

## 机器人手术在胸外科的应用现状与进展

贾昱欣, 张亚杰, 李鹤成

(上海交通大学医学院附属瑞金医院胸外科 上海 200025)

**摘要** 作为微创外科最先进的技术, 以达芬奇机器人手术为代表的机器人手术已在胸外科得到广泛应用。本文通过对国内外文献进行综述, 全面分析了机器人在肺、食管、纵隔等胸外科手术中的开展情况及临床效果, 展望了机器人在胸外科的未来发展前景。

**关键词** 机器人手术; 胸外科; 进展

**中图分类号** R655 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2022) 05-0367-09

## Applications and advances of robotic surgical system in thoracic surgery

JIA Yuxin, ZHANG Yajie, LI Hecheng

(Department of Thoracic Surgery, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China)

**Abstract** As the most advanced technique in minimally invasive surgery, robot-assisted surgery represented by Da Vinci surgical system has been widely used in thoracic surgery. This paper aims to summarize the application status of robotic thoracic surgery (lung, esophagus and mediastinum) and evaluate its clinical effect, meanwhile, the future development of surgical robots in thoracic surgery is prospected.

**Key words** Robotic surgery; Thoracic surgery; Advance

收稿日期: 2021-06-28 录用日期: 2021-08-23

Received Date: 2021-06-28 Accepted Date: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金 (81871882, 81902951)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (81871882, 81902951)

通讯作者: 李鹤成, Email: lihecheng2000@hotmail.com

Corresponding Author: LI Hecheng, Email: lihecheng2000@hotmail.com

引用格式: 贾昱欣, 张亚杰, 李鹤成. 机器人手术在胸外科的应用现状与进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2022, 3 (5): 367-375.

Citation: JIA Y X, ZHANG Y J, LI H C. Applications and advances of robotic surgical system in thoracic surgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2022, 3 (5): 367-375.

## 1 手术机器人的发展

达芬奇手术机器人是目前全球最成功且应用最广泛的手术机器人。1999年, Intuitive Surgical 公司成功研制出第1台达芬奇产品, 至今已推出标准、S、Si、Xi、SP共五代产品。目前, 达芬奇机器人手术系统已广泛应用于心胸外科、普外科、妇科、泌尿外科等数十个学科。2020年, 达芬奇机器人手术系统共在全球范围内完成了120万例手术<sup>[1]</sup>。

达芬奇机器人手术系统是目前唯一获批应用于胸外科的手术机器人。2001年Yoshino I等<sup>[2]</sup>率先应用达芬奇手术机器人实施了非侵袭性胸腺瘤切除术, 开启了达芬奇手术机器人在胸外科领域应用的先河。我国于2006年首次引入机器人系统并应用于心脏外科<sup>[3]</sup>, 国内首例机器人辅助胸外科手术于2009年在上海胸科医院完成<sup>[4]</sup>。截至2020年12月, 中国大陆装机量突破190台, 手术量突破19万例, 其中胸外科手术约占13%。目前达芬奇机器人手术系统在胸外科应用广泛, 几乎所有传统腔镜下的肺、食管、纵隔、膈肌手术等都可以使用达芬奇机器人系统来辅助完成<sup>[5]</sup>。

## 2 机器人在肺部手术中的应用

2002年, Melfi F M等<sup>[6]</sup>报道了世界上第1例机器人辅助胸外科(Robot-assisted thoracic surgery, RATS)肺部手术, ZHAO X等<sup>[4]</sup>于2009年开展了国内第1例RATS肺叶切除术。目前国内外应用的机器人辅助肺癌手术, 可以根据肿瘤大小及位置不同选择不同术式, 包括机器人辅助楔形切除术、肺叶切除术、肺段切除术及肺袖式切除术等<sup>[7]</sup>。根据2020年发布的《机器人辅助肺癌手术中国临床专家共识》<sup>[8]</sup>, RATS成本显著高于电视胸腔镜外科手术(Video-assisted thoracic surgery, VATS), 不建议常规

