

心脏正中开胸术后膈肌功能障碍的影像学特征及临床评估

朱心愿¹ 吴大伟¹ 张昊¹ 林晨² 翟红燕²

¹天津医科大学总医院心血管外科,天津 300052;²天津医科大学总医院超声科,天津 300052

朱心愿现在天津市第五中心医院心脏大血管外科,天津 300032

通信作者:翟红燕,Email:zhaihongyannihao2009@126.com

【摘要】 目的 应用膈肌超声联合胸部 CT 分析择期心脏正中开胸术后膈肌功能障碍患者的影像学及临床特征。**方法** 采用前瞻性队列研究方法,选择 2023 年 6 月至 9 月天津医科大学总医院心血管外科收治的接受心脏正中开胸手术的成人患者作为研究对象。分别于术前 1 d、术后拔管 24 h、术后 7 d 进行床旁膈肌超声检查,测量双侧膈肌移动度(DE)、膈肌厚度(DT),并计算膈肌增厚率(DTF);分别于手术前后进行胸部 CT 检查,在正位定位像测量双侧膈肌顶点至胸廓顶点的距离,计算膈肌抬高率(DEF)。根据术后 7 d 是否发生膈肌功能障碍(DE<1 cm)将患者分为两组;分析两组患者影像学指标变化规律;比较两组患者术前、术中及术后临床资料。**结果** 最终共 67 例接受心脏正中开胸手术的患者纳入分析,其中 24 例于术后拔管 24 h 发生膈肌功能障碍;术后 7 d 仍有 19 例发生膈肌功能障碍(占 28.4%),48 例未发生膈肌功能障碍(占 71.6%)。膈肌超声检查显示,与非膈肌功能障碍组比较,膈肌功能障碍组患者手术前后 DE 和 DTF 均有不同程度下降,以左侧下降更为显著,术后 7 d 差异均有统计学意义[DE(cm): 1.06 ± 0.77 比 1.59 ± 0.63 ,DTF:19.3%(14.8%,21.1%)比 21.3%(18.3%,26.1%),均 $P<0.05$];而两组各时间点 DT 差异无统计学意义。非膈肌功能障碍组患者双侧 DE 及 DTF 均随时间延长呈先下降后升高趋势,术后 7 d 恢复至术前 1 d 水平;膈肌功能障碍组双侧 DE 及 DTF 均未见与时间相关的变化趋势。术前 1 d 两组组内双侧 DE 差异均无统计学意义;术后拔管 24 h 和术后 7 d,膈肌功能障碍组患者左侧 DE 均显著低于右侧(cm:术后拔管 24 h 为 0.93 ± 0.72 比 1.45 ± 0.70 ,术后 7 d 为 1.06 ± 0.77 比 1.70 ± 0.92 ,均 $P<0.05$),而双侧 DT 及 DTF 差异无统计学意义。胸部 CT 检查显示,67 例患者中有 41 例(占 61.2%)术后发生膈肌抬高,26 例(占 38.8%)未发生膈肌抬高;两组组间及组内双侧 DEF 差异无统计学意义。临床资料分析显示,与非膈肌功能障碍组比较,膈肌功能障碍组患者术前心房颤动、肺动脉高压及术后高流量吸氧、肺炎比例更高[心房颤动:36.8%(7/19)比 10.4%(5/48),肺动脉高压:15.8%(3/19)比 2.1%(1/48),高流量吸氧:52.6%(10/19)比 25.0%(12/48),肺炎:73.7%(14/19)比 45.8%(22/48),均 $P<0.05$],机械通气时间和重症监护病房(ICU)住院时间更长[机械通气时间(h):47.0(38.0,73.0)比 24.5(20.0,48.0),ICU 住院时间(h):69.0(65.0,117.5)比 60.0(42.3,90.6),均 $P<0.05$]。**结论** 心脏正中开胸术后膈肌功能障碍发生率较高,且大部分患者呈现术后膈肌功能早期一过性减弱,随后迅速恢复到术前水平的特点,以左侧更为显著。膈肌功能障碍患者与心房颤动、肺动脉高压相关,术后肺炎发生率较高,机械通气时间及 ICU 住院时间较长。

【关键词】 膈肌功能障碍; 心脏正中开胸手术; 膈肌移动度; 膈肌增厚率; 胸部 CT

基金项目: 中华国际医学交流基金会第五届心血管多学科整合思维研究基金(2022-N-01-18); 国家临床重点专科建设项目(2023283)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250116-00062

Imaging and clinical features of diaphragm dysfunction after cardiac sternotomy

Zhu Xinyuan¹, Wu Dawei¹, Zhang Hao¹, Lin Chen², Zhai Hongyan²

¹Department of Cardiac and Vascular Surgery, General Hospital of Tianjin Medical University, Tianjin 300052, China;

²Department of Ultrasound, General Hospital of Tianjin Medical University, Tianjin 300052, China

Zhu Xinyuan is working on the Department of Cardiac and Vascular Surgery, Tianjin Fifth Central Hospital, Tianjin 300032, China

Corresponding author: Zhai Hongyan, Email: zhaihongyannihao2009@126.com

【Abstract】 Objective To analyze the imaging and clinical features of diaphragm dysfunction in patients who underwent selective cardiac sternotomy with diaphragm ultrasound and chest CT. **Methods** A prospective cohort study was conducted. The patients undergoing selective cardiac sternotomy in the cardiac and vascular surgery department of Tianjin Medical University General Hospital from June to September 2023 were enrolled. Bedside ultrasound was performed on the day before surgery, within 24 hours of extubation, and on the 7th day after surgery to measure diaphragm excursion (DE) and diaphragm thickness (DT), and to calculate the diaphragm thickening fraction (DTF). The distance from the diaphragm's apex to the thorax's apex in the chest CT scout view was measured before and after the operation, and the diaphragm elevating fraction (DEF) was calculated. Patients were divided into two groups based on whether diaphragm dysfunction (DE < 1 cm) occurred on the 7th day after surgery. The change patterns of imaging indicators were analyzed

