

达芬奇手术机器人在肺癌治疗中的应用进展 (附手术视频)

陈军¹, 罗洞波^{1, 2}

(1. 新疆医科大学附属肿瘤医院胸外二科 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 省部共建中亚高发病成因与防治国家重点实验室 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要 随着科技的进步及制造业水平的提升, 医用机器人的发明可谓 20 世纪末人类在医学技术装备领域取得的重大突破之一。医用机器人的典型代表为达芬奇手术机器人, 其为精准微创外科的发展奠定了坚实的基础, 机器人辅助胸外科手术 (RATS) 是未来胸部微创外科的发展方向之一。目前达芬奇手术机器人在各医疗中心应用日益广泛, 掌握手术机器人技术将成为未来胸外科医生必备的技能之一。本研究就达芬奇机器人辅助胸腔镜手术在肺癌治疗中的应用及进展做一综述。

关键词 机器人辅助手术; 胸腔镜手术; 肺癌; 手术机器人; 肺切除术

中图分类号 R655.3 R734.2 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 05-0991-10

Application progress of Da Vinci surgical robot in the treatment of lung cancer (with surgical video)

CHEN Jun¹, LUO Dongbo^{1, 2}

(1.No. 2 Department of Thoracic Surgery, Affiliated Tumor Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, China;
2.State Key Laboratory of Pathogenesis, Prevention and Treatment of High Incidence Diseases in Central Asia,
Urumqi 830000, China)

Abstract With the advances of science and technology and the improvement of manufacturing level, medical robots were invented and had been one of the major breakthroughs in the field of armarium at the end of the 20th century. The typical representative of medical robots is Da Vinci robotic surgical system, which has laid a solid foundation for the development of precision medicine and minimally invasive surgery. Meanwhile, robot-assisted thoracic surgery (RATS) has been one of the future directions of minimally invasive thoracic surgery. Da Vinci robot is now being increasingly used in various medical centers, and mastery of robotic technology will become one of the necessary skills for future thoracic surgeons. The application and progress of Da Vinci robot-assisted thoracoscopic surgery in the treatment of lung cancer is reviewed in this paper.

Key words Robot-assisted Surgery; Thoracoscopic Surgery; Lung Cancer; Surgical Robot; Pneumonectomy

收稿日期: 2024-03-05 录用日期: 2024-04-16

Received Date: 2024-03-05 Accepted Date: 2024-04-16

基金项目: 省部共建中亚高发病成因与防治国家重点实验室开放课题基金 (SKL-HIDCA-2020-13); 自治区区域协同创新专项 (科技援疆计划) (2024E02061)

Foundation Item: Open Subject Fund of State Key Laboratory of Pathogenesis, Prevention and Treatment of High Incidence Diseases in Central Asia (SKL-HIDCA-2020-13); Special Project for Collaborative Innovation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Science and Technology Supporting Plan to Xinjiang Uygur Autonomous Region)(2024E02061)

通讯作者: 罗洞波, Email: 13999891258@139.com

Corresponding Author: LUO Dongbo, Email: 13999891258@139.com

引用格式: 陈军, 罗洞波. 达芬奇手术机器人在肺癌治疗中的应用进展 (附手术视频) [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (5): 991-1000.

Citation: CHEN J, LUO D B. Application progress of Da Vinci surgical robot in the treatment of lung cance(with surgical video)[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(5): 991-1000.