用于非解剖性肺切除手术, 因此机器人辅助肺楔形切除术在此不做详细展开。

### 2.1 机器人辅助肺叶切除术

解剖性肺叶切除联合系统性淋巴结清扫是治疗早期非小细胞肺癌(Non-small cell lung cancer, NSCLC)的标准术式<sup>[9]</sup>。2002年Melfi F M等<sup>[6]</sup>报道了首例达芬奇机器人肺部手术, ZHAO X等<sup>[4]</sup>于2009年开展了我国第1例RATS肺叶切除术。本中心于2018年开展了一项机器人对比单孔胸腔镜肺叶切除术短期疗效的回顾性研究, 通过倾向得分匹配(Propensity score matching, PSM)对比69对患者, 证实了RATS在减少术中出血( $P=0.037$ )和淋巴结清扫( $P=0.014$ )上更有优势<sup>[10]</sup>。LI J T等<sup>[11]</sup>对接受肺叶切除的1 075例I期非小细胞肺癌患者进行回顾性研究分析发现, 与胸腔镜辅助手术相比, 三机械臂机器人辅助肺叶切除术在淋巴结清扫、术后引流及胸管置管时间中表现更优, 中转开胸率和术后住院时间则无显著差异。本中心于2021年发表了国际上第1例机器人肺叶切除术前瞻性临床研究<sup>[12]</sup>, 共纳入320例患者, 其短期结果显示, 机器人组和胸腔镜组在围手术期并发症发生率( $P=0.45$ )、术后住院天数( $P=0.76$ )等短期疗效指标均未见差异。机器人手术在淋巴结清扫总数、N<sub>1</sub>淋巴结清扫数目和淋巴结清扫站数方面具有优势, 而在术后胸引流总量(830ml Vs 685ml)、住院费用(\$12 821 Vs \$8 009)方面存在劣势。

### 2.2 机器人辅助肺段切除术

近年来, 解剖性肺段切除术越来越多地应用于早期肺癌的治疗<sup>[9]</sup>。Pardolesi A等<sup>[13]</sup>于2012年首次报道了机器人辅助解剖性肺段切除术。目前机器人辅助肺段切除术已在各国广泛开展。本中心于2019年联合国内多家单位进行

的关于 RATS 与 VATS 的多中心回顾性研究<sup>[14]</sup>显示, RATS 与 VATS 在肺段切除术的手术时长、术中出血量、术后住院时间、总并发症发生率等方面均无显著差异, 但 RATS 在 N<sub>1</sub> 淋巴结清扫中更具优势。对于机器人复杂联合肺段切除术 (Combined anatomic subsegmentectomy, CAS), 本中心首先报道了 16 例手术病例<sup>[15]</sup>, 证实了机器人辅助 CAS 的安全性和有效性, 它非常适合较小 (<2cm) 的多节段肺癌, 尤其是右上叶病变。

近期一项纳入了 32 项研究 (共包含 6 593 例接受 RATS、VATS 或开胸手术的早期肺癌患者) 的 Meta 分析<sup>[16]</sup> 结果显示, RATS 组除了 30d 死亡率较低, 其手术时间、中转开胸率、淋巴结清扫数目、术后并发症和住院时间均与 VATS 相似。与开胸手术相比, RATS 的手术时间更长, 住院时间更短, 但淋巴结清扫数目、术后并发症和 30d 死亡率均无显著差异。在肺叶 / 肺段切除术亚组中, RATS 和 VATS 除手术时间 (175.8min Vs 153.9min,  $P=0.003$ ) 和淋巴结清扫数目 (11.0 Vs 9.5,  $P=0.179$ ) 外, 其余结局与总体分析相似。

### 2.3 机器人辅助肺袖式切除术

袖式肺叶切除术是中央型肺癌手术中的常见技术。传统胸腔镜手术由于视野和器械灵活度受限, 在肺袖式切除手术中应用较少, 而机器人手术系统具有高清 3D 视野、灵活的仿真手腕等优势, 在技术上有利于断端吻合等操作, 同时学习曲线更短, 因而能够广泛应用于微创袖式肺叶切除术。2011 年 Schmid T 等<sup>[17]</sup> 报道了首例机器人袖式肺叶切除术, 其中支气管吻合全部由机器人完成。上海市胸科医院首先在我国开展了机器人辅助肺袖式切除, 并发表了数篇病例报道<sup>[18-21]</sup>, 证实了该术式在中央型肺癌治疗中是安全、可行和有效的。2019 年 JIAO W J 等<sup>[22]</sup>

发表了目前最大的机器人肺袖式切除单中心回顾性研究结果, 共纳入 67 例支气管袖型肺叶切除患者, 结果显示, 该术式的平均手术时间 166.5min, 平均术中出血量为 98.8ml, 无中转开胸病例, 术后并发症发生率为 20.9%。QIU T 等<sup>[23]</sup> 对 188 例接受 RATS、VATS 或开放肺袖式切除术的患者进行了倾向匹配分析, 结果发现 RATS 组在出血量、手术时间、引流管置管时间等方面优于 VATS 组和开放手术组, 三者的术后 90d 死亡率、总并发症发生率则无统计学差异。以上结果均提示, 机器人辅助肺袖式切除术安全、可行, 疗效良好。