in both groups. The clinical data of both groups before, during, and after surgery were compared. **Results** In total, 67 patients who underwent cardiac sternotomy were enrolled. Among them, 24 patients developed diaphragm dysfunction within 24 hours after extubation; on the 7th day after surgery, 19 patients (28.4%) still exhibited diaphragm dysfunction, while 48 patients (71.6%) did not. Ultrasonic examination of the diaphragm revealed that, compared with the non-diaphragm dysfunction group, patients in the diaphragm dysfunction group exhibited varying degrees of decrease in DE and DTF before and after surgery, with a more significant decrease on the left side, and the differences were statistically significant on the 7th day after surgery [DE (cm): 1.06 ± 0.77 vs. 1.59 ± 0.63 , DTF: 19.3% (14.8%, 21.1%) vs. 21.3% (18.3%, 26.1%), both $P < 0.05$]. There was no statistically significant difference in DT between the two groups at each time point. Changes in bilateral DE and DTF revealed that the non-diaphragm dysfunction group experienced early transient postoperative weakening of diaphragm function, followed by rapid recovery to the preoperative level on the 7th day after surgery, unlike the diaphragm dysfunction group. There were no significant differences between bilateral DE in the two groups on the day before surgery, and the left DE was significantly lower than the right DE within 24 hours after extubation and on the 7th day after surgery in the diaphragm dysfunction group (cm: 0.93 ± 0.72 vs. 1.45 ± 0.70 within 24 hours after extubation, 1.06 ± 0.77 vs. 1.70 ± 0.92 on the 7th day after surgery, both $P < 0.05$) but no significant difference was found in bilateral DT or DTF. The chest CT scan showed that, the incidence of postoperative diaphragm elevation was 61.2% (41/67), and 38.8% (26/67) did not, while no statistically significant difference in DEF was found between the two groups, nor within each group on both sides. Analysis of the clinical data showed a higher proportion of atrial fibrillation and pulmonary hypertension before surgery [atrial fibrillation: 36.8% (7/19) vs. 10.4% (5/48), pulmonary hypertension: 15.8% (3/19) vs. 2.1% (1/48), both $P < 0.05$], a higher incidence of high-flow oxygenation and pneumonia during surgery [high-flow oxygenation: 52.6% (10/19) vs. 25.0% (12/48), pneumonia: 73.7% (14/19) vs. 45.8% (22/48), both $P < 0.05$], and a longer duration of mechanical ventilation and length of intensive care unit (ICU) stay [duration of mechanical ventilation (hours): 47.0 (38.0, 73.0) vs. 24.5 (20.0, 48.0), length of ICU stay (hours): 69.0 (65.0, 117.5) vs. 60.0 (42.3, 90.6), both $P < 0.05$] in the diaphragm dysfunction group as compared with those in the non-diaphragm dysfunction group. **Conclusions** There was a high incidence of diaphragm dysfunction after cardiac sternotomy, which reflected the early transient postoperative weakening of diaphragm function, followed by rapid recovery to the preoperative level in most patients, predominantly on the left side. Diaphragm dysfunction, which was associated with atrial fibrillation and pulmonary hypertension significantly increased the incidence of postoperative pneumonia and prolonged the duration of mechanical ventilation and length of ICU stay.

【Key words】 Diaphragm dysfunction; Cardiac sternotomy; Diaphragm excursion; Diaphragm thickening fraction; Chest CT

Fund program: The Fifth Cardiovascular Multidisciplinary Integration Research Fund of China International Medical Foundation Project (2022-N-01-18); National Key Clinical Specialty Construction Project of China (2023283)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250116-00062

膈肌功能障碍是心脏正中开胸手术后常见并发症,发生率 1.2% ~ 60.0%^[1],表现为膈肌膨出、膈肌无力和膈肌麻痹,其病因包括神经源性(从大脑皮质开始,经过内囊、中枢神经系统、脊髓、臂丛神经、运动神经元及膈神经)和肌源性(膈肌本身)^[2]。在心脏正中开胸手术中,膈神经因其解剖位置(与心包、乳内动脉贴近)及血液供应(由乳内动脉分支供血)的特点,易受机械或低温损伤(phrenic nerve injury, PNI)。心脏开胸术后患者还有可能发生机械通气相关性膈肌功能障碍(ventilation-induced diaphragmatic dysfunction, VIDD),表现为膈肌肌纤维改变,收缩功能异常,引起机械通气时间延长,形成恶性循环^[3]。膈肌功能障碍患者心脏术后肺炎发生率较高,机械通气和重症监护病房(intensive care unit, ICU)住院时间较长^[1]。说明心脏术后肺部并发症(postoperative pulmonary complication, PPC)亦与膈肌功能障碍密切相关。双侧膈肌功能障碍通常表现为呼吸急促和呼吸困难,伴明显辅助呼吸肌活动;然而,临床上大量心脏开胸术后患者可能存在无症状单侧膈肌功能障碍,如未接受影像学检查,可能被忽视,导致心脏

开胸术后膈肌功能障碍发生率被低估。

在膈肌功能评估方法中,跨膈压是诊断肌源性膈肌功能障碍的“金标准”,利用电刺激膈神经诱发膈肌收缩;神经电图与肌电图描记则用于诊断神经源性膈肌功能障碍,电刺激大脑皮质运动区、脊神经根等,记录膈肌的动作电位,计算中枢运动传导时间,从而评估膈神经功能^[2]。然而,心脏手术常放置临时起搏器,是上述两项检查的禁忌证^[4],且为有创检查,需要专业人员与设备,无法于床旁操作。膈肌超声具有无创、便携及诊断膈肌功能障碍的敏感度和特异度高(分别为 93%、100%)^[5]等优点,通过观察膈肌移动度(diaphragm excursion, DE)、膈肌厚度(diaphragm thickness, DT)、膈肌增厚率(diaphragm thickening fraction, DTF)等指标,可在床旁对膈肌功能进行动态连续评估。目前两项涉及膈肌超声的国际专家共识均推荐以 DE 作为膈肌评估的基本指标,而 DTF 用于评估膈肌功能尚未达成共识^[6-7]。胸部 X 线中膈肌抬高率(diaphragm elevating fraction, DEF)超过 30% 的患者极有可能存在 PNI^[8],然而单独应用胸部 X 线诊断的敏感度及特异度均较低(分别为

