ms(F)

表 1 不同阳性摄取阈值设定下 50 例 HCM 患者 ^{18}F -FAPI 显像参数与心脏 MRI 参数的相关性

显像参数	初始 T_1 值		ECV%		LGE%		RS		CS		LS	
	r_s	P	r_s	P	r_s	P	r_s	P	r_s	P	r_s	P
FAPI40%	-0.354	0.027	0.246	0.131	0.302	0.061	-0.336	0.034	0.326	0.040	0.263	0.101
FAPI50%	-0.394	0.013	0.321	0.046	0.383	0.016	-0.410	0.009	0.404	0.010	0.324	0.041
FAPI60%	-0.435	0.006	0.424	0.007	0.432	0.006	-0.457	0.003	0.460	0.003	0.367	0.020
FAPI40 总量	-0.330	0.040	0.320	0.047	0.269	0.098	-0.409	0.009	0.395	0.012	0.382	0.015
FAPI50 总量	-0.384	0.016	0.391	0.014	0.364	0.023	-0.452	0.003	0.439	0.005	0.396	0.011
FAPI60 总量	-0.430	0.006	0.443	0.005	0.415	0.009	-0.465	0.003	0.459	0.003	0.399	0.011
$\text{TBR}_{\max}$	-0.211	0.199	0.334	0.038	0.250	0.124	-0.188	0.246	0.177	0.274	0.289	0.071

注:HCM 为肥厚型心肌病,FAPI 为成纤维细胞激活蛋白抑制剂, $\text{TBR}_{\max}$ 为最大靶/本底比值,ECV 为细胞外容积分数,LGE% 为钆对比剂延迟强化(LGE)范围,RS 为径向应变参数,CS 为环向应变参数,LS 为纵向应变参数;40%、50%、60%(40、50、60)表示对应阳性摄取阈值分别为 $\text{SUV}_{\max}$ 的 40%、50%、60%

表 2 50 例 HCM 患者临床参数对 FAPI60 总量影响的单因素和多因素分析

参数	单因素分析			多因素分析			
	β	95% CI	P 值	β	95% CI	VIF	P 值
年龄(岁)	-0.001	-0.005~0.003	0.642	-	-	-	-
HCM 病程(年)	0.182	0.048~0.316	0.009	0.128	0.022~0.233	1.215	0.008
左心室流出道压差(mmHg)	-0.033	-0.128~0.062	0.490	-	-	-	-
左心室最大室壁厚度(mm)	0.013	0.003~0.023	0.014	-	-	-	-
血清 NT-proBNP(ng/L)	0.219	0.115~0.322	<0.001	0.190	0.099~0.280	1.227	<0.001
血清 hs-cTnI(μ g/L)	0.959	0.027~1.890	0.044	-	-	-	-
左心房前后径(mm)	0.611	-0.152~1.374	0.114	-	-	-	-
肥厚节段数	0.221	0.073~0.368	0.004	-	-	-	-
LVEF(%)	-0.009	-0.016~-0.003	0.005	-0.005	-0.011~0.000	1.107	0.041
LVEDV(ml)	-0.067	-0.583~0.449	0.833	-	-	-	-
LVMM(g)	0.097	-0.192~0.385	0.503	-	-	-	-

注: HCM 为肥厚型心肌病, FAPI 为成纤维细胞激活蛋白抑制剂, NT-proBNP 为 N 末端 B 型利钠肽原, hs-cTnI 为超敏肌钙蛋白 I, LVEF 为左心室射血分数, LVEDV 为左心室舒张末期容积, LVMM 左心室心肌质量, VIF 为方差膨胀因子, 60 表示阳性摄取阈值为 SUV_{max} 的 60%; - 表示无数据; 1 mmHg=0.133 kPa

