

心腔内超声左心房建模技术指导房颤消融的准确性评估:模型测量与消融点空间偏移的规律研究

赵奕凯 熊楠青 王逸明 李慧洋 傅平 范月芹 高稳 罗心平 李剑[△]

(复旦大学附属华山医院心内科 上海 200040)

【摘要】 目的 评估基于深度学习(deep learning, DL)算法的心腔内超声(intracardiac echocardiography, ICE)左心房建模技术在房颤射频消融术中构建左心房模型的准确性以及和消融点的空间偏移规律。方法 选取2025年6—8月期间于复旦大学附属华山医院心内科行经导管射频消融术的20例心房颤动患者。术中应用ICE采集呼气末及左心房最大容积时期的图像,基于DL算法进行Cartosound FAM左心房建模。测量该时相下左心房容积、肺静脉开口周长和直径,双侧肺静脉交叉之间的间距,并将结果与Pentaray FAM的对应测量值进行比较。消融完成后对肺静脉隔离圈进行12个分区,测量每个环肺静脉隔离(pulmonary vein isolation, PVI)实际消融点至Cartosound FAM表面的最短距离,系统评价Cartosound FAM所重建的心脏解剖结构相对于真实PVI消融点的空间位置偏差。结果 Cartosound FAM成功为所有患者完成左心房建模,平均使用超声扇面17.0(14.8, 20.0)帧。Cartosound FAM所测得的左心房容积、双侧上下肺静脉周长、左上肺静脉和右上肺静脉直径、双侧肺静脉交叉间距和Pentaray FAM相比差异无统计学意义,而双侧下肺静脉直径显著大于Pentaray FAM[左:(17.08 ± 2.76)mm vs. (12.96 ± 4.65)mm, $P=0.001$; 右:(19.38 ± 3.57)mm vs. (16.50 ± 4.46)mm, $P=0.030$], Bland-Altman Plot提示两种方式在所有指标测量上均有较好的一致性。肺静脉隔离消融点与Cartosound FAM模型空间偏移分析提示,左圈实际的消融点底部及左下嵴部显著偏向Cartosound FAM内部,顶部及后壁偏向外部;右圈实际的消融点多数区域更接近边界或略向外部偏移, Pearson相关性分析提示左圈底部消融点的向上向内偏移程度和Cartosound FAM测量的左心房容积存在一定正相关($r=0.487$, $P=0.029$)。结论 Cartosound FAM在左心房建模中准确性高,与实际消融点的空间偏移具有解剖区域性规律,与Pentaray FAM互补使用可提升手术效率和精度。

【关键词】 心房颤动; 心腔内超声(ICE); Cartosound FAM; 导管消融

【中图分类号】 R654.2 **【文献标志码】** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-8467.2026.04.001

Accuracy assessment of intracardiac echocardiography left atrial mapping technique for atrial fibrillation ablation: a study on model measurements and spatial deviation of ablation points

ZHAO Yi-kai, XIONG Nan-qing, WANG Yi-ming, LI Hui-yang, FU Ping, FAN Yue-qin,
GAO Wen, LUO Xin-ping, LI Jian[△]

(Department of Cardiology, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

【Abstract】 **Objective** To evaluate the accuracy of the deep learning (DL) -based intracardiac echocardiography (ICE) left atrial mapping technique in constructing left atrial models during radiofrequency ablation for atrial fibrillation, and to analyze the spatial deviation patterns between the model and actual ablation points. **Methods** Twenty patients with atrial fibrillation who underwent

[△]Corresponding author E-mail: 13816066763@163.com

catheter radiofrequency ablation at the Department of Cardiology, Huashan Hospital, Fudan University between Jun and Aug 2025 were enrolled. Intracardiac echocardiography was used to acquire images at end-expiration and maximum left atrial volume. DL-based Cartosound FAM was employed for left atrial modeling. Parameters including left atrial volume, pulmonary vein ostium circumference and diameter, and bilateral pulmonary vein interspacing were measured and compared with corresponding measurements from Pentaray catheter-based FAM. After ablation, the pulmonary vein isolation (PVI) circle was divided into 12 segments, and the shortest distance from each actual PVI ablation point to the FAM surface was measured to systematically evaluate the spatial deviation between the reconstructed anatomical structures and the true ablation points. **Results** Cartosound FAM successfully constructed left atrial models for all patients, with a median of 17.0 (14.8, 20.0) ultrasound sectors used. No significant differences were observed between Cartosound FAM and Pentaray FAM in left atrial volume, bilateral superior and inferior pulmonary vein circumference, left superior and right superior pulmonary vein diameter, or bilateral pulmonary vein interspacing. However, the diameters of the bilateral inferior pulmonary veins were significantly larger than Pentaray FAM [Left: (17.08 ± 2.76) mm *vs.* (12.96 ± 4.65) mm, $P=0.001$; Right: (19.38 ± 3.57) mm *vs.* (16.50 ± 4.46) mm, $P=0.030$]. Bland-Altman analysis indicated good agreement between the two methods across all measurements. Spatial deviation analysis revealed that ablation points in the left circular area deviated inward in the bottom and left inferior ridge regions, and outward in the top and posterior wall regions relative to the Cartosound FAM model. In the right circular area, most ablation points were close to the boundary or slightly deviated outward. Pearson correlation analysis showed a positive correlation between the upward and inward deviation of ablation points in the left bottom region and the left atrial volume measured by Cartosound FAM ($r=0.487$, $P=0.029$). **Conclusion** Cartosound FAM demonstrates high accuracy in measuring left atrial volume and pulmonary vein structures. Spatial deviations between actual ablation points and the model exhibit region-specific patterns. The complementary use of Cartosound FAM and Pentaray catheter modeling can enhance the efficiency and precision of atrial fibrillation ablation procedures.