扫码观看视频

随着科技水平的不断发展与进步,手术机器人在医疗领域的应用越来越广泛。机器人手术系统被引入外科手术,作为外科医生双手的延伸,以改进手术程序。其最初的研发目的是美国宇航局为远在太空的航天员提供远程医疗救助。目前最具代表性的是达芬奇手术机器人。自2000年FDA批准达芬奇手术机器人上市以来,该系统已广泛应用于各类外科手术。2002年Melfi F M A等人^[1]首次报道了机器人辅助胸外科手术(Robotic-assisted Thoracic Surgery, RATS)在胸外科应用的早期经验。在之后的20余年里RATS的应用逐年增加,在初期由于技术不成熟出于安全性和可操作性方面的顾虑,术者大多在早期肺癌患者中开展机器人辅助手术,随着机器人辅助手术经验的积累,多项研究表明对于部分进展期肿瘤行机器人辅助袖式切除术是安全、可行的^[2-4]。在肺外科领域,RATS囊括了肺楔形切除术、肺叶切除术、肺段切除术以及袖式肺叶切除术等^[5]。目前胸外科已成为机器人手术系统在外科领域主要的应用专业之一。目前文献中的RATS证据仅涉及达芬奇手术机器人,因此本研究将对达芬奇手术机器人的组成及其在肺癌治疗中的应用及进展进行综述。

1 达芬奇手术机器人的组成及其优缺点

1.1 组成

到目前为止,在安全性方面获得普遍认可并广泛使用的机器人手术系统是达芬奇机器人手术系统,由3个不同的单元组成,即患者手术平台、医生控制平台和影像处理平台。患者手术平台包括机器人手术系统的专用仪器、与患者接触的机械臂(包括1个镜头臂和3个器械臂)。医生控制平台是手术平台的远程控制中心,其发出的手术操作动作指令通过患者手术平台来实现。影像处理平台是放置光源、能量设备、CO₂源和显示器的地方,也是处理主要数据的平台,同时是整个手术机器人操作系统的中心连接点,所有辅助设备和视听连接都在此路由。

1.2 优点

随着达芬奇手术机器人不断地更新换代,该手术系统将医生视觉和双手自然延伸到患者体内。达芬奇手术机器人的摄像机固定

在机械臂上,由外科医生控制。外科医生可通过控制操纵杆将镜头向上下、左右、远近等各个方向移动,使手术视野无死角,3D高清相机提供放大10倍以上的高清三维图像。外科医生远离手术无菌区并采用坐姿通过手和脚控制机械臂及镜头臂来完成手术操作。达芬奇Xi手术系统的内窥镜和内窥镜控制器都具有荧光显影成像功能,当与吲哚菁绿(Indocyanine Green, ICG)一起使用时,荧光显影成像系统可以提供清晰的血管、血流和相关组织灌注荧光影像。在外科手术中,荧光显影成像系统被广泛应用于淋巴结清扫、手术靶区规划(例如肺段切除术中肺段间平面界定)和血供判断中,为精准微创手术提供了便利^[6]。总之,达芬奇手术机器人具有裸眼三维高清视野、模拟人手的可转弯腕式器械、远程直觉式运动、滤过术者手震颤、运动缩放功能、荧光显影功能、符合人体工程学等优点,从而使术者具有高效、安全、舒适、精准的操作体验。

1.3 缺点

首先该手术系统缺乏力反馈,术者无法感知操作时的力度,不能直接接触组织器官,无法感受组织的质地、弹性、搏动等情况,对于无胸膜改变或较深部位的肺小结节无法通过触摸法定位。由于手术医师在游离血管及丝线结扎血管时缺乏“力度感”,完全凭借经验感受用力的大小,很容易因用力过大或过小使血管损伤或结扎线滑脱而导致较大血管出血的灾难性后果。其次该手术系统设备、维修费用、耗材价格高昂,机械臂限次使用,手术费用昂贵且需患者自费,在一定程度上阻碍了RATS的推广应用。

2 机器人胸外科手术相关定义、分类及相关技术的描述方法

2.1 定义

自2002年首例RATS开展以来,手术量不断增长,为规范RATS及便于学术交流,2017年美国胸外科医师协会指南委员会^[7]组织撰写了首个机器人胸外科手术专家共识,该共识建议将RATS定义为:“一种微创外科手术,该手术不扩张、牵拉或切除胸壁或腹壁的任何组织,外科医生和助手的手术视野通过显示器