66.6%、44.0%)^[9]。这是因为膈肌抬高的影像学表现缺乏特异性,单侧膈肌抬高也可见于肺不张、肺叶切除术、肺纤维化等。胸部 CT 定位像与胸部 X 线类似,也可作为静态影像学技术评估膈肌位置。目前鲜见将胸部 CT 提示心脏开胸术后膈肌抬高与膈肌超声指标结合的研究。本研究旨在应用膈肌超声联合胸部 CT 对心脏正中开胸术后患者膈肌功能进行影像学评估,并分析临床特征,以期帮助临床医生早期识别心脏开胸术后膈肌功能障碍,预防相关并发症。

1 资料与方法

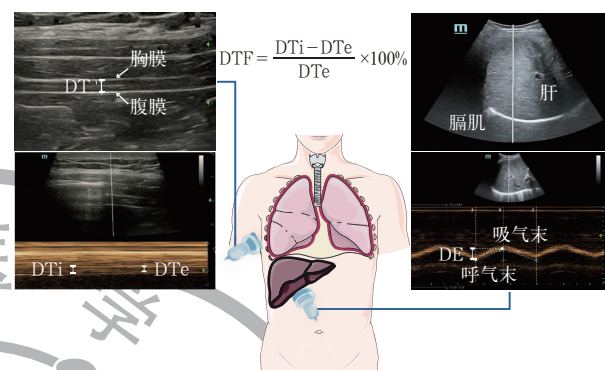
1.1 研究对象:采用前瞻性队列研究方法,研究方案符合医学伦理学标准,得到医院医学伦理委员会批准(审批号:IRB-2024-YX-343-01)。选择 2023 年 6 月至 9 月天津医科大学总医院心血管外科收治的接受心脏正中开胸手术的成人患者作为研究对象,排除急诊手术、术前存在膈肌麻痹或影像学检查提示膈肌抬高或存在慢性神经肌肉疾病的患者。

1.2 资料收集及分组:收集患者术前资料[人口统计学数据、病史、器官功能检查结果(胸部 CT、超声心动图、冠状动脉造影、心电图、肺功能等)]、术中资料[手术类型、体外循环(cardiopulmonary bypass, CPB)时间、主肺动脉阻断(aortic cross clamping, ACC)时间、冠状动脉旁路移植术(coronary artery bypass grafting, CABG)吻合次数等]及术后资料(并发症、机械通气情况、ICU 住院时间、总住院时间等)。根据术后 7 d 患者是否发生膈肌功能障碍分为两组^[6-7]。

1.3 超声检查方法:选用迈瑞 M9 型便携式多普勒超声系统,连接 2~5 MHz 凸阵探头测量 DE,并连接 5~12 MHz 线阵探头测量 DT。患者取仰卧位,在安静和无辅助呼吸的情况下,分别于术前 1 d、术后拔管 24 h、术后 7 d 进行床旁超声检查。若患者出现呼吸衰竭或临床怀疑有膈肌功能障碍,则在术后 7 d 前补充检查。

右侧 DE 的测量位点在右侧锁骨中线至腋前线之间,探头置于患者肋弓下缘,获取右侧膈顶切面;左侧 DE 的测量位点在左侧腋前线至腋后线之间,探头置于第九~十一肋间隙,获取左侧脾肾切面。切换 M 模式,设置图像滚动速度为 10 mm/s,观察 3 个平静呼吸周期,分别测量最高点(吸气末)至最低点(呼气末)的位移,取平均值作为 DE 的测量值(图 1)。单侧膈肌功能障碍定义为 DE<1 cm,膈肌麻痹定义为膈肌无运动(DE=0 cm)或矛盾运动(吸气时膈肌上升)^[6-7]。DT 的测量位点在第八~十肋间隙,需正

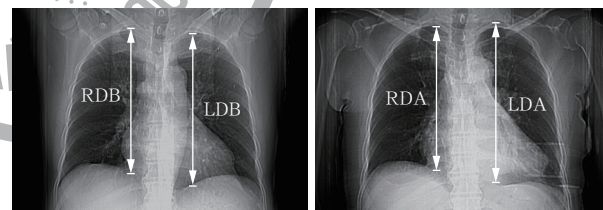
确识别胸膜与腹膜(高回声线样结构)间的低回声肌肉组织,使声束与膈肌尽量垂直,观察 3 个平静呼吸周期,测量吸气末 DT(DT at the end of inspiration, DTi)和呼气末 DT(DT at the end of expiration, DTe),测量 DT 不包括胸膜及腹膜线,取 DTe 平均值作为 DT 的测量值(图 1)。DTF=(DTi-DTe)/DTe×100%。



注:DT 为膈肌厚度,DTi 为吸气末膈肌厚度,DTe 为呼气末膈肌厚度,DTF 为膈肌增厚率,DE 为膈肌移动度

图 1 床旁超声测量心脏正中开胸手术患者膈肌功能指标的方法

1.4 胸部 CT 检查方法:在胸部 CT 正位定位像测量手术前后双侧膈肌顶点至胸廓顶点距离,观察术后是否存在膈肌抬高及抬高程度(图 2)。胸部 CT 正位定位像统一于深吸气末屏气后获得。DEF=(术前距离-术后距离)/术前距离×100%。



注:RDB 为右侧术前距离,LDB 为左侧术前距离,RDA 为右侧术后距离,LDA 为左侧术后距离;膈肌抬高率(DEF)=(术前距离-术后距离)/术前距离×100%

图 2 胸部 CT 正位定位像测量心脏正中开胸手术患者膈肌功能指标的方法

1.5 统计学处理:应用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。计量资料经正态性检验(Shapiro-Wilk 检验)及方差齐性检验后,符合正态分布且方差齐的资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用两独立样本 *t* 检验,多组间比较采用单因素方差分析,组间两两比较采用 LSD 法;不符合正态分布或方差不齐的资料以中位数(四分位数)[$M(Q_1, Q_3)$]表示,两组间比较采用 Mann-Whitney *U* 检验,多组间比较采用 Kruskal-Wallis *H* 检验,组间两两比较采用 Dunn 法。定性资料以频数和百分比表示,组间比较采用 χ^2 检