【Key words】 atrial fibrillation; intracardiac echocardiography (ICE); Cartosound FAM; catheter ablation

心腔内超声(intracardiac echocardiography, ICE)是当前心房颤动导管消融治疗中一项重要且成熟的辅助影像技术,其在左心房结构探查、肺静脉变异评估、左心房血流观测、心耳形态显示以及房间隔穿刺点定位等方面具有关键作用^[1-2]。传统ICE技术可在获取多个超声扇面后初步构建左心房的三维空间模型,但其精确度与准确性仍有较大局限。近年来,随着AI技术在电生理领域的广泛应用,基于深度学习(deep learning, DL)算法的新型影像处理模块——Cartosound FAM(美国Biosense Webster公司)已逐步应用于临床。该模块可自动整合多个二维ICE扇面,生成结构详尽、精度较高的左心房三维模型。2023年的一项研究表明,基于AI的左心房三维重建结果与术前冠脉CT血管成像

(computed tomography angiography, CTA)模型相比具有较高的一致性^[3]。然而,目前对于此类非接触式建模方式(包括基于ICE或术前冠脉CTA的重建)与术中实际消融过程中通过接触式手段(如目前广泛使用的Pentaray导管解剖建模)所获模型在空间位置、肺静脉结构等解剖细节方面的一致性尚缺乏系统评价。此外,在Cartosound FAM构建的左心房模型引导下能否直接指导导管进行环肺静脉隔离(pulmonary vein isolation, PVI),亦有待进一步验证。本研究旨在评估术中基于DL算法的ICE Cartosound FAM建模与传统Pentaray导管解剖建模在房颤左心房模型构建方面的准确性,评价实际PVI消融点与ICE Cartosound FAM模型的空间偏移,以期为临床实践提供依据。

资料和方法

研究对象 选择2025年6—8月于复旦大学附属华山医院心内科行经导管射频消融术的非瓣膜性心房颤动患者。纳入标准:有心电资料证实的心房颤动的患者,年龄在18~85岁,拟进行心房颤动射频消融手术治疗;签署知情同意书。排除标准:瓣膜性房颤;左心房或左心耳内存在附壁血栓;甲状腺功能亢进;存在抗凝禁忌;恶性肿瘤及终末期疾病;合并严重内科疾病;有其他研究者认为不宜参加本研究的患者。本研究获得复旦大学附属华山医院伦理委员会批准(伦理号:KY2024-1003)和受试者知情同意。

术前准备 术前患者均要求至少服用4周的标准剂量的口服抗凝药物(利伐沙班20 mg qd或艾多沙班60 mg qd),完成血常规、肝肾功能、甲状腺功能、心肌标志物等常规生化检查,完善经胸心脏超声明确左心房大小。

手术流程 局麻下行导管消融。常规消毒铺巾后,以2%利多卡因局部麻醉穿刺点,穿刺左侧股静脉2处,分别置入7F和11F鞘,静脉给予肝素50 IU/kg后,经7F鞘置入可调弯十极电极至冠状窦,经11F鞘置入10F心腔内超声导管至右房中部,行ICE检查和Cartosound FAM建模;穿刺右股静脉两处,置入两根8.5F许瓦茨鞘,在心腔内超声指导下穿刺2处房间隔,追加肝素50 IU/kg,两鞘管内分别置入消融导管及Pentaray标测导管。Pentaray标测导管再次行左心房解剖标测建模。两个模型进行拟合,阵发性心房颤动行双侧PVI,持续性心房颤动在PVI基础上完成左心房后壁pBOX线性隔离。消融后通过Pentaray导管评价肺静脉及左心房的电隔离情况。

ICE建模 ICE导管先过三尖瓣放置于右心室,完成呼吸门控调整。随后将导管放置于右心房,寻找Home-View三尖瓣-右心室-右心室流出道扇面,顺时针旋转超声导管,依次探查左心耳、左上肺静脉(left superior pulmonary vein, LSPV)、左下肺静脉(left inferior pulmonary vein, LIPV)、左心房后壁、右上肺静脉(right superior pulmonary vein, RSPV)和右下肺静脉(right inferior pulmonary vein, RIPV)扇面以及左心耳长轴扇面,到达每个扇面后

稍作停顿,在呼气末段最大左心房直径(left atrial diameter, LA)容积时相下点击Acquire输入计算扇面,确保获得至少10个扇面以上,再点击“create model”进行Cartosound FAM左心房自动建模。