## 3 机器人在纵隔手术中的应用

机器人手术运用于纵隔肿瘤和重症肌无力全胸腺切除术已有近 20 年的历史, 自 2001 年 Yoshino I 等<sup>[2]</sup> 报道第一例达芬奇机器人纵隔肿瘤切除术以来, 机器人辅助手术系统在胸腺瘤、胸腺癌、畸胎瘤、心包、气管囊肿、神经源性肿瘤的治疗上均取得了较好的应用<sup>[24-25]</sup>。

根据《机器人辅助纵隔肿瘤手术中国专家共识 (2019 版)》<sup>[26]</sup> 推荐, 机器人辅助纵隔肿瘤切除术适应证类似于传统胸腔镜手术。由于机器人手术系统能够有效还原传统手术方式, 对于机器人纵隔手术, 肿瘤大小和胸膜粘连已不再是绝对禁忌证, 尤其在侵犯心包、大血管等纵隔肿瘤的手术治疗上更有优势。

### 3.1 前纵隔肿瘤切除术

前纵隔肿瘤以胸腺疾病为主。已有数项临床研究<sup>[27-30]</sup> 表明, 机器人辅助胸腺切除术是可行且安全的, 并且在进行胸腺切除术的患者中, 其围手术期结局与传统经胸骨手术方法相当。另有研究显示, RATS 手术效果优于常规正中开胸手术<sup>[31-32]</sup>。一项对 350 例分别进行 RATS 和

VATS 胸腺切除术的患者的 Meta 分析<sup>[33]</sup>显示, VATS 和 RATS 胸腺切除术可提供良好且安全的手术和围手术期结局, 两组之间几乎没有差异, 但 RATS 胸腺切除术的手术时间更长。2017 年 QIAN L 等<sup>[34]</sup>报道了 123 例接受 RATS、VATS 或正中胸骨切开术 (Median sternotomy, MS) 的单中心回顾性研究, 证实了 RATS 和 VATS 用于切除早期胸腺瘤和安全性和可行性, 且与 VATS 相比, RATS 的切口较小, 术后胸膜引流持续时间更短, 引流量更少, 住院时间更短。

手术入路方面, 根据《机器人辅助纵隔肿瘤手术中国专家共识 (2019 版)》<sup>[26]</sup>推荐, 对于前上纵隔手术, RATS 入路选择与 VATS 相同, 根据肿瘤主体的不同位置, 可选择经右胸、左胸或剑突下入路完成。目前经右胸入路仍为前上纵隔肿瘤切除的首选术式, 尤其是胸腺瘤偏右者, 相比传统胸腔镜手术, 机器人更具操作优势, 可以更彻底地清扫前纵隔脂肪<sup>[35-38]</sup>。经剑突下胸骨后入路能够清晰暴露前纵隔组织结构<sup>[39-40]</sup>, 目前主要应用于既往有胸部手术史、合并重症肌无力需要行前纵隔脂肪清扫术患者。

### 3.2 中后纵隔及胸顶部肿瘤切除术

在后纵隔肿瘤手术方面, VATS 作为金标准已得到广泛应用, RATS 则相对较少, 其难点在于患者的体位选择与操作孔的设定<sup>[41]</sup>。近年来已有一些病例报道<sup>[42-45]</sup>证实, 机器人系统凭借其高清 3D 视野、灵活的机械臂腕及震颤过滤功能等技术优势, 在中后纵隔手术中能够实现肿瘤的充分暴露和完整切除, 尤其是对于靠近膈肌和位于胸膜顶的后纵隔肿瘤, RATS 手术在椎间孔的暴露与细微操作上有明显优势<sup>[46]</sup>。对于中后纵隔及胸顶部肿瘤, 机器人辅助手术入路与传统胸腔镜手术入路类似, 应选择相应肿瘤主体所在侧经胸入路。

## 4 机器人在食管手术中的应用

食管手术步骤多、操作复杂, 因此机器人食管手术发展较缓。机器人辅助微创食管切除术 (Robot-assisted minimally invasive esophagectomy, RAMIE) 最早由 Melvin W S 等<sup>[47]</sup>于 2002 年完成, 胃食管吻合方式为改良的 Ivor-Lewis 法。Horgan S 等<sup>[48]</sup>于 2003 年报道了第 1 例经食管裂孔机器人辅助食管切除术, 正式开启了机器人在食管切除手术中的应用。我国首次报道机器人食管切除术是在 2010 年, 陈秀等<sup>[49]</sup>报道了 17 例 RAMIE。目前, RAMIE 技术仅在少数一些大型中心进行。