获得，而病人的组织则由机器人手术器械控制，这些手术器械通过计算机化的系统模仿人手的精细动作或完成术者的手术构想，机器人手术系统被用于所有关键的操作环节”。随着国内 RATS 量的增加，2020 年罗清泉等人^[8]亦提出了机器人辅助肺癌手术中国专家共识。

2.2 分类及相关技术的描述方法

2.2.1 分类

目前文献报道了多种不同的机器人胸外科手术的方法，其经典方法主要有如下两种，2010 年 Ninan M 等人^[9]报道使用 4 臂全孔手术机器人进行肺叶切除术的手术疗效，共纳入 74 例患者。2011 年 Veronesi G 等人^[10]报道使用三孔外加一个 3 cm 的辅助切口行机器人辅助肺叶切除术的效果，共对 91 例患者实施了手术。经查阅大量文献美国胸外科医师协会专家共识撰写专家组提议将机器人胸外科手术大致分为两类：①全孔机器人手术，其特点是除了需要取出标本、置入切割缝合器或更大的经皮器械而延长扩大切口，通常情况下切口仅与置入其中的 Trocar 一般大小；胸膜腔中的空气不直接与手术室的环境空气相通（非气密性套管周围除外），通常在胸腔中充入 CO₂ 加压以协助暴露，该术式对助手的依赖程度较低。国内有学者认为低压力人工气胸，可以降低膈肌，使辅助操作孔开的更低，这样可使进切割闭合器的方向与纵隔方向平行以便于处理肺血管和支气管^[11]。②使用辅助切口的机器人手术被称为机器人辅助手术。辅助切口为胸部的一个小切口（一般不超过 4 cm），有时穿刺套管或机械臂从其中进入胸腔；该术式允许手术室的环境空气与胸膜腔相通，不使用 CO₂ 加压暴露术野，助手通过辅助切口协助暴露术野、置入切割缝合器等操作，该术式要求助手有一定胸腔镜手术操作经验。

2.2.2 描述方法

为准确比较手术结果和疗效以便于医师间交流，美国胸外科医师协会提出一种简化的 4 字符法来描述 RATS 的方法。第 1 个字符 R 代表机器人。第 2 个字符为 P/A：P 代表完全机械臂、A 代表需要助手辅助。第 3 个字符表示进行的术式，第 4 个字符表示使用的机

械臂数量。其中表示术式的第 3 个字符为英文缩写，分别如下：肺叶切除术为 L、肺段切除术为 S、楔形切除术为 W、全肺切除术为 P、袖状肺叶切除术为 SL。据此，使用 4 个臂的全孔机器人肺叶切除术可简写为 RPL-4。使用 3 个臂的全孔机器人肺段切除术可缩写为 RPS-3。使用 4 个臂和 1 个辅助切口的机器人辅助肺叶切除术可简写为 RAL-4。

3 机器人辅助肺切除术布孔原则及切口布局

20 世纪 90 年代胸腔镜应用于胸科手术使胸外科迈入微创时代。2D 视野、僵直的手术器械是胸腔镜手术的缺点。具有 3D 高清放大视野、能够滤除震颤、灵活的腕式器械的机器人辅助手术弥补了胸腔镜的缺点。RATS 自应用于临床以来手术量不断增长，但机器人辅助肺切除术切口选择方式多样，目前尚无统一标准。

3.1 布孔原则

①互不干扰原则：确保在操作过程中，机械臂与镜头臂、机械臂与助手器械之间不会发生碰撞，互不干扰。该原则一方面通过两侧机械臂与镜头臂之间保持 8~10 cm 的距离来实现，另一方面学会利用胸壁弧度来增加指向目标时各个臂之间的夹角同样重要。②全覆盖原则：确保镜头视野能够涵盖胸腔各个角落，同时保证肺门和整个纵隔在机械臂的操作范围内，使它们配合起来能够覆盖整个胸腔，避免盲区。③空间优化利用原则：若为助手参与的机器人辅助手术需确保助手有充足的、不受干扰的操作空间，以满足其所有操作需求，并能够顺利取出手术标本。