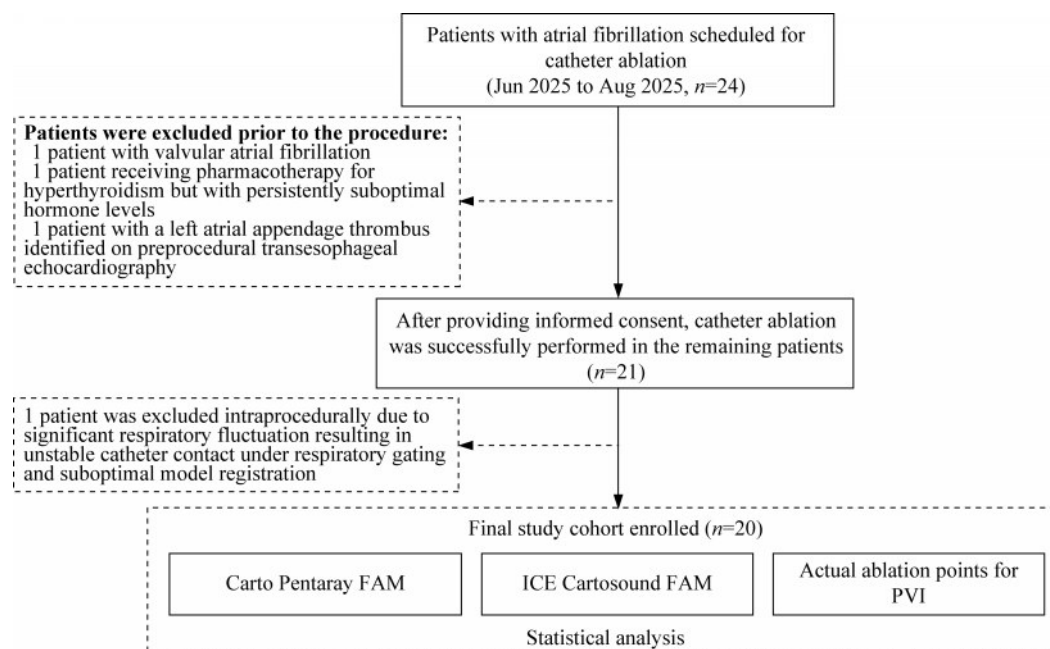
三维建模 Pentaray导管经长鞘进入左心房,分别于LSPV、LIPV、RSPV、RIPV、左心房后壁、顶壁、前壁、心耳部位探查进行解剖建模,由Carto3三维标测系统构建左心房模型。

数据采集和统计学分析 在Cartosound FAM模型、Pentaray FAM模型下测量左心房容积、肺静脉开口直径和周长、双侧肺静脉交叉之间的间距。在完成PVI后测量每个环肺静脉隔离实际消融点至Cartosound FAM模型表面的最短距离(模型之外记为正值,模型之内记为负值),按照左侧环肺静脉隔离的顶部、左上嵴部、左下嵴部、底部、左下后壁、左上后壁,右侧环肺静脉隔离的顶部、右上后壁、右下后壁、底部、右下前壁、右上前壁共12个分区进行比较。符合正态分布和方差齐性的计量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用成组 t 检验,不符合正态性和方差齐性的数据使用非参数检验;计数资料用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。使用Bland-Altman Plot比较两种测量方式的一致性, Pearson相关性分析探索影响空间偏移的因素。使用SPSS 26.0软件进行统计学分析, GraphPad Prism 8软件绘制统计图, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

基线资料 共纳入20例患者,纳排流程见图1,基线资料见表1。其中男性10例(50%),阵发性房颤14例(70%),中位CHA2DS₂-VASc评分为3分,平均左心房前后径为 (39.13 ± 4.20) mm,平均左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)为 $(64.2 \pm 5.02)\%$ 。

手术情况 Cartosound FAM成功为所有患者完成左心房建模,平均采集超声扇面17.0(14.8, 20.0)帧(图2)。结合Pentaray FAM模型显示入组的20位患者未见肺静脉共干等解剖异常。阵发性心房颤动行双侧PVI,持续性心房颤动在PVI基础上完成左心房后壁pBOX线性隔离,术后经左心房基质标测及肺静脉内起搏验证,两组患者肺静脉即刻隔离率均为100%,达到充分良好的隔离。



FAM: Fast anatomical mapping; ICE: Intracardiac echocardiography; PVI: Pulmonary vein isolation.