由于食管切除涉及多个区域, 并需考虑消化道重建及学习曲线等问题, 机器人辅助食管切除手术类型较多, 目前主要包括下面 3 类: 经膈肌裂孔食管切除术 (Robot-assisted transhiatal esophagectomy, RATHE)、经右胸-腹正中-颈部三切口食管切除术 (Robot-assisted McKeown esophagectomy, RAME) 和经右胸-腹正中二切口食管切除术 (Robot-assisted Ivor-Lewis esophagectomy, RAILE), 后两者胸部食管游离与淋巴结清扫均使用机器人手术系统来完成, 而根据腹部使用开腹/腹腔镜/机器人进行胃游离又可分为混合机器人辅助和全机器人辅助手术。

### 4.1 经膈肌裂孔食管切除术

机器人辅助经膈肌裂孔路径食管切除术主要应用于部分胃食管交界和食管下段肿瘤的治疗。手术机器人最初应用于食管切除手术时, 采用的就是 RATHE<sup>[48]</sup>。由于避免了胸部操作, RATHE 可以减少肺部感染、术后胸部疼痛等并发症, 且术中出血量少, 术后住院时间短, 有利于术后恢复<sup>[50-51]</sup>。但 RATHE 也具有其局限性, 在手术范围上并不适合食管中上段肿瘤,

且 RATHE 无法彻底清扫纵隔淋巴结。由于我国食管癌患者以鳞癌为主，且发病时多属中晚期，病变主要在食管中上段，因此 RATHE 在国内应用较少，仅用于既往有胸部手术史、肺功能低下等无法耐受经胸手术的患者<sup>[52]</sup>。

## 4.2 McKeown 食管切除术

机器人 McKeown 术式在国内外临床应用较为广泛，其主要治疗胸中上段的肿瘤。由于亚洲国家食管鳞癌高发，且食管上中段病变占较高比例，多数中心采用该术式。机器人 McKeown 手术与 RAILE 不同之处在于前者先进行胸部操作，由于 McKeown 法在颈部进行吻合，其吻合口瘘和术后肺部感染的发生率要大于 Ivor-Lewis 法<sup>[53]</sup>。

ROBOT 试验<sup>[54]</sup>是目前唯一对比 RAMIE 和开放式食管切除术的随机对照临床试验，RAMIE 使用三切口 McKeown 术式进行，其结果表明，RAMIE 可使围手术期恢复更好，并且肿瘤学结果具有可比性。

McKeown 术式具有广泛、彻底的淋巴结清扫优势。多项针对机器人与传统腹腔镜辅助下 McKeown 术的回顾性对比研究结果<sup>[55-59]</sup>均显示，机器人辅助 McKeown 术可以清扫更多的淋巴结，且不增加术后喉返神经麻痹的发生率。YANG Y 等<sup>[60]</sup>通过倾向评分匹配对 271 对患者术后 3 年的中期生存状况进行分析，发现 RAMIE 组患者中有 30 例 (11.8%) 出现肿瘤复发，其中包括 9 例局部转移、17 例全身转移和 4 例合并转移，而 TLMIE 组患者中共有 26 例 (10.2%) 出现肿瘤复发，包括 10 例局部转移、7 例全身转移及 9 例合并转移。RAMIE 与较低的纵隔淋巴结复发率相关 (2.0% Vs 5.3%,  $P=0.044$ )。两个队列的总体生存率和无病生存率没有差异 ( $P=0.097$ 、0.248)。目前尚无已发布的前瞻性

数据比较 RAMIE 与传统胸腹腔镜的优劣，正在进行的机器人食管癌手术随机对照试验有 REVATE<sup>[61]</sup> 和 RAMIE<sup>[62]</sup>。

## 4.3 Ivor-Lewis 食管切除术

机器人 Ivor-Lewis 术式主要适用于病变位于食管下段及胃食管交界部的患者，欧美国家多数中心采取这种术式，这与欧美国家食管腺癌高发的流行病学特点有关<sup>[52]</sup>。

2013 年 Cerfolio RJ 等<sup>[63]</sup>报道了 22 例 RAILE 术，其中严重并发症 5 例，发生吻合口瘘 1 例。2018 年本中心对 70 例接受机器人 Ivor-Lewis 术的患者进行回顾性分析<sup>[64]</sup>结果提示，平均手术时间为 308.7min，平均出血量为 190.0ml，术后中位住院时间为 9.0d，其中 2 例中转开放，24 例 (34.3%) 患者发生术后并发症，所有手术均为 R<sub>0</sub> 切除，术后 30d 无死亡病例。Nora I 等<sup>[65]</sup>对 847 例接受食管癌切除术的患者回顾性分析中发现，与开放 Ivor-Lewis 术式相比，RAILE 的总体并发症发生率 (23.6% Vs 30.9%)，其中吻合口瘘、吻合口狭窄、肺部感染、切口感染等并发症发生率也低于开放手术。