验;当理论频数 <5 时,采用 Fisher 确切概率法。检验水准取双侧 α 值 0.05。

2 结果

2.1 一般资料:共有 104 例患者接受心脏外科手术,经筛选后最终纳入 67 例患者(图 3)。术后拔管 24 h 24 例患者发生膈肌功能障碍,其中 3 例为双侧,21 例为单侧(左侧 15 例,右侧 6 例);术后 7 d 19 例患者发生膈肌功能障碍,其中 2 例为双侧,17 例为单侧(左侧 11 例,右侧 6 例),有 3 例为新发膈肌功能障碍(左侧 2 例,右侧 1 例)。术后拔管 24 h 有 5 例患者存在膈肌麻痹(左侧 4 例,右侧 1 例),持续至术后 7 d。

接受心脏正中开胸术患者 ($n=104$)

排除

- ① 非胸骨切开术 ($n=22$);
- ② 急诊手术 ($n=2$);
- ③ 术前存在膈肌麻痹 ($n=1$);
- ④ 年龄 <18 岁 ($n=1$)

初筛纳入患者 ($n=78$)

排除

图像质量差或检查缺失 ($n=11$)

最终纳入患者 ($n=67$)

图 3 心脏正中开胸术后膈肌功能障碍的影像学特征及临床评估研究对象纳入流程

2.2 超声测量膈肌功能指标(图 4;表 1)

2.2.1 DE:67 例患者在 3 个时间点均接受了 DE 检查。结果显示,非膈肌功能障碍组双侧 DE 均呈现与时间相关的显著变化过程:以术前 1 d 作为基线参考值,术后拔管 24 h 双侧 DE 均显著减弱,术后 7 d 恢复至基线水平;膈肌功能障碍组双侧 DE 未见上述与时间相关的变化趋势。术前 1 d 两组组内双侧 DE 差异均无统计学意义(均 $P>0.05$);术后拔管 24 h 和术后 7 d 膈肌功能障碍组患者左侧 DE 均显著低于右侧(均 $P<0.05$),而非膈肌功能障碍组双侧 DE 差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。

2.2.2 DT 及 DTF:57 例患者在 3 个时间点接受了 DT 及 DTF 测量(10 例因敷料遮挡、体位受限及声窗不

佳,未予测量)。结果显示,两组间 3 个时间点双侧 DT 差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。术前 1 d,两组组内双侧 DT 差异无统计学意义(均 $P>0.05$);术后拔管 24 h 和术后 7 d,非膈肌功能障碍组左侧 DT 显著低于右侧(均 $P<0.05$),而膈肌功能障碍组双侧 DT 差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。与 DE 类似,非膈肌功能障碍组双侧 DTF 也存在随时间变化的特点:与术前 1 d 相比,术后拔管 24 h 双侧 DTF 显著降低(均 $P<0.05$),术后 7 d 恢复至基线水平;膈肌功能障碍组各时间点双侧 DTF 差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。膈肌功能障碍组术后 7 d 左侧 DTF 显著低于非膈肌功能障碍组($P<0.05$),术前 1 d 及术后拔管 24 h 两组间双侧 DTF 差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。

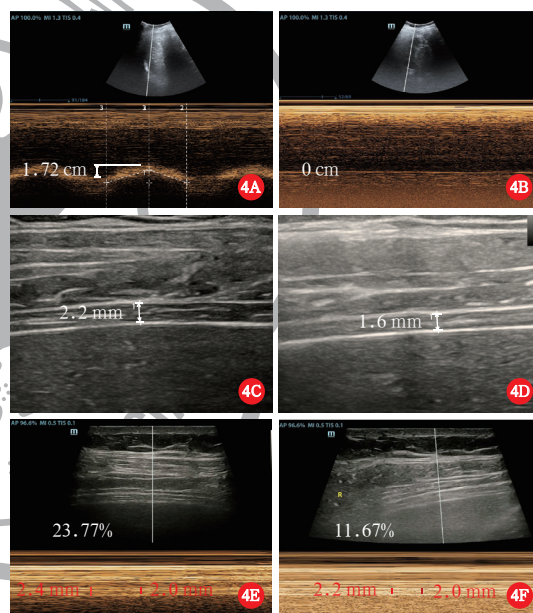


图 4 心脏正中开胸术后膈肌功能障碍患者手术前后床旁超声影像学表现:1 例 59 岁女性患者心脏瓣膜术前 1 d 左侧膈肌移动度(DE)为 1.72 cm(A),术后 7 d 左侧 DE 为 0 cm(B),较术前显著降低;1 例 33 岁男性患者心脏瓣膜术前 1 d 右侧膈肌厚度(DT)为 2.2 mm(C),术后 7 d 右侧 DT 为 1.6 mm(D),较术前减少约 27%;1 例 64 岁男性患者冠状动脉旁路移植术前 1 d 右侧膈肌增厚率(DTF)为 23.77%(E),术后 7 d 右侧 DTF 为 11.67%(F),较术前显著下降

表 1 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术患者手术前后不同时间点超声检查膈肌功能指标变化比较