图1 研究入排流程图

Fig 1 Flowchart of the enrollment

表1 入组房颤患者基线特征

Tab 1 Baseline characteristics of atrial fibrillation

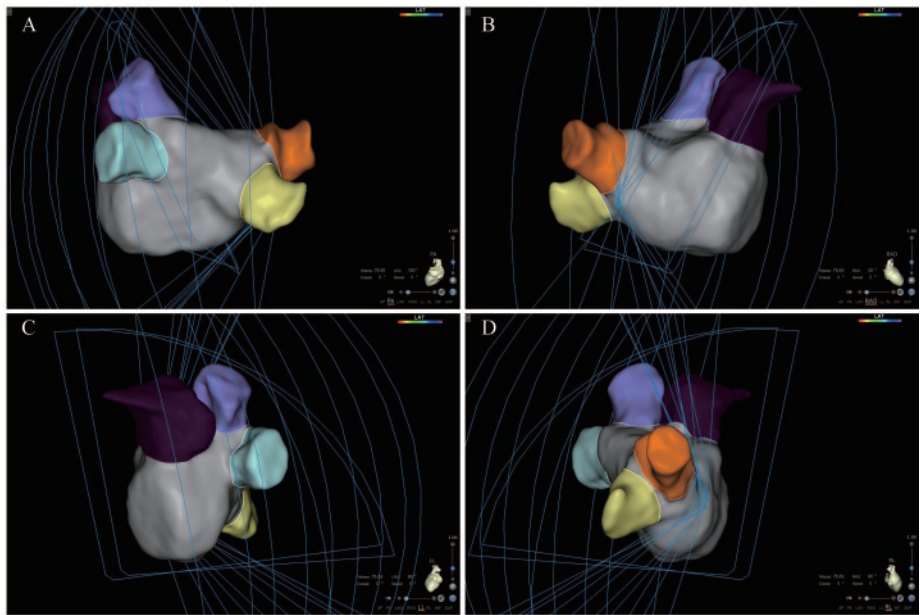
participants [M(P ₂₅ , P ₇₅), n(%) or $\bar{x} \pm s$]	
Variables	Characteristics
Age (y)	66 (60, 69)
Gender	
Male	10 (50)
Female	10 (50)
Type of AF	
Paroxysmal	14 (70)
Persistent	6 (30)
BMI (kg/m ²)	26.23 ± 2.85
CHA ₂ DS-Vasc	3 (2, 3)
LVEF (%)	64.2 ± 5.02
LA (mm)	39.13 ± 4.20
Hemoglobin (g/L)	140.18 ± 12.76
NT-proBNP (ng/L)	86.5 (35.0, 110.5)
Serum creatinine (μmol/L)	68.0 (62.0, 73.9)
HbA1c (%)	6.0 (5.8, 6.4)
cTNT (μg/L)	0.008 (0.004, 0.013)

AF: Atrial fibrillation; LVEF: Left ventricular ejection fraction; LA: Left atrial diameter.

左心房和肺静脉形态比较 Cartosound FAM所测量的左心房容积、LSPV周长、LIPV周长、RSPV周长、RIPV周长、LSPV直径、RSPV直径、双侧肺静脉交叉间距和Pentarray FAM测得数值差异无统计学意义,但LIPV直径和RIPV直径显著大

于Pentarray FAM [(17.08 ± 2.76) mm vs. (12.96 ± 4.65) mm, $P=0.001$; (19.38 ± 3.57) mm vs. (16.50 ± 4.46) mm, $P=0.030$]。使用Bland-Altman Plot进一步比较二者的测量偏倚,双侧肺静脉交叉间距90%的测量差值点落在95%一致性界限之内,其余所有指标均有95%及以上的测量差值点落在95%一致性界限之内,提示两种方法在肺静脉形态、左心房容积及左右径线测量方面具有较好的一致性(表2,图3)。

PVI消融点空间偏移 对20例患者PVI术中环肺静脉隔离实际消融点至Cartosound FAM模型表面的最短距离进行测量,模型之外记为正值,模型之内记为负值(图4)。结果显示(表3):PVI左圈中,顶部区域消融点数为6(5,7)个,平均偏移距离为(7.38 ± 2.93)mm(显著偏向FAM外部);左上嵴部为5(5,6)个,偏移距离为(-0.86 ± 3.94)mm(多数位于内部);左下嵴部为4(3,4)个,偏移距离为(-2.36 ± 4.77)mm(明显偏向内部);底部为4(3,5)个,偏移距离为(-4.65 ± 4.94)mm(显著偏向内部);左下后壁为4.5(4,5)个,偏移距离为(0.48 ± 3.12)mm(接近边界略偏外部);左上后壁为5(4,6)个,偏移距离为(3.26 ± 2.62)mm(明显偏向外部);PVI右圈中,顶部为5(4,7)个,偏移距离为(3.68 ± 3.35)mm(偏向外部),右上后壁为5(4.25, 5.75)个,偏移



A:Posteroanterior view;B. Right anterior oblique view;C: Left lateral view;D: Right lateral view.

图2 Cartosound FAM建立的左心房模型

Fig 2 Left atrial model established by Cartosound FAM

表2 Cartosound FAM和Pentaray FAM测量左心房和肺静脉参数比较

Tab 2 Comparison of left atrium and pulmonary vein parameters measured by Cartosound FAM and Pentaray FAM