3.2 机器人辅助肺叶切除术切口布局

最早的机器人辅助方法由 Melfi F M A 等人^[1]描述，该团队进行的机器人辅助肺叶切除术（RAL）采用 3 臂手术方式，开 1 个辅助切口。具体来说：辅助切口在第 4~5 肋间长约 3 cm，主刀右手机械臂亦由此进入胸腔，镜头臂位于腋中线第 7~8 肋间隙，主刀左手机械臂位于腋后线第 6~7 肋间，必要时在辅助切口和进镜孔之间加开一助手孔。后来 Park B J 和 Veronesi G 等人^[12-14]沿用此手

术方式并进行改进。上海胸科医院罗清泉团队^[15]多选择第7肋间腋中线与腋后线之间做观察孔，以此为中线，两侧分别四指（8~9 cm，胸侧多第7肋间，背侧多第9肋间）做操作孔，三孔排列成近一直线，两操作孔角度与镜头呈45°角，另于第4肋间锁骨中线与腋前线间开3~4 cm辅助切口，右肺中叶往往选择第3肋间做辅助切口，采用30°镜头。该方法辅助切口正对肺门，利于助手对肺的牵拉暴露、处理肺门结构以及出现大出血等紧急情况时的开胸止血处理，但对于左肺上叶血管支气管处理存在一定困难。北部战区总医院王述民团队^[16]提出了经典的“8857”切口布局法（患者健侧卧位、折刀体位），即于腋后线第8肋间开进镜孔、于肩胛线第8肋间和腋前线第5肋间分别开两孔进主刀机械臂操作器械，于腋中线第7肋间开辅助切口。因右肺中叶血管支气管位于肺门前方，为便于助手使用切割缝合器离断血管支气管，在行右肺中叶切除术时开孔略有调整，选腋前线第7肋间开孔做进镜孔，于第8肋间腋中线与

腋后线之间开辅助切口，助手立于患者背侧^[17]。此方法远离肺门的位置，便于助手使用切割闭合器处理肺门结构，缺点是辅助切口离肺门较远不便于助手对肺的牵拉暴露，且术中一旦出现大出血不便于中转开胸止血。YANG N等人^[18]报道了使用两切口的方法：于腋后线第8肋间开8 mm切口，放2号臂，于腋前线第6肋间开4 cm辅助切口，置入1号臂、镜头臂，并放置辅助器械。术者右手使用电钩，左手使用双极抓钳。2022年Gonzalez-Rivas D等人^[19]使用达芬奇Xi手术系统完成了一系列单孔机器人辅助手术，切口位于腋前线和腋中线第6~7肋间，右肺中叶切口略向前，左肺下叶切口略向外侧，单孔机器人辅助袖式肺叶切除术时建议取第5~6肋间切口，镜头臂位于切口最后方，中间臂和前面臂为机械臂，两机械臂在胸腔内相互交叉。2024年1月新疆肿瘤医院罗洞波团队使用该方法开展了10余例单孔机器人辅助肺切除术均取得了良好的手术效果。RAL切口布局见表1，如图1。