组别	时间	DE (cm, $\bar{x} \pm s$)		DT (mm, $\bar{x} \pm s$)		DTF [% , $M(Q_1, Q_3)$]	
		右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧
非膈肌功能障碍组	术前 1 d	1.86 $\pm$ 0.72 (48)	1.66 $\pm$ 0.54 (48)	1.92 $\pm$ 0.40 (41)	1.83 $\pm$ 0.36 (41)	20.0 (15.9, 23.7) (41)	21.3 (17.1, 28.3) (41)
	术后拔管 24 h	1.47 $\pm$ 0.44 (48) ^a	1.41 $\pm$ 0.42 (48) ^a	1.85 $\pm$ 0.37 (41)	1.69 $\pm$ 0.33 (41) ^c	16.9 (13.6, 20.7) (41) ^a	17.5 (14.0, 23.1) (41) ^a
	术后 7 d	1.81 $\pm$ 0.60 (48) ^b	1.59 $\pm$ 0.63 (48) ^b	1.79 $\pm$ 0.32 (41)	1.65 $\pm$ 0.31 (41) ^c	19.5 (16.7, 24.2) (41) ^b	21.3 (18.3, 26.1) (41) ^b
膈肌功能障碍组	术前 1 d	1.60 $\pm$ 0.41 (19)	1.46 $\pm$ 0.79 (19)	1.76 $\pm$ 0.34 (16)	1.72 $\pm$ 0.42 (16)	21.0 (15.4, 24.7) (16)	21.1 (16.8, 25.2) (16)
	术后拔管 24 h	1.45 $\pm$ 0.70 (19)	0.93 $\pm$ 0.72 (19) ^{cd}	1.79 $\pm$ 0.36 (16)	1.66 $\pm$ 0.36 (16)	16.7 (12.7, 21.5) (16)	17.9 (12.5, 19.8) (16)
	术后 7 d	1.70 $\pm$ 0.92 (19)	1.06 $\pm$ 0.77 (19) ^{cd}	1.73 $\pm$ 0.34 (16)	1.67 $\pm$ 0.36 (16)	18.2 (15.4, 24.9) (16)	19.3 (14.8, 21.1) (16) ^d

注:DE 为膈肌移动度,DT 为膈肌厚度,DTF 为膈肌增厚率;与本组同侧术前 1 d 比较,^a $P<0.05$;与本组同侧术后拔管 24 h 比较,^b $P<0.05$;与本组同期右侧比较,^c $P<0.05$;与非膈肌功能障碍组同期同侧比较,^d $P<0.05$;括号内为病例数

2.3 胸部 CT 测量膈肌功能指标 (图 5; 表 2):67 例患者均于术前及术后(8.0±3.4)d 接受了胸部 CT 检查, 41 例术后发生膈肌抬高(61.2%), 29 例为双侧, 12 例为单侧(右侧 4 例, 左侧 8 例)。两组患者组间及组内双侧 DEF 差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。

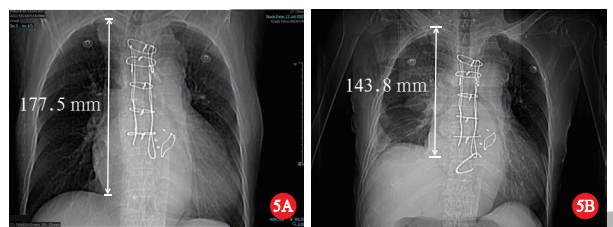


图 5 1 例 63 岁女性心脏正中开胸术后膈肌功能障碍患者手术前后胸部 CT 影像学表现 心脏瓣膜术前 1 d 右侧膈肌顶点至胸廓顶点距离为 177.5 mm (A), 术后 7 d 距离为 143.8 mm (B), 提示右侧膈肌明显抬高, 膈肌抬高率 (DEF) 为 18.99%

表 2 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术患者术后胸部 CT 检查膈肌功能指标比较 (% , $\bar{x} \pm s$)				
组别	例数 (例)	膈肌抬高率		
		右侧	左侧	
非膈肌功能障碍组	48	0.08±11.03	-0.22±9.76	
膈肌功能障碍组	19	3.58±11.29	4.38±8.98	
t 值		1.161	1.778	
P 值		0.250	0.080	

2.4 临床资料

2.4.1 术前资料:膈肌功能障碍组患者心房颤动、术前肺动脉高压〔肺动脉压 (pulmonary artery pressure, PAP) ≥ 50 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa)] 比例显著高于非膈肌功能障碍组(均 $P<0.05$; 表 3)。共 42 例患者术前接受了肺功能检查; 两组患者术前肺功能指标差异均无统计学意义(均 $P>0.05$; 表 4)。

表 3 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术患者主要术前临床资料比较				
指标	非膈肌功能障碍组 (n=48)	膈肌功能障碍组 (n=19)	χ^2/t 值	P 值
男性〔例 (%)〕	37 (77.1)	11 (57.9)	2.467	0.116
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	60.7±11.1	64.1±9.9	1.166	0.248
BMI (kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	25.6±3.5	24.6±3.8	-1.094	0.278
吸烟史〔例 (%)〕	23 (47.9)	10 (52.6)	0.121	0.728
高血压〔例 (%)〕	25 (52.1)	9 (47.4)	0.121	0.728
糖尿病〔例 (%)〕	15 (31.2)	8 (42.1)	0.711	0.399
血脂异常〔例 (%)〕	8 (16.7)	5 (26.3)	0.311	0.577
脑血管疾病〔例 (%)〕	13 (27.1)	4 (21.1)	0.040	0.842
心房颤动〔例 (%)〕	5 (10.4)	7 (36.8)	4.793	0.029
外周血管病变〔例 (%)〕	21 (43.8)	7 (36.8)	0.267	0.605
心脏手术史〔例 (%)〕	10 (20.8)	3 (15.8)	0.016	0.898
术前 LVEF<0.50〔例 (%)〕	7 (14.6)	4 (21.1)	0.078	0.781
术前肺动脉高压〔例 (%)〕	1 (2.1)	3 (15.8)	4.555	0.033

注: BMI 为体质质量指数, LVEF 为左室射血分数; 肺动脉高压定义为肺动脉压 (PAP) ≥ 50 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa)

表 4 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术且术前接受肺功能检查患者术前肺功能指标比较 ($\bar{x} \pm s$)				
组别	例数 (例)	FVC (L)	FVC% (%)	FEV1/FVC 比值
非膈肌功能障碍组	31	3.25±0.86	89.3±18.4	76.8±8.6
膈肌功能障碍组	11	2.87±0.73	90.3±13.9	75.6±8.7
t 值		-1.342	0.161	-0.385
P 值		0.187	0.873	0.702