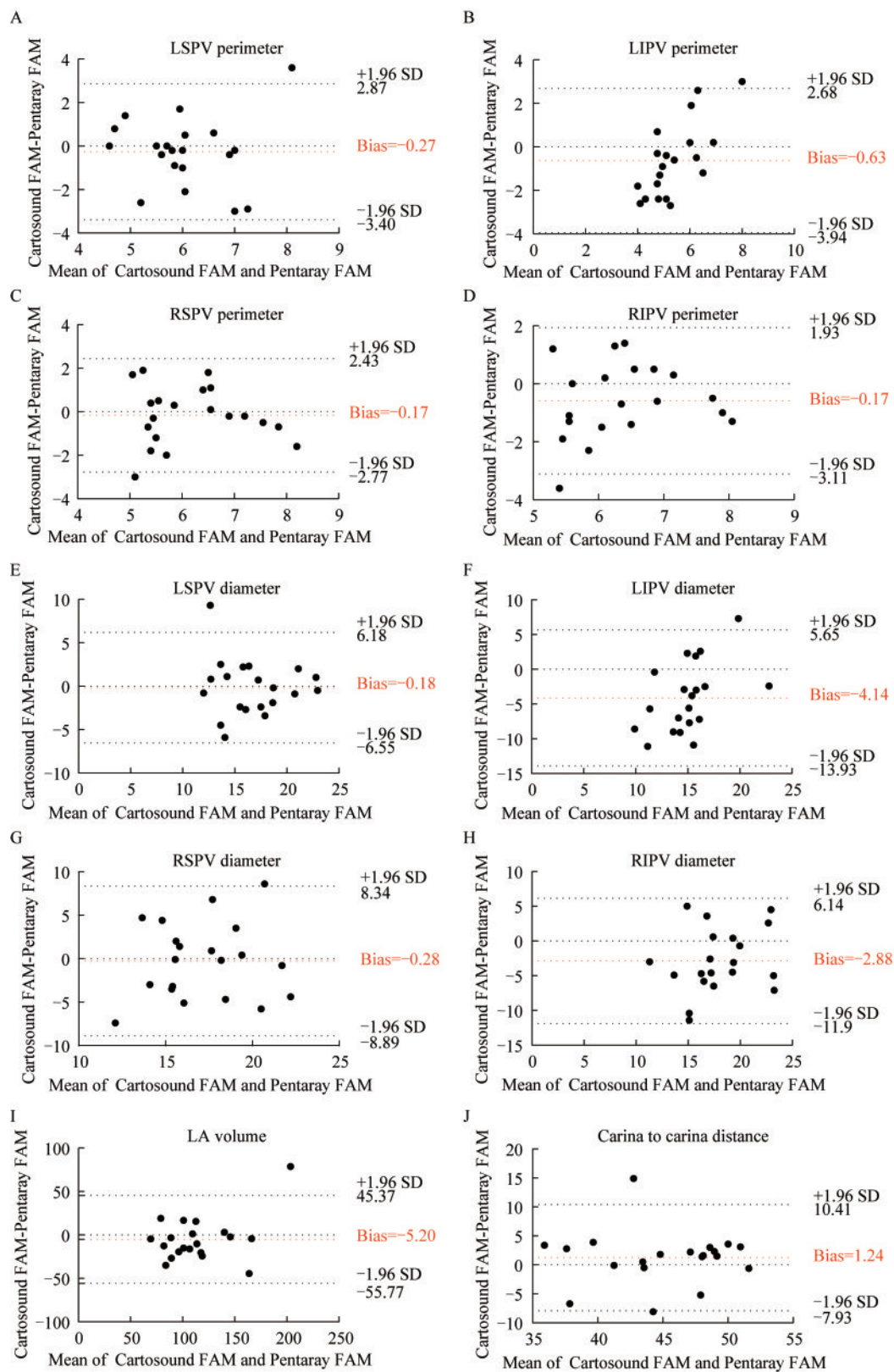
Parameters	Cartosound FAM	Pentaray FAM	[M(P ₂₅ ,P ₇₅) or $\bar{x} \pm s$]
			P
Number of ultrasound sectors	17.0 (14.8,20.0)	—	—
LA volume (mL)	106.97 (87.10,125.76)	108.62 (99.13,132.82)	0.414
LSPV perimeter (cm)	5.91 ± 1.21	6.17 ± 1.19	0.489
LIPV perimeter (cm)	5.72 ± 0.73	5.09 ± 1.73	0.141
RSPV perimeter (cm)	6.25 ± 1.20	6.46 ± 1.11	0.579
RIPV perimeter (cm)	6.67 ± 0.98	6.08 ± 1.14	0.087
LSPV diameter (mm)	16.81 ± 3.83	16.62 ± 3.58	0.875
LIPV diameter (mm)	17.08 ± 2.76	12.96 ± 4.65	0.001
RSPV diameter (mm)	17.33 ± 3.28	17.06 ± 3.73	0.808
RIPV diameter (mm)	19.38 ± 3.57	16.50 ± 4.46	0.030
Carina to carina (mm)	44.45 ± 5.25	45.69 ± 5.28	0.461

LA: Left atrial; LSPV: Left superior pulmonary vein; LIPV: Left inferior pulmonary vein; RSPV: Right superior pulmonary vein; RIPV: Right inferior pulmonary vein. FAM: Fast anatomical mapping.

距离为(0.32 ± 3.97)mm(接近边界略偏外部);右下后壁为5(4,7)个,偏移距离为(0.12 ± 2.21)mm(紧邻边界);底部为5(4,6)个,偏移距离为(-0.38 ± 3.41)mm(接近边界略偏内部);右下前壁为5(4,6)个,偏移距离为(1.51 ± 3.51)mm(偏向外部);右下后壁为6(5,6)个,偏移距离为(2.94 ± 1.76)mm(明显偏向外部)。总体表明,左圈实际的消融点底部及左下嵴部显著偏向 Cartosound FAM 内部,顶部及后壁偏向外部;右圈实际的消融点多数区域更接近边界或略向外部偏移;右圈空间偏移较左圈小,