Ivor-Lewis 入路 RAMIE 对中下段食管癌的治疗具有一定优势。一般认为，相比传统腹腔镜手术 (Thoracoscopic-assisted Ivor-Lewis esophagectomy, TAILE)，机器人辅助 Ivor-Lewis 术更具操作优势，但目前尚无对比 RAILE 和 TAILE 的前瞻性研究报道。本中心对 184 例 Ivor-Lewis 入路食管中、下段癌患者进行回顾性匹配分析，结果显示 RAILE 手术时间显著长于 TAILE 组 (302.0min Vs 274.7min)，二者在失血量、总体并发症发生率、住院时间、淋巴结清扫数上无显著差异<sup>[66]</sup>。

## 4.4 其他食管手术

机器人辅助手术还广泛地运用于贲门失弛缓症的食管下端肌层切开手术、巨大食管裂孔

疝的膈肌修补术及胃折叠成型手术、食管良性肿瘤的切除（包括食管憩室）等食管手术中<sup>[41]</sup>。由于 RATS 独特的内腕缝合技术，机器人手术系统在上述手术中，大大简化了手术操作，降低了技术难度。

## 5 总结与展望

综上所述，以达芬奇手术系统为代表的机器人在胸外科各类手术中运用越来越广泛，手术数量与质量不断提升。与传统开放及胸腔镜手术相比，机器人辅助手术拥有高清三维视野、灵活的机械臂、震颤过滤等优势，在胸外科各类疾病的治疗中保证安全性及肿瘤学根治效果的同时，具有减少出血、缩短住院时间、减少并发症发生等优势。另外，相比传统腔镜手术，机器人手术具有更短的学习曲线。然而，达芬奇机器人也存在固有的缺点，如手术费用昂贵、缺乏力反馈、装机时间长、中转开胸耗时长等，但随着技术发展和制造升级，这些问题有望得到解决。

达芬奇手术机器人的最新技术包含辅助单孔技术、术中超声探查定位、画中画同步观察技术、术中荧光显影技术，这些也可作为胸外科机器人手术未来发展方向的重要参考。作为单孔机器人的代表，第五代达芬奇 SP 产品已在美国上市，但目前尚未在中国注册。该系统只有单个机械臂，器械和摄像头均穿过单个套管进入体内，可以实现灵活的单孔入路定位，并且能够减少手术切口，减少创伤。对于胸外科手术，由于胸部肋骨的存在，单孔 Trocar 置入肋间隙较为困难，但随着剑突下切口入路手术的不断成熟，单孔达芬奇手术系统亦有参考价值<sup>[67]</sup>。

机器人手术术中超声定位使用 BK 腔内超声探头，在肝胆外科手术中常用于胰腺、肝脏肿

瘤位置和边界，以及血管的探查，已有研究报道<sup>[68]</sup>将超声用于 RATS，对 CT 难以定位的肺结节（尤其是混合磨玻璃结节）进行快速术中定位。

术中荧光显影技术是达芬奇 Si 升级的视觉部件和软件，使用红外荧光可注射染料吲哚菁绿（Indocyanine green, ICG），用于关键解剖部位的结构识别，例如血管探查、淋巴结探查、软组织及实质灌注显影，在胸外科手术中可用于评估吻合口灌注评估、淋巴结寻找及判断段间平面等。

手术机器人的另一较大发展前景是人工智能手术机器人，即通过深度学习，为外科医生提供手术方案指导和术中导航，同时具备独立完成包括腔内、介入或外科操作的能力，人工智能与手术机器人的一体化需要数据科学家、工程师和临床医生的共同努力。

虽然手术机器人应用于胸外科的时间不长，但其发展前景十分广阔。期待未来有更多前瞻性临床研究为 RATS 的临床应用提供循证依据，有更多技术复杂的手术可以通过 RATS 辅助完成。

## 参考文献

- [1] Intuitive. 2020 Intuitive Sustainability Report [EB/OL].[2021-04-12]. <https://isrg.intuitive.com/static-files/15edd986-4896-46d7-a3b4-e2f095A61a61>.
- [2] Yoshino I, Hashizume M, Shimada M, et al. Video-assisted thoracoscopic extirpation of a posterior mediastinal mass using the da Vinci computer enhanced surgical system[J]. *Ann Thorac Surg*, 2002, 74(4): 1235-1237.
- [3] 杨明, 高长青. 机器人心脏手术的应用现状 [J]. *中国微创外科杂志*, 2012, 12(7): 586-589, 593.
- [4] ZHAO X, QIAN L, LIN H, et al. Robot-assisted lobectomy for non-small cell lung cancer in China: Initial experience and techniques[J]. *J Thorac Dis*, 2010, 2(1): 26-28.