注: FVC 为用力肺活量, FVC% 为用力肺活量占预计值百分比, FEV1/FVC 为第 1 秒用力呼气容积/用力肺活量比值

2.4.2 术中资料:两组患者术中资料差异均无统计学意义(均 $P>0.05$; 表 5)。35 例患者应用了 CPB, 两组 CPB 时间和 ACC 时间差异均无统计学意义(均 $P>0.05$; 表 6)。32 例患者接受了 CABG, 膈肌功能障碍组与非膈肌功能障碍组患者 CABG 吻合次数差异无统计学意义(次: 3.6±0.7 比 3.8±0.9, $P>0.05$)。

表 5 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术患者主要术中临床资料比较				
指标	非膈肌功能障碍组 (n=48)	膈肌功能障碍组 (n=19)	χ^2/t 值	P 值
手术类型〔例 (%)〕				
CABG	23 (47.9)	9 (47.4)	0.002	0.968
瓣膜手术	14 (29.2)	7 (36.8)	0.373	0.542
主动脉瓣手术	3 (6.2)	0 (0)	Fisher	0.553
二尖瓣手术	5 (10.4)	1 (5.3)	0.037	0.848
三尖瓣手术	0 (0)	2 (10.5)	Fisher	0.077
联合瓣膜手术	6 (12.5)	4 (21.1)	0.255	0.613
升主动脉联合瓣膜手术	2 (4.2)	0 (0)	Fisher	1.000
CABG 联合瓣膜手术	3 (6.2)	0 (0)	Fisher	0.553
心脏肿瘤切除联合瓣膜手术	4 (8.3)	2 (10.5)	<0.001	1.000
房间隔缺损修补联合瓣膜手术	2 (4.2)	1 (5.3)	<0.001	1.000
其他	6 (12.5)	3 (15.8)	<0.001	1.000
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	292.7±83.2	270.5±56.5	-1.066	0.290

注: CABG 为冠状动脉旁路移植术

表 6 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术且应用 CPB 患者 CPB 时间和 ACC 时间比较 (min, $\bar{x} \pm s$)			
组别	例数 (例)	CPB 时间	ACC 时间
非膈肌功能障碍组	25	121.5±27.9	79.1±20.7
膈肌功能障碍组	10	126.6±42.1	77.7±42.4
t 值		0.420	-0.128
P 值		0.677	0.899

注: CPB 为体外循环, ACC 为主肺动脉阻断

2.4.3 术后资料 (表 7):膈肌功能障碍组患者高流量吸氧、机械通气时间延长及肺炎比例均显著高于非膈肌功能障碍组, ICU 住院时间和机械通气时间均较非膈肌功能障碍组显著延长(均 $P<0.05$); 两组患者其他术后资料差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。

表 7 是否发生膈肌功能障碍两组心脏正中开胸手术患者术后临床资料比较

指标	非膈肌功能障碍组 (n=48)	膈肌功能障碍组 (n=19)	χ^2/Z 值	P 值
高流量吸氧〔例(%)〕	12(25.0)	10(52.6)	4.712	0.030
再插管/气管切开 〔例(%)〕	1(2.1)	1(5.3)	Fisher	0.490
机械通气时间延长 〔例(%)〕	27(56.2)	16(84.2)	4.629	0.031
总住院时间 〔h, $M(Q_L, Q_U)$ 〕	622.3 (474.6, 757.0)	714.0 (576.0, 814.5)	-1.753	0.080
ICU 住院时间 〔h, $M(Q_L, Q_U)$ 〕	60.0 (42.3, 90.6)	69.0 (65.0, 117.5)	-2.018	0.044
机械通气时间 〔h, $M(Q_L, Q_U)$ 〕	24.5 (20.0, 48.0)	47.0 (38.0, 73.0)	-2.520	0.012
使用儿茶酚胺类药物 〔例(%)〕	24(50.0)	12(63.2)	0.948	0.330
并发症〔例(%)〕				
肺炎	22(45.8)	14(73.7)	4.247	0.039
肺不张	21(43.8)	9(47.4)	0.072	0.788
新发心律失常	3(6.2)	2(10.5)	0.007	0.933
新发心肌梗死	1(2.1)	0(0)	Fisher	1.000
新发其他系统并发症	5(10.4)	3(15.8)	0.037	0.847
脑血管事件	2(4.2)	1(5.3)	Fisher	1.000
肾功能不全	1(2.1)	1(5.3)	Fisher	0.490
伤口愈合不良	2(4.2)	1(5.3)	Fisher	1.000
胸腔积液	48(100.0)	19(100.0)		

注：ICU 为重症监护病房；空白代表未测

3 讨论

本研究中有 28.4% 的心脏正中开胸手术患者术后 7 d 发生膈肌功能障碍, 评估膈肌功能障碍的方法及时间点都可能对发生率产生影响。由于心脏手术常放置临时起搏器, 跨膈压、神经电图与肌电图描记均无法应用于本研究, 且均为有创检查, 无法于床旁操作, 因此选用无创、便携的床旁膈肌超声^[10]。本研究以两项涉及膈肌超声的国际专家共识推荐的 DE<1 cm 作为诊断标准^[6-7], 并根据心脏正中开胸手术患者术后 7 d 是否发生膈肌功能障碍分为两组, 结果显示, 非膈肌功能障碍组患者术后 DE 随时间延长呈先升高后下降趋势, 术后 7 d 恢复至基线水平, 而膈肌功能障碍组双侧 DE 未见上述与时间相关的变化趋势。Tralhão 等^[11]研究了双侧 DE 的整体变化趋势, 与本研究结果相似。说明大多数患者在术后早期会出现膈肌功能障碍, 但这种损伤是一过性的。膈肌功能障碍患者无上述变化趋势的可能原因: 未对膈肌功能障碍患者进行长期随访, 仅通过监测膈肌超声指标观察膈肌功能恢复情况及随时间变化趋势; 样本量较小, 且排除了因操作受限致数据不完整者。研究表明, 单独测量时, DE 及 DTF 都具有良好的可重复性^[12-13]。然而, 在床旁进行实际操作时发