表1 机器人辅助肺叶切除术切口布局

Table 1 Incision layout in robot-assisted pulmonary lobectomy

作者（年份）	切口布局	机械臂	特点
Melfi F M A 等人 ^[1] （2002）	切口数量：3 辅助切口：第4~5肋间	右：辅助切口；左：腋后线第6~7肋间；摄像：腋中线7~8肋间隙	首次报道的RAL，辅助切口由助手和机械臂共用，使用0°镜头
罗清泉等人 ^[15] （2019）	切口数量：4 辅助切口：锁骨中线第4肋间	摄像：腋中线与腋后线第7肋间，以此为中线，两侧分别间距约8 cm，胸侧多第7肋间，背侧多第9肋间做机械臂孔	辅助切口正对肺门，利于助手对肺的牵拉暴露、处理肺门结构及出现大出血等紧急情况时的开胸止血处理，但对于左肺上叶血管支气管处理存在一定困难
王述民等人 ^[16] （2016）	切口数量：4 辅助切口：腋中线第7肋间，中叶：腋中线与腋后线第8肋间	经典“8857”布局；摄像：腋后线第8肋间；机械臂：肩胛线第8肋间和腋前线第5肋间。中叶时进镜孔选腋前线第7肋间	辅助切口远离肺门，便于助手使用切割闭合器处理肺门结构，缺点是辅助切口离肺门较远不便于助手对肺的牵拉暴露，且术中一旦出现大出血不便于中转开胸止血
YANG N 等人 ^[18] （2021）	切口数量：2 辅助切口：腋前线第6肋间	腋后线第8肋间进2号臂，辅助切口进1号臂、镜头臂，并放置辅助器械	为多孔机器人手术向单孔机器人手术的演化过程，相对U-RATS助手拥有的操作空间更多，便于助手暴露及进出器械等操作
Gonzalez-Rivas D 等人 ^[19] （2022）	切口数量：1 切口：腋前线和腋中线第6~7肋间，袖切时取第5~6肋间切口	镜头臂位于切口最后方，中间臂和前面臂为机械臂，两机械臂在胸腔内相互交叉	使用机器人专用切割闭合器及加长胸腔镜器械，国内暂无机器人专用切割闭合器
共同特点	使用3个机械臂，无需CO ₂ 吹入胸腔，类似VATS，助手需有VATS操作经验，对助手要求高，手术切口可局限在2个/1个肋间隙，利于减轻术后疼痛		