- [5] Cerfolio R J, Bryant A S, Minnich D J. Starting a robotic program in general thoracic surgery: why, how, and lessons learned[J]. *Ann Thorac Surg*, 2011, 91(6): 1729–1737.
- [6] Melfi F M, Menconi G F, Mariani A M, et al. Early experience with robotic technology for thoracoscopic surgery[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2002, 21(5): 864–868.
- [7] 袁野, 金润森, 李鹤成. 机器人手术在肺癌外科的现状和展望[J]. *临床外科杂志*, 2020, 28(7): 601–604.
- [8] 罗清泉, 王述民, 李鹤成, 等. 机器人辅助肺癌手术中国临床专家共识[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(10): 1119–1126.
- [9] 陈香, 韩宇, 张亚杰, 等. 机器人手术系统在不同分期肺癌根治术中的应用[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2021, 2(1): 10–16.
- [10] YANG S, GUO W, CHEN X, et al. Early outcomes of robotic versus uniportal video-assisted thoracic surgery for lung cancer: a propensity score-matched study[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2018, 53(2): 348–352.
- [11] LI J T, LIU P Y, HUANG J, et al. Perioperative outcomes of radical lobectomies using robotic-assisted thoracoscopic technique vs. video-assisted thoracoscopic technique: retrospective study of 1, 075 consecutive p-stage I non-small cell lung cancer cases[J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11(3): 882–891.
- [12] JIN R, ZHENG Y, YUAN Y, et al. Robotic-assisted versus video-assisted thoracoscopic lobectomy: short-term results of a randomized clinical trial (RVlob Trial) [J]. *Ann Surg*, 2021. DOI:10.1097/SLA.0000000000004922.
- [13] Pardolesi A, Park B, Petrella F, et al. Robotic anatomic segmentectomy of the lung: technical aspects and initial results[J]. *Ann Thorac Surg*, 2012. DOI: 94(3): 929–934.
- [14] ZHANG Y, CHEN C, HU J, et al. Early outcomes of robotic versus thoracoscopic segmentectomy for early-stage lung cancer: a multi-institutional propensity score-matched analysis[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2020, 160(5): 1363–1372.
- [15] LI C, HAN Y, HAN D, et al. Robotic approach to combined anatomic pulmonary subsegmentectomy: technical aspects and early results[J]. *Ann Thorac Surg*, 2019, 107(5): 1480–1486.
- [16] HU J, CHEN Y, DAI J, et al. Perioperative outcomes of robot-assisted vs video-assisted and traditional open thoracic surgery for lung cancer: a systematic review and network meta-analysis[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(5): 1–14.
- [17] Schmid T, Augustin F, Kainz G, et al. Hybrid video-assisted thoracic surgery-robotic minimally invasive right upper lobe sleeve lobectomy[J]. *Ann Thorac Surg*, 2011, 91(6): 1961–1965.
- [18] PAN X, GU C, WANG R, et al. Initial experience of robotic sleeve resection for lung cancer patients[J]. *Ann Thorac Surg*, 2016, 102(6): 1892–1897.
- [19] GU C, PAN X, CHEN Y, et al. Short-term and mid-term survival in bronchial sleeve resection by robotic system versus thoracotomy for centrally located lung cancer[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2018, 53(3): 648–655.
- [20] HUANG J, LI C, JIANG L, et al. Robotic-assisted thoracoscopic right upper lobe sleeve resection[J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11(1): 243–245.
- [21] PAN X, GU C, YANG J, et al. Robotic double-sleeve resection of lung cancer: technical aspects[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2018, 54(1): 183–184.
- [22] JIAO W J, ZHAO Y, QIU T, et al. Robotic bronchial sleeve lobectomy for central lung tumors: technique and outcome[J]. *Ann Thorac Surg*, 2019, 108(1): 211–218.
- [23] QIU T, ZHAO Y, XUAN Y, et al. Robotic sleeve lobectomy for centrally located non-small cell lung cancer: a propensity score-weighted comparison with thoracoscopic and open surgery[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2020, 160(3): 838–846.
- [24] Bodner J, Wykypiel H, Greiner A, et al. Early experience with robot-assisted surgery for mediastinal masses[J]. *Ann Thorac Surg*, 2004, 78(1): 259–266.
- [25] Savitt M A, Gao G, Furnary A P, et al. Application of robotic-assisted techniques to the surgical evaluation and treatment of the anterior mediastinum[J]. *Ann Thorac Surg*, 2005, 79(2): 450–455.
- [26] 中国医师协会医学机器人医师分会胸外科专业委员会筹备组. 机器人辅助纵隔肿瘤手术中国专家共识(2019版)[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(2): 117–125.
- [27] Kamel M K, Rahouma M, Stiles B M, et al. Robotic