现, DT 测量易受患者体位、敷料遮挡及声窗不佳的影响, 因此与 DTF 相比, DE 似乎更易于评估膈肌功能。本研究显示, 术前 1 d 两组组内双侧 DE 及 DT 差异无统计学意义; 术后拔管 24 h 和术后 7 d 膈肌功能障碍组左侧 DE 均显著低于右侧, 这可能解释了膈肌功能障碍组术后拔管 24 h 左侧膈肌麻痹患者较右侧更多, 且持续至术后 7 d; 此外, 术后 7 d 除 2 例双侧膈肌功能障碍患者外, 左侧膈肌功能障碍患者也多于右侧, 提示心脏正中开胸手术对患者左侧膈肌功能的影响更大。从人体解剖角度来看, 膈神经与乳内动脉具有非常紧密的毗邻关系, 且膈神经接受乳内动脉分支(心包膈动脉、肌膈动脉)血液供应^[14]。从手术操作角度来看, CPB 过程中低温心脏保护可能引起膈神经脱髓鞘^[15]。CABG 通常选用左侧乳内动脉作为旁路血管^[16], 游离过程中对左侧膈神经的直接机械损伤及结扎引起的缺血性改变^[17]均可造成左侧 PNI, 因此左侧膈肌功能障碍发生率较右侧更高。然而, 术后拔管 24 h 和术后 7 d 非膈肌功能障碍患者左侧 DT 均显著低于右侧的结果仍有待验证。

静态胸部 CT 可用于评估膈肌位置、形态、厚度和体积^[18]。Sukkasem 等^[19]将动态(利用胸部透视诊断膈肌麻痹)与静态(应用胸部 CT 测量 DT)成像技术相结合, 发现 72 例临床怀疑膈肌功能障碍患者麻痹侧的膈肌较健侧平均薄 2 mm, 提示胸部 CT 或许可用于辅助评估膈肌麻痹; Ventura 等^[8]发现, 胸部 X 线中 DEF 超过 30% 的肺叶切除术后患者极有可能存在 PNI。胸部 CT 正位定位像与胸部 X 线类似, 可用于评估膈肌位置, 且胸部 CT 对于 PPC(如肺炎、肺不张、胸腔积液等)的诊断明确。本研究胸部 CT 检查显示, 67 例心脏开胸手术患者中 41 例术后发生膈肌抬高(61.2%), 且是否发生膈肌功能障碍两组患者组间及组内双侧 DEF 差异均无统计学意义。

研究表明, 心脏外科 CPB 术后呼吸窘迫发生率增加^[20], 且膈肌功能障碍对心脏术后患者呼吸系统预后有潜在的负面影响, 本研究也得到类似结果。分析其可能机制^[21-22]: 首先, 心脏术后发生 VIDD 可导致机械通气时间延长、脱机困难及再插管, 其中涉及的病因和发病机制众多, 线粒体氧化应激、蛋白水解激活、膈肌自噬、钙蛋白酶活性改变、胞质 Ca^{2+} 水平升高、细胞因子水平改变都参与其中; 其次, 几乎所有全身麻醉患者在自主呼吸时和使用肌肉麻痹剂后都会出现肺不张, 而 VIDD、术后疼痛、胸腔积液等因素使膈肌及辅助呼吸肌难以完成肺复张; 再

次,膈肌功能障碍会导致患者咳嗽无力,难以排出分泌物,加之心脏手术创伤大,术后易形成肺炎。本研究显示,术后胸部 CT 提示胸腔积液发生率为 100%,较既往报道的 24%~63% 更高^[23]。本研究对患者术前资料的分析显示,膈肌功能障碍组患者心房颤动及肺动脉高压发生率较非膈肌功能障碍组更高。还有研究表明,肺动脉高压患者会出现呼吸肌无力,尤其是膈肌力量显著下降^[24-25],本研究中观察到的结果可能与此相关。心房颤动的危险因素包括高血压、心脏瓣膜病、冠状动脉疾病等^[26],故本研究中 67 例心脏正中开胸手术患者为心房颤动高危人群。经过查阅文献,未能发现有关心房颤动与心脏开胸术后膈肌功能障碍相关的病理生理机制,提示本研究两组患者心房颤动发生率差异有统计学意义的结果仍需进一步研究。在对比术中资料的分析中发现,本研究中手术类型多样,两组患者手术类型、CPB 时间、ACC 时间及 CABG 吻合次数具有相似的特征。

综上所述,心脏正中开胸术后膈肌功能障碍发生率较高,表现为术后早期短暂性功能减弱,以左侧更为显著,随后迅速恢复到术前水平。膈肌功能障碍与心房颤动、肺动脉高压相关,可显著增加术后呼吸并发症发生风险,延长机械通气及 ICU 住院时间。本研究结果可帮助临床医生早期识别心脏开胸术后膈肌功能障碍,预防相关并发症。本研究引入的胸部 CT 测量指标 DEF 组间及组内差异无统计学意义,未来计划采用 CT 三维重建技术,引入更多指标(如肺容积、膈肌体积等),进一步丰富研究成果。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 朱心愿: 酝酿和设计实验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、起草文章;吴大伟、林晨: 采集数据、分析/解释数据;张昊: 指导统计分析;翟红燕: 对文章的知识性内容作批评性审阅、修改、提供技术指导