标志物^[14-18]。本研究以心脏 MRI 检测心肌重构为参照标准, 探讨不同阈值设定下 HCM 患者左心室心肌¹⁸F-FAPI 摄取和心脏 MRI 组织学参数的相关性。结果显示, 当阈值设定为 60% 时, FAPI 摄取范围及 FAPI 总量与心脏 MRI 各组织学参数相关性最佳, 提示这部分心肌可能为真正受累的病理心肌。进一步的多因素线性回归分析发现, HCM 病程、血清 NT-proBNP 水平及 LVEF 是 FAPI 总量(阈值 60%) 的独立影响因素。这些结果不仅揭示了 HCM 心肌成纤维细胞活化程度与心肌损伤的密切关系^[19], 也反映了 FAPI 总量在评估 HCM 患者心肌收缩功能异常方面的潜力^[20]。

本研究还对比了不同阈值下 FAPI 总量与 5 年 SCD 风险评分的相关性, 结果显示, 无论阈值如何设定, FAPI 总量均与 5 年 SCD 风险评分呈正相关, 且 r_s 值无明显差别。这一结果进一步肯定了 FAPI 显像在 HCM 相关 SCD 风险分层中的预后价值, 为临床早期筛查和干预高风险患者提供了有力支持^[8]。

本研究具有一定的局限性。首先, 病例数量较少; 其次, 手动勾画左心室基底段可能对研究结果造成一定的偏倚; 最后, 关于 FAPI 阳性摄取阈值, 本研究组参考临床实践中其他心肌显像的经验流程, 主观设定了 40%、50%、60% 3 个阈值, 未来需要更多客观依据和验证来优化阈值的设定, 以提高 FAPI 显像的准确性和临床应用价值。

总之, 本研究表明, 当设定 60% 为阳性摄取阈值时, ¹⁸F-FAPI PET/CT 显像可更好地识别出 HCM 患者的受累心肌。FAPI 总量与 HCM 患者 5 年 SCD 风险评分相关。¹⁸F-FAPI PET/CT 显像有望成为评估

HCM 患者受累心肌及预测 SCD 风险的重要工具。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 王丽: 研究设计与实施、数据收集和分析、论文撰写; 王怡璐: 患者入组、论文修改; 张雨、苏瑶、董志祥: 图像处理与分析、数据整理; 杨敏福: 研究设计与指导、论文审阅

参 考 文 献

[1] Huang L, Ran L, Zhao P, et al. MRI native T1 and T2 mapping of myocardial segments in hypertrophic cardiomyopathy: tissue remodeling manifested prior to structure changes[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1104): 20190634. DOI:10.1259/bjr.20190634.

[2] Schlittler M, Pramstaller PP, Rossini A, et al. Myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy: a perspective from fibroblasts[J]. Int J Mol Sci, 2023, 24(19): 14845. DOI:10.3390/ijms241914845.

[3] Wang L, Wang Y, Wang J, et al. Myocardial activity at ¹⁸F-FAPI PET/CT and risk for sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Radiology, 2023, 306(2): e221052. DOI:10.1148/radiol.221052.

[4] Zhang Y, Dong Z, Wang L, et al. Functional significance of myocardial activity at ¹⁸F-FAPI PET/CT in hypertrophic cardiomyopathy identified by cardiac magnetic resonance feature-tracking strain analysis[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 51(1): 110-122. DOI:10.1007/s00259-023-06411-0.

[5] 韩佳莉, 李莉, 武萍, 等. FAPI 核素显像在心血管疾病中的研究进展[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(4): 244-248. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20221205-00364. Han JL, Li L, Wu P, et al. Research progress of FAPI radionuclide imaging in cardiovascular diseases[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(4): 244-248. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20221205-00364.

[6] Vanmali A, Alhumaid W, White JA. Cardiovascular magnetic resonance-based tissue characterization in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. Can J Cardiol, 2024, 40(5): 887-898. DOI:10.1016/j.cjca.2024.02.029.