- thymectomy: learning curve and associated perioperative outcomes[J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2017, 27(7): 685-690.
- [28] Marulli G, Maessen J, Melfi F, et al. Multi-institutional European experience of robotic thymectomy for thymoma[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2016, 5(1): 18-25.
- [29] CHEN K, ZHANG X, JIN R, et al. Robot-assisted thoracoscopic surgery for mediastinal masses: a single-institution experience[J]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(2): 105-113.
- [30] Rea F, Marulli G, Bortolotti L, et al. Experience with the "da Vinci" robotic system for thymectomy in patients with myasthenia gravis: report of 33 cases[J]. *Ann Thorac Surg*, 2006, 81(2): 455-459.
- [31] Cakar F, Werner P, Augustin F, et al. A comparison of outcomes after robotic open extended thymectomy for myasthenia gravis[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2007, 31(3): 501-505.
- [32] Rückert J C, Swierzy M, Ismail M. Comparison of robotic and nonrobotic thoracoscopic thymectomy: a cohort study[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2011, 141(3): 673-677.
- [33] Fok M, Bashir M, Harky A, et al. Video-assisted thoracoscopic versus robotic-assisted thoracoscopic thymectomy: systematic review and meta-analysis[J]. *Innovations (Phila)*, 2017, 12(4): 259-264.
- [34] QIAN L, CHEN X, HUANG J, et al. A comparison of three approaches for the treatment of early-stage thymomas: robot-assisted thoracic surgery, video-assisted thoracic surgery, and median sternotomy[J]. *J Thorac Dis*, 2017, 9(7): 1997-2005.
- [35] Kawaguchi K, Fukui T, Nakamura S, et al. A bilateral approach to extended thymectomy using the da Vinci surgical system for patients with myasthenia gravis[J]. *Surg Today*, 2018, 48(2): 195-199.
- [36] Ooi A, Sibayan M. Uniportal video assisted thoracoscopic surgery thymectomy (right approach) [J]. *J Vis Surg*, 2016, 2: 13.
- [37] Rueckert J, Swierzy M, Badakhshi H, et al. Robotic-assisted thymectomy: surgical procedure and results[J]. *Thorac Cardiovasc Surg*, 2015, 63(3): 194-200.
- [38] 刘博, 汪明敏, 许世广, 等. 达芬奇机器人纵隔肿瘤切除术的学习曲线 [J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2017, 24(2): 127-131.
- [39] Argueta A J O, Cañas S R R, Abu Akar F, et al. Subxiphoid approach for a combined right upper lobectomy and thymectomy through a single incision[J]. *J Vis Surg*, 2017. DOI: 10.21037/jovs.2017.06.06.
- [40] ZHANG H, CHEN L, ZHENG Y, et al. Robot-assisted thymectomy via subxiphoid approach: technical details and early outcomes[J]. *J Thorac Dis*, 2018, 10(3): 1677-1682.
- [41] 喻本桐, 唐建. 达芬奇机器人系统在胸外科手术中的应用 [J]. *中国医师杂志*, 2017, 19(7): 961-965.
- [42] Al-Mufarrej F, Margolis M, Tempesta B, et al. Novel thoracoscopic approach to difficult posterior mediastinal tumors[J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2010, 58(12): 636-639.
- [43] Cerfolio R J, Bryant A S, Minnich D J. Operative techniques in robotic thoracic surgery for inferior or posterior mediastinal pathology[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2012, 143(5): 1138-1143.
- [44] Radkani P, Joshi D, Barot T, et al. Robotic video-assisted thoracoscopy: minimally invasive approach for management of mediastinal tumors[J]. *J Robot Surg*, 2018, 12(1): 75-79.
- [45] Pacchiarotti G, Wang M Y, Kolcun J P G, et al. Robotic paravertebral schwannoma resection at extreme locations of the thoracic cavity[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(5): E17.
- [46] Kajiwaru N, Kakihana M, Usuda J, et al. Extended indications for robotic surgery for posterior mediastinal tumors [J]. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*, 2012, 20(3): 308-313.
- [47] Melvin W S, Needleman B J, Krause K R, et al. Computer-enhanced robotic telesurgery. Initial experience in foregut surgery[J]. *Surg Endosc*, 2002, 16(12): 1790-1792.
- [48] Horgan S, Berger R A, Eli E F, et al. Robotic assisted minimally invasive transhiatal esophagectomy [J]. *Ann Surg*, 2003, 69 (7): 624-626.
- [49] 陈秀, 韩冰, 郭巍, 等. Da Vinci 手术机器人在胸外科应用的初步经验 [J]. *中国医师杂志*, 2010, 12(7): 895-898.