参考文献

- [1] Laghnam D, Naudin C, Srouf A, et al. Persistent diaphragm dysfunction after cardiac surgery is associated with adverse respiratory outcomes: a prospective observational ultrasound study [J]. *Can J Anaesth*, 2023, 70 (2): 228–236. DOI: 10.1007/s12630-022-02360-8.
- [2] Kokatnur L, Rudrappa M. Diaphragmatic palsy [J]. *Diseases*, 2018, 6 (1): 16. DOI: 10.3390/diseases6010016.
- [3] Tanaka R. Dynamic chest radiography: flat-panel detector (FPD) based functional X-ray imaging [J]. *Radiol Phys Technol*, 2016, 9 (2): 139–153. DOI: 10.1007/s12194-016-0361-6.
- [4] Medrinal C, Machefert M, Lamia B, et al. Transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation in mechanically ventilated patients: a randomised study [J]. *Crit Care*, 2023, 27 (1): 338. DOI: 10.1186/s13054-023-04597-1.
- [5] Scarlata S, Mancini D, Laudisio A, et al. Reproducibility and clinical correlates of supine diaphragmatic motion measured by M-mode ultrasonography in healthy volunteers [J]. *Respiration*, 2018, 96 (3): 259–266. DOI: 10.1159/000489229.
- [6] Haaksma ME, Smit JM, Boussuges A, et al. EXpert consensus On Diaphragm UltraSonography in the critically ill (EXODUS): a Delphi consensus statement on the measurement of diaphragm ultrasound-derived parameters in a critical care setting [J]. *Crit Care*, 2022, 26 (1): 99. DOI: 10.1186/s13054-022-03975-5.
- [7] European Society of Intensive Care Medicine Task Force for Critical Care Ultrasonography. Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine [J]. *Intensive Care Med*, 2021, 47 (12): 1347–1367. DOI: 10.1007/s00134-021-06486-z.
- [8] Ventura L, Zhao WG, Chen TB, et al. Significant diaphragm elevation suggestive of phrenic nerve injury after thoracoscopic lobectomy for lung cancer: an underestimated problem [J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2020, 9 (5): 1822–1831. DOI: 10.21037/tlcr-20-540.
- [9] Chetta A, Rehman AK, Moxham J, et al. Chest radiography cannot predict diaphragm function [J]. *Respir Med*, 2005, 99 (1): 39–44. DOI: 10.1016/j.rmed.2004.04.016.
- [10] 储蕴, 郭闯, 付海燕. 老年机械通气患者膈肌浅快呼吸指数与肺部超声评分的相关性及其对撤机结局的预测价值 [J]. *中华危重病急救医学*, 2024, 36 (2): 152–155. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20230626-00466.
- [11] Tralhão A, Cavaleiro P, Arrigo M, et al. Early changes in diaphragmatic function evaluated using ultrasound in cardiac surgery patients: a cohort study [J]. *J Clin Monit Comput*, 2020, 34 (3): 559–566. DOI: 10.1007/s10877-019-00350-8.
- [12] Boon AJ, Sekiguchi H, Harper CJ, et al. Sensitivity and specificity of diagnostic ultrasound in the diagnosis of phrenic neuropathy [J]. *Neurology*, 2014, 83 (14): 1264–1270. DOI: 10.1212/WNL.0000000000000841.
- [13] Sanchez de Toledo J, Munoz R, Landsittel D, et al. Diagnosis of abnormal diaphragm motion after cardiothoracic surgery: ultrasound performed by a cardiac intensivist vs. fluoroscopy [J]. *Congenit Heart Dis*, 2010, 5 (6): 565–572. DOI: 10.1111/j.1747-0803.2010.00431.x.
- [14] Hayase J, Mori S, Shivkumar K, et al. Anatomy of the pericardial space [J]. *Card Electrophysiol Clin*, 2020, 12 (3): 265–270. DOI: 10.1016/j.ccep.2020.04.003.
- [15] Canbaz S, Turgut N, Halici U, et al. Electrophysiological evaluation of phrenic nerve injury during cardiac surgery: a prospective, controlled, clinical study [J]. *BMC Surg*, 2004, 4: 2. DOI: 10.1186/1471-2482-4-2.
- [16] Gaudino M, Bakaeen FG, Sandner S, et al. Expert systematic review on the choice of conduits for coronary artery bypass grafting: endorsed by the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) and the Society of Thoracic Surgeons (STS) [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2023, 64 (2): ezad163. DOI: 10.1093/ejcts/ezad163.
- [17] Jellish WS, Oltadeh M. Peripheral nerve injury in cardiac surgery [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2018, 32 (1): 495–511. DOI: 10.1053/j.jvca.2017.08.030.
- [18] Laghi FA Jr, Saad M, Shaikh H. Ultrasound and non-ultrasound imaging techniques in the assessment of diaphragmatic dysfunction [J]. *BMC Pulm Med*, 2021, 21 (1): 85. DOI: 10.1186/s12890-021-01441-6.
- [19] Sukkasem W, Mofteh SG, Kicska G, et al. Crus atrophy: accuracy of computed tomography in diagnosis of diaphragmatic paralysis [J]. *J Thorac Imaging*, 2017, 32 (6): 383–390. DOI: 10.1097/RTI.0000000000000276.
- [20] 李敏, 陈哈, 于荣国. 体外循环心脏术后血清降钙素原浓度预测患者发生中度和重度急性呼吸窘迫综合征的价值 [J]. *中华危重病急救医学*, 2023, 35 (5): 487–492. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20211122-01760.
- [21] Goligher EC, Dres M, Fan E, et al. Mechanical ventilation-induced diaphragm atrophy strongly impacts clinical outcomes [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 197 (2): 204–213. DOI: 10.1164/rccm.201703-0536OC.
- [22] 周倩倩, 林帘, 张娅, 等. 呼吸机相关性膈肌功能障碍的主要病因及发病机制 [J]. *中国中西医结合急救杂志*, 2024, 31 (2): 245–250. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2024.02.024.
- [23] Tanner TG, Colvin MO. Pulmonary complications of cardiac surgery [J]. *Lung*, 2020, 198 (6): 889–896. DOI: 10.1007/s00408-020-00405-7.
- [24] Schiefenhövel F, Poncette AS, Boyle EM, et al. Pleural effusions are associated with adverse outcomes after cardiac surgery: a propensity-matched analysis [J]. *J Cardiothorac Surg*, 2022, 17 (1): 298. DOI: 10.1186/s13019-022-02050-y.
- [25] Aslan GK, Akinci B, Yeldan I, et al. Respiratory muscle strength in patients with pulmonary hypertension: the relationship with exercise capacity, physical activity level, and quality of life [J]. *Clin Respir J*, 2018, 12 (2): 699–705. DOI: 10.1111/crj.12582.
- [26] Anumonwo JM, Kalifa J. Risk factors and genetics of atrial fibrillation [J]. *Heart Fail Clin*, 2016, 12 (2): 157–166. DOI: 10.1016/j.hfc.2015.08.013.

(收稿日期: 2025-01-16)
(本文编辑: 孙茜 马英)