实际消融点和 Cartosound FAM 的偏离存在明显解剖区域性差异(图5)。

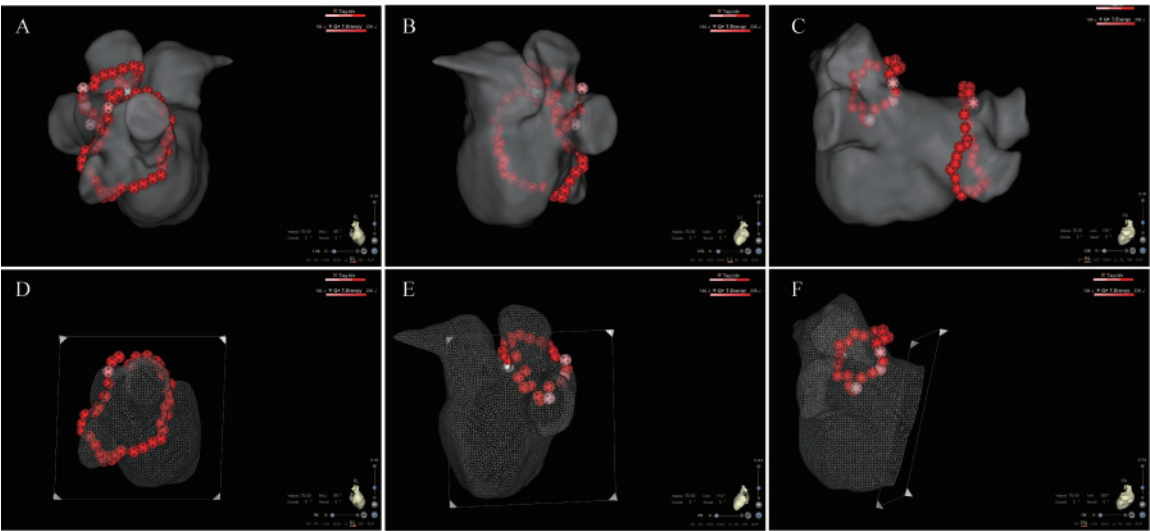
空间偏移和超声参数的相关性分析 上一步的统计分析提示消融的右圈、左圈和 Cartosound FAM 的空间符合程度较高,而左圈实际的消融点在底部、左上后壁、顶部有明显的偏移。进一步将左圈程度较大的偏移距离和 Cartosound FAM 所测量的部分指标进行 Pearson 相关性分析。结果提示左圈底部消融点的向上、向内偏移程度和 Cartosound FAM 测量的左心房容积存在中等的正



The bias and precision of the comparisons are depicted on the plots. The two black horizontal dashed lines at the top and bottom of the plot indicate the upper and lower limits of the 95% consistency limits, and the red horizontal dashed line indicates the location where the mean of the difference is 0.

图3 Cartosound FAM和Pentaray FAM的Bland-Altman Plot一致性评价

Fig 3 Bland-Altman plots comparing Cartosound FAM and Pentaray FAM



A: Right lateral view; B: Left lateral view; C: Posteroanterior view; D: Right lateral view showing only right circumferential ablation points; E: Left lateral view showing only left circumferential ablation points; F: Posteroanterior view showing only left circumferential ablation points.

图4 实际PVI消融点与Cartosound FAM模型空间拟合效果图

Fig 4 Spatial integration picture of actual PVI ablation points with the Cartosound FAM model

表3 PVI实际消融点到FAM模型的空间偏移
Tab 3 Spatial offset between the actual ablation sites during PVI and the FAM model [M(P₂₅,P₇₅) or $\bar{x} \pm s$]

PVI	Average number of ablation points	Spatial distance from ablation points to FAM
Left PVI		
Roof	6 (5,7)	7.38 ± 2.93
Left superior ridge	5 (5,6)	-0.86 ± 3.94
Left inferior ridge	4 (3,4)	-2.36 ± 4.77
Bottom	4 (3,5)	-4.65 ± 4.94
Left inferior posterior wall	4.5 (4,5)	0.48 ± 3.12
Left superior posterior wall	5 (4,6)	3.26 ± 2.62
Right PVI		
Roof	5 (4,7)	3.68 ± 3.35
Right superior posterior wall	5 (4,6)	0.32 ± 3.97
Right inferior posterior wall	5 (4,7)	0.12 ± 2.21
Bottom	5 (4,6)	-0.38 ± 3.41
Right inferior anterior wall	5 (4,6)	1.51 ± 3.51
Right superior anterior wall	6 (5,6)	2.94 ± 1.76