- [50] Orringer M B, Marshall B, Chang A C, et al. Two thousand transhiatal esophagectomies: changing trends, lessons learned[J]. *Ann Surg*, 2007, 246(3): 363–374.
- [51] Hulscher J B, Tijssen J G, Obertop H, et al. Transthoracic versus transhiatal resection for carcinoma of the esophagus: a meta-analysis[J]. *Ann Thorac Surg*, 2001, 72(1): 306–313.
- [52] 机器人辅助食管切除术中国临床专家建议(2019版)[J]. *中华外科杂志*, 2019, 57(9): 641–649.
- [53] Lehenbauer D, Kernstine K H. Robotic esophagectomy: modified McKeown approach[J]. *Thorac Surg Clin*, 2014, 24(2): 203–209.
- [54] van der Sluis P C, van der Horst S, May A M, et al. Robot-assisted minimally invasive thoracoscopic esophagectomy versus open transthoracic esophagectomy for resectable esophageal cancer: a randomized controlled trial(ROBOT trial)[J]. *Ann Surg*, 2019, 269(4): 621–630.
- [55] DENG H Y, LUO J, LI S X, et al. Does robot-assisted minimally invasive esophagectomy really have the advantage of lymphadenectomy over video-assisted minimally invasive esophagectomy in treating esophageal squamous cell carcinoma-A propensity score-matched analysis based on short-term outcomes[J]. *Dis Esophagus*, 2019. DOI: 1093/dote/doy110.
- [56] DENG H Y, HUANG W X, LI G, et al. Comparison of short-term outcomes between robot-assisted minimally invasive esophagectomy and video-assisted minimally invasive esophagectomy in treating middle thoracic esophageal cancer[J]. *Dis Esophagus*, 2018. DOI: 10.1093/dote/doy012.
- [57] Chao Y K, Hsieh M J, Liu Y H, et al. Lymph node evaluation in robot-assisted versus video-assisted thoracoscopic esophagectomy for esophageal squamous cell carcinoma: a propensity-matched analysis[J]. *World J Surg*, 2018, 42(2): 590–598.
- [58] Park S, Hwang Y, Lee H J, et al. Comparison of robot-assisted esophagectomy and thoracoscopic esophagectomy in esophageal squamous cell carcinoma[J]. *J Thorac Dis*, 2016, 8(10): 2853–2861.
- [59] CHEN J, LIU Q, ZHANG X, et al. Comparisons of short-term outcomes between robot-assisted and thoraco-laparoscopic esophagectomy with extended two-field lymph node dissection for resectable thoracic esophageal squamous cell carcinoma[J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11(9): 3874–3880.
- [60] YANG Y, ZHANG X, LI B, et al. Short-and mid-term outcomes of robotic versus thoraco-laparoscopic McKeown esophagectomy for squamous cell esophageal cancer: a propensity score-matched study[J]. *Dis Esophagus*, 2019, 33(6): 1–9.
- [61] CHAO Y K, LI Z G, WEN Y W, et al. Robotic-assisted esophagectomy vs video-assisted thoracoscopic esophagectomy (REVATE): study protocol for a randomized controlled trial[J]. *Trials*, 2019. DOI: 10.1186/s13063-019-3441-1.
- [62] YANG Y, ZHANG X, LI B, et al. Robot-assisted esophagectomy (RAE) versus conventional minimally invasive esophagectomy (MIE) for resectable esophageal squamous cell carcinoma: protocol for a multicenter prospective randomized controlled trial (RAMIE trial, robot-assisted minimally invasive Esophagectomy) [J]. *BMC Cancer*, 2019, 19(1): 608.
- [63] Cerfolio R J, Bryant A S, Hawn M T. Technical aspects and early results of robotic esophagectomy with chest anastomosis[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 145(1): 90–96.
- [64] 张亚杰, 韩宇, 项捷, 等. 机器人微创 ivor lewis 食管癌根治术的应用 [J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2018, 25(9): 735–741.
- [65] Nora I, Shridhar R, Meredith K. Robotic-assisted Ivor Lewis esophagectomy: technique and early outcomes[J]. *Robot Surg*, 2017. DOI: 10.2147/RSRR.S99537.
- [66] ZHANG Y, HAN Y, GAN Q, et al. Early Outcomes of robot-assisted versus thoracoscopic-assisted ivor lewis esophagectomy for esophageal cancer: a propensity score-matched study[J]. *Ann Surg Oncol*, 2019, 26(5): 1284–1291.
- [67] 王述民. 机器人手术十年体会 [J]. *中华胸部外科电子杂志*, 2021, 8(1): 1–5.
- [68] ZHOU Z, WANG Z, ZHENG Z, et al. An "alternative finger" in robotic-assisted thoracic surgery: intraoperative ultrasound localization of pulmonary nodules[J]. *Med Ultrason*, 2017, 19(4): 374–379.