[7] Ommen SR, Mital S, Burke MA, et al. 2020 AHA/ACC guideline for the diagnosis and treatment of patients with hypertrophic cardiomyopathy: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical

- Practice Guidelines[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 76(25): 3022-3055. DOI:10.1016/j.jacc.2020.08.044.
- [8] Elliott PM, Anastakis A, Borger MA, et al. 2014 ESC guidelines on diagnosis and management of hypertrophic cardiomyopathy: the Task Force for the Diagnosis and Management of Hypertrophic Cardiomyopathy of the European Society of Cardiology (ESC)[J]. Eur Heart J, 2014, 35(39): 2733-2779. DOI:10.1093/eurheartj/ehu284.
- [9] Wang S, Zhou X, Xu X, et al. Clinical translational evaluation of Al¹⁸F-NOTA-FAPI for fibroblast activation protein-targeted tumour imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(13): 4259-4271. DOI:10.1007/s00259-021-05470-5.
- [10] Kawel-Boehm N, Hetzel SJ, Ambale-Venkatesh B, et al. Reference ranges ("normal values") for cardiovascular magnetic resonance (CMR) in adults and children; 2020 update[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 87. DOI:10.1186/s12968-020-00683-3.
- [11] Ugander M, Oki AJ, Hsu LY, et al. Extracellular volume imaging by magnetic resonance imaging provides insights into overt and sub-clinical myocardial pathology[J]. Eur Heart J, 2012, 33(10): 1268-1278. DOI:10.1093/eurheartj/ehr481.
- [12] 古宇帆,汪蕾,方伟.放射性核素标记成纤维细胞激活蛋白抑制剂 PET 显像应用于心脏疾病的研究进展[J].中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(5): 308-311. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220105-00002.
- Gu YF, Wang L, Fang W. Research progress of radionuclide labeled fibroblast activation protein inhibitors PET imaging in cardiac diseases[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 43(5): 308-311. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20220105-00002.
- [13] Maron MS, Rowin EJ, Wessler BS, et al. Enhanced American College of Cardiology/American Heart Association strategy for prevention of sudden cardiac death in high-risk patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. JAMA Cardiol, 2019, 4(7): 644-657. DOI: 10.1001/jamacardio.2019.1391.
- [14] Xu J, Zhuang B, Sirajuddin A, et al. MRI T1 mapping in hypertrophic cardiomyopathy: evaluation in patients without late gadolinium enhancement and hemodynamic obstruction[J]. Radiology, 2020, 294(2): 275-286. DOI:10.1148/radiol.2019190651.
- [15] Qin L, Min J, Chen C, et al. Incremental values of T1 mapping in the prediction of sudden cardiac death risk in hypertrophic cardiomyopathy: a comparison with two guidelines[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 661673. DOI:10.3389/fcvm.2021.661673.
- [16] Xu J, Yang W, Zhao S, et al. State-of-the-art myocardial strain by CMR feature tracking: clinical applications and future perspectives[J]. Eur Radiol, 2022, 32(8): 5424-5435. DOI: 10.1007/s00330-022-08629-2.
- [17] Qin L, Zhu S, Liu P, et al. Additional prognostic values of strain and strain rate over late gadolinium enhancement in hypertrophic cardiomyopathy patients[J]. Int J Cardiol, 2023, 370: 427-434. DOI:10.1016/j.ijcard.2022.10.174.
- [18] Vigneault DM, Yang E, Jensen PJ, et al. Left ventricular strain is abnormal in preclinical and overt hypertrophic cardiomyopathy: cardiac MR feature tracking[J]. Radiology, 2019, 290(3): 640-648. DOI:10.1148/radiol.2018180339.
- [19] Wu G, Liu J, Wang S, et al. N-terminal pro-brain natriuretic peptide and sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Heart, 2021, 107(19): 1576-1583. DOI:10.1136/heartjnl-2020-317701.
- [20] Rowin EJ, Maron BJ, Carrick RT, et al. Outcomes in patients with hypertrophic cardiomyopathy and left ventricular systolic dysfunction[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 75(24): 3033-3043. DOI:10.1016/j.jacc.2020.04.045.

(收稿日期:2024-08-10)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

2025 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