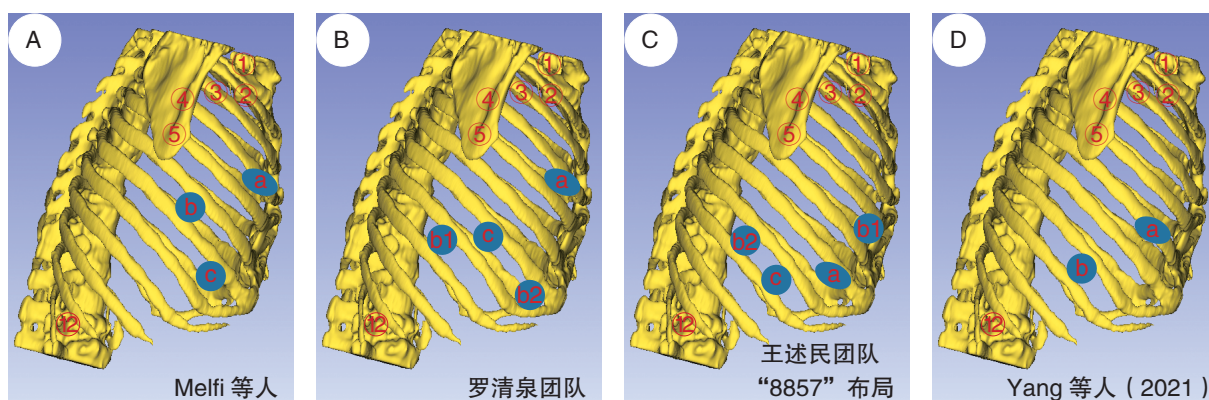


图1 RATS Trocar 布局

Figure 1 Trocar layout in RATS

注：a. 辅助切口；b. 机械臂孔；c. 镜头孔

3.3 全孔机器人肺叶切除术切口布局 2010年Ninan M等人^[9]报道了使用3臂全孔机器人肺叶切除术（RPL-3）的一组患者，其开孔如下：辅助操作孔从第11肋的顶端打孔插入7 mm Trocar，并在第9、第10肋上方打隧道至第8肋间进入胸腔，插入5 mm胸腔镜，用CO₂诱导气胸（压力8 mmHg）。使用胸腔镜可视化作为引导，手术机器人进镜孔开在第5或第6肋间，另外2个机械臂孔分别位于同一肋间进镜孔的前方和后方。然后移除胸腔镜7 mm Trocar并替换为12 mm Trocar。Cerfolio R J等人^[20-21]报道了一种全孔4臂技术，进镜孔位于腋中线第7肋间，同一肋间其前方约9 cm开12 mm孔置入1号臂，在同一肋间椎体棘突前方1~2 cm开5 mm切口置入3号臂，同一肋间镜头臂与3号臂中间开8 mm切口置入2号臂，腋中线与腋前线第9肋间开15 mm辅助操作孔。2017年Kim M P等人^[22-23]报道了一种“骰子上的五”切口布局法，其策略为：1号臂位于第7肋间肩胛骨旁的听诊三角区，4号臂位于第7肋间腋中线，前两者之间第7肋间为进镜孔，2号臂位于肩胛线第9肋间，助手孔位于腋中线第4肋间。这种布局的优势是手术机器人切割闭合器可以从左侧或右侧下方切口插入，从而在手术过程中便于使用切割闭合器处理肺门结构。张连民等人^[11]报道了使用RPL-4的一组患者，切口布局如下：选腋中线第7或第8肋间为进镜孔（12 mm），镜孔建立人工气胸，于第10肋

间或第9肋间开辅助操作孔（12 mm），用于协助暴露及牵肺、置入吸引器和切割缝合器及取出标本和淋巴结；1号臂和2号臂两操作孔（8 mm）位置取决于患者体型特点及具体切除肺叶不同，选进镜孔同一肋间或上下移1个肋间在腋前线略偏前和肩胛线略偏后分别开两孔，原则上后部操作孔的位置不高于斜裂；于第4或第5肋间脊柱旁线开3号臂操作孔（5 mm）。

关于切口选择Oh D S等人^[24]采用问卷调查的方式对美国机器人辅助手术量排行前100位的所有胸外科医生进行问卷调查发现每位医生的打孔方法存在显著差异。但是能够确定的是第7和第8肋间，或者偶尔第9肋间是进镜孔和Trocar最常见的选择。综上，切口位置并无固定肋间隙，需采取个体化原则并结合主刀手术经验，根据患者体型及左、右肺叶位置的不同做具体调整。RPL切口布局见表2，如图2。

4 手术机器人在肺癌治疗中的应用

肺癌发病率和死亡率居恶性肿瘤前列，远超其他癌症类型，肺癌严重危害人类健康^[25]。目前手术仍是早期肺癌首选治疗方式，近二十余年来肺外科已迈入微创外科时代，电视胸腔镜辅助胸外科手术（Video-assisted Thoracoscopic Thoracic Surgery, VATS）和RATS是现阶段胸部微创外科的两大主要术式。然而传统胸腔镜视野多为2D视野，镜头需要助手控制，且操作器械僵直，使其在狭小空间中进行精细操作存在