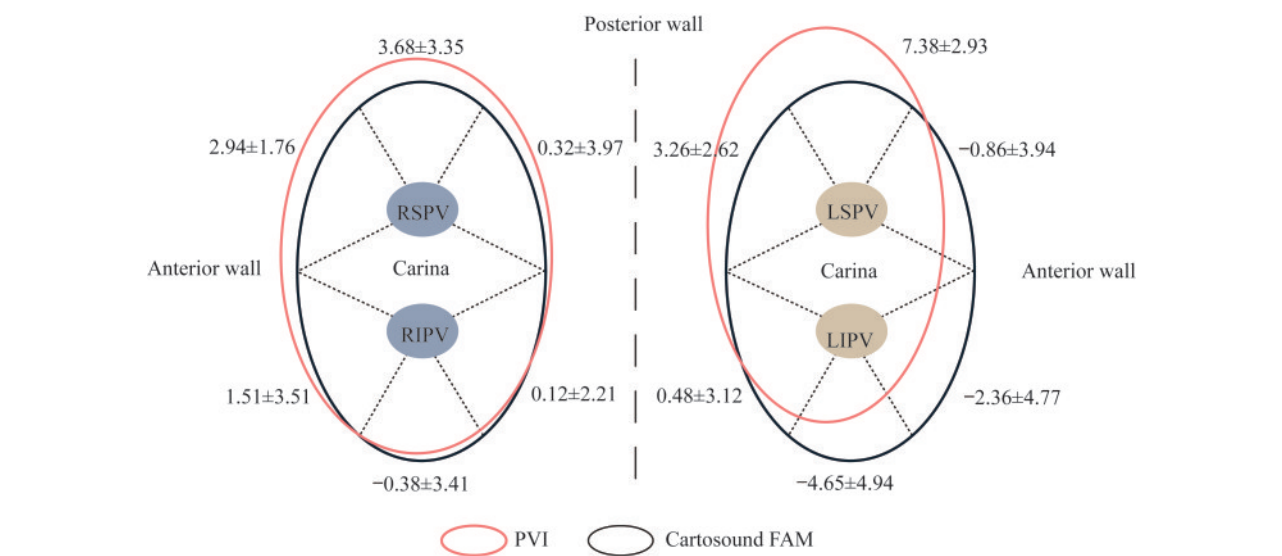
Negative values indicate points inside FAM, positive values indicate points outside FAM.

相关($P=0.029, r=0.487$),提示随着左心房容积增大,超声FAM建立的左肺静脉底部区域相较于实际的消融位置可能越低,顶部和左上后壁的偏离暂未发现和相关指标之间的相关性(表4)。

讨论

本研究首次系统性地术中同步对比了基于DL的ICE-Cartosound FAM与接触式Pentaray FAM在左心房建模中的几何差异,并深入分析了在Cartosound FAM模型引导下,实际PVI消融点的空间偏移规律。主要发现包括:(1)Cartosound FAM在大多数左心房及肺静脉参数测量上与Pentaray FAM高度一致,仅在双侧下肺静脉直径测量上存在差异;(2)实际消融点与Cartosound FAM模型之间存在具有解剖区域特异性的空间偏移模式;(3)左心房容积是影响左肺静脉底部区域偏移程度的重要因素。

不同成像方式获取的左心房模型在指导导管消融方面一直备受关注。2006年Martinek等^[4]首次将CTA左心房数据与CARTO系统FAM融合,结果显示CT图像可与FAM良好对齐,FAM点与CT模型表面间的平均距离仅为(1.6 ± 1.2)mm,证明其可有效指导环肺静脉消融。虽然左心房CTA被视为金标准,且既往研究也已验证Cartosound FAM与其具备良好一致性^[3,5],但在临床实践中,并非所有中心均能常规开展左心房CTA重建及与CARTO系统的整合操作,其流程复杂且耗时^[6]。随着ICE技术的迅速发展,评估Cartosound FAM



Ablation points in the left circular area deviated inward in the bottom and left inferior ridge regions and outward in the top and posterior wall regions relative to the Cartosound FAM model. In the right circular area, most ablation points were close to the boundary or slightly deviated outward.

图5 PVI实际消融点到FAM模型的空间偏移规律

Fig 5 Spatial offset characteristics between the actual ablation sites during PVI and the FAM model

表4 左圈空间偏移和超声参数的相关性分析

Tab 4 Correlation analysis between spatial deviation in the left circumferential area and ultrasound parameters

Left circumferential area	Cartosound FAM			
	LA volume	LSPV diameter	LSPV perimeter	Carina to carina
Roof	0.864	0.812	0.391	0.901
Left superior posterior wall	0.270	0.758	0.201	0.148
Bottom	0.029*	0.115	0.442	0.415

* $P<0.05$, $r=0.487$. FAM: Fast anatomical mapping; LA: Left atrial; LSPV: Left superior pulmonary vein.

能否进一步指导消融治疗,并分析实际PVI消融圈与其模型的空间偏差,具有重要临床意义。

本研究发现Cartosound FAM所测的下肺静脉直径普遍大于Pentaray FAM。这一差异可能源于方法学本身:Pentaray导管在进入向下走行的下肺静脉时,常需较大弯度,可能导致导管贴壁不充分或取点位置偏肺静脉深部,从而低估其真实开口直径。而ICE作为一种“远场”观测技术,能从整体视角更直观地显示肺静脉开口全貌,可能更接近真实解剖。这凸显了两种技术的互补价值——接触式标测精确反映导管可稳定接触的腔内轮廓,而非接触式超声成像可能更好地捕获解剖结构的自然形态^[7]。尽管存在这一差异,Bland-Altman分析仍表明,两种方法在所有测量指标上均具有良好的一致性,超过90%的测量偏差处于95%一致性界限内。

本研究揭示了PVI消融点与Cartosound FAM模型之间存在系统性、区域性的空间偏移。这种偏

移并非随机分布,左PVI圈表现为底部内偏、顶后外偏,而右PVI圈偏移较小且多近边界。其潜在机制可能涉及多方面:首先,超声物理特性的影响至关重要。超声波在组织中传播存在衰减和散射^[8],导致远离ICE导管(通常置于右房中部)的左心房结构,尤其是左肺静脉区域,图像分辨率和边界识别精度下降^[9]。这可能导致模型在远场(如左心房顶部、后壁)的边界被“平滑”或外推,而在近场(右肺静脉区域)则更为精确。其次,心脏搏动与呼吸运动的影响虽经门控技术校正,但残余的动态变化仍可能引入误差^[10]。再者,解剖与操作因素也不容忽视。左心房消融时导管往往需要施加一定压力以确保组织接触^[11],这可能使实际消融点较模型预设的“内膜面”更偏向心肌深层(模型内部)。本研究发现的左心房容积与底部偏移的正相关性($r=0.487$, $P=0.029$)支持这一推测,因为更大的左心房可能伴随更复杂的底部结构和更大的操作变异性。

认识并量化这种空间偏移规律具有直接的临床指导价值。若单纯依赖 Cartosound FAM 模型进行消融导航,需意识到模型在某些区域(如左心房底部)可能存在低估,而在另一些区域(如左心房顶部)存在高估。因此,在临床实践中,将 Cartosound FAM 与 Pentaray FAM 进行融合或互补使用是更为理想的策略。Cartosound FAM 可提供快速的初始解剖框架和心腔内实时导航,尤其在 Pentaray 导管难以稳定贴靠的区域(如右下肺静脉)显示优势;随着 AI 算法的进步,或可基于本研究发现的偏移规律开发出智能补偿算法,对超声模型进行区域性校正,从而进一步提升其指导消融的绝对精度。

本研究存在一定的局限性。作为一项单中心、小样本的先导性探索性研究,病例数相对有限,然而每个病例贡献的消融点测量数据较为密集且高质量,并通过精细化的测量揭示了 FAM 指导下的空间偏移规律。未来需要多中心、大样本的前瞻性研究,进一步验证该规律的普适性,并探索减少偏移的优化策略。

综上所述, Cartosound FAM 在左心房容积和肺静脉结构测量方面表现出良好的准确性,实际 PVI 消融点与其模型间的偏移呈现明显的解剖区域性规律,认识这种空间偏移规律具有直接的临床指导价值,在此基础上有望进一步优化心腔内超声的操作流程,进一步提升房颤消融的手术效率和操作精度。

作者贡献声明 赵奕凯 研究设计,数据整理和分析,论文撰写和制图。熊楠青,王逸明,李慧洋 数据采集及整理。傅平,范月芹,高稳 数据采集,文献调研。罗心平 研究构思,论文指导。李剑 研究设计,论文指导。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

[1] Sousonis V, Asvestas D, Vavouris E, *et al.* The use of intracardiac echocardiography in catheter ablation of atrial

- fibrillation[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2024, 26(9):893-901.
- [2] Romero J, Patel K, Briceno D, *et al.* Fluoroless atrial fibrillation catheter ablation: technique and clinical outcomes[J]. *Card Electrophysiol Clin*, 2020, 12(2):233-245.
- [3] Di Biase L, Zou F, Lin AN, *et al.* Feasibility of three-dimensional artificial intelligence algorithm integration with intracardiac echocardiography for left atrial imaging during atrial fibrillation catheter ablation[J]. *Europace*, 2023, 25(9):eua211.
- [4] Martinek M, Nesser HJ, Aichinger J, *et al.* Accuracy of integration of multislice computed tomography imaging into three-dimensional electroanatomic mapping for real-time guided radiofrequency ablation of left atrial fibrillation-influence of heart rhythm and radiofrequency lesions[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2006, 17(2):85-92.
- [5] Maragiannis K, Benz DC, Saguner AM, *et al.* Cardiac CT for electrophysiological interventions[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2025, 41(7):1259-1275.
- [6] Bugenhagen S, Kolluri N, Tan NY, *et al.* Utility of CT and MRI in cardiac electrophysiology[J]. *Radiographics*, 2024, 44(9):e230222.
- [7] Virk SA, Ariyaratnam J, Bennett RG, *et al.* Updated systematic review and meta-analysis of the impact of contact force sensing on the safety and efficacy of atrial fibrillation ablation: discrepancy between observational studies and randomized control trial data[J]. *Europace*, 2019, 21(2):239-249.
- [8] Yoshifuku S, Chen S, McMahon E, *et al.* Parametric detection and measurement of perfusion defects in attenuated contrast echocardiographic images[J]. *J Ultrasound Med*, 2007, 26(6):739-748.
- [9] Little SH, Rigolin VH, Garcia-Sayan E, *et al.* Recommendations for special competency in echocardiographic guidance of structural heart disease interventions: from the american society of echocardiography[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2023, 36(4):350-365.
- [10] Khan F, Banchs JE, Skibba JB, *et al.* Determination of left atrium volume by fast anatomical mapping and intracardiac echocardiography. The contribution of respiratory gating[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2015, 42(2):129-134.
- [11] Ullah W, Schilling RJ, Wong T. Contact force and atrial fibrillation ablation[J]. *J Atr Fibrillation*, 2016, 8(5):1282.

(收稿日期:2025-10-11; 编辑:王蔚)