表 2 全孔机器人肺叶切除术切口布局

Table 2 Incision layout in total port-access robot-assisted pulmonary lobectomy

作者(年份)	切口数量	切口布局	特点
Ninan M 等人 ^[9] (2010)	4/5	进镜孔: 第 5 或第 6 肋间, 2 个机械臂孔位于同一肋间进镜孔的前方和后方, 辅助操作孔选第 11 肋的上方皮下潜行由第 8 肋间进胸	该技术将所有 3 个或 4 个机器臂 (含镜头和 2 个或 3 个机械臂) 置于沿主要肺裂的同一肋间多个小切口中, 可减少对多条肋间神经血管束的损伤
Cerfolio R J 等人 ^[20-21] (2011)	5	进镜孔: 腋中线第 7 肋间; 1 号臂: 进镜孔同肋其前约 9 cm; 3 号臂: 第 7 肋间椎体棘突前方约 1~2 cm; 2 号臂: 第 7 肋间镜头臂与 3 号臂中间; 辅助操作孔: 腋中线与腋前线第 9 肋间	在后方增加第 4 个机械臂以便主刀牵肺, 在动脉、静脉、支气管和肺裂周围放置血管环帮助引导切割闭合器, 机械臂孔集中在同一肋间减少了肋间神经血管束的损伤
Kim M P 等人 ^[22-23] (2017)	5	1 号臂: 第 7 肋间肩胛骨旁的听诊三角区; 4 号臂: 第 7 肋间腋中线, 前两者之间第 7 肋间为进镜口; 2 号臂: 肩胛线第 9 肋间; 助手孔: 腋中线第 4 肋间	“骰子上的五”切口布局法。该法手术机器人切割闭合器可以从左侧或右侧下方切口插入, 从而在手术过程中便于使用切割闭合器处理肺门结构
张连民等人 ^[11] (2020)	5	进镜孔: 腋中线第 7 或第 8 肋间; 辅助操作孔: 第 10 肋间或第 9 肋间, 1 号臂和 2 号臂选镜孔同一肋间或上下移 1 个肋间在腋前线略偏前和肩胛线略偏后; 3 号臂: 第 4 或第 5 肋间脊柱旁线	因辅助孔位于肋弓膈肌反折处, 组织间隙较大, 术毕延长切口取出标本时相对容易
共同特点		使用 4 个臂, CO ₂ 充气, 可以降低膈肌, 操作空间更大, 更容易解剖组织平面, 对助手要求低。缺点是手术结束取标本时需延长切口, CO ₂ 充气可能会导致患者 PaCO ₂ 上升。	

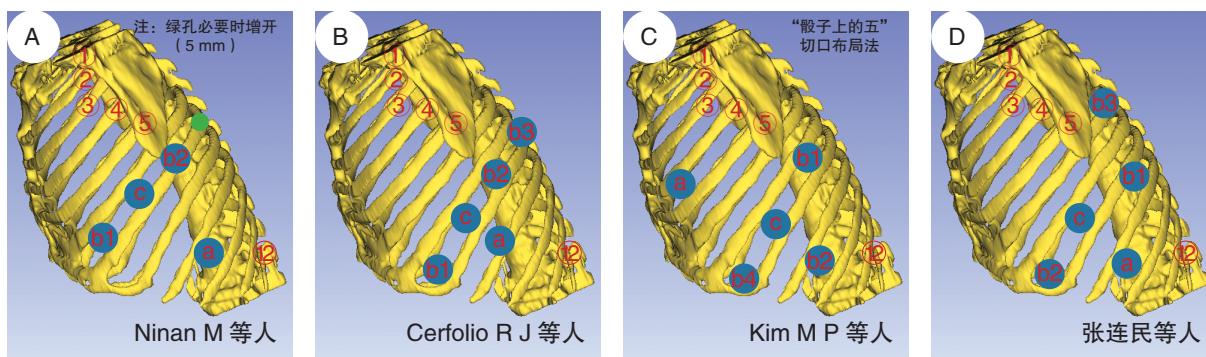


图 2 全孔机器人辅助肺切除术 Trocar 布局
Figure 2 Trocar layout in total port-access robot-assisted pulmonary lobectomy
注: a. 辅助操作孔; b. 机械臂孔; c. 镜头孔

一定困难。达芬奇手术机器人恰好弥补了传统胸腔镜的这一缺陷, 因此其在肺外科领域应用日益广泛, 其应用范围覆盖了传统肺外科大多数术式。目前最新指南与共识推荐对于外周型 (肺实质外 1/3) 且胸部 CT 发现的肺部 ≤ 2cm 且 CTR ≤ 0.25 的混合型 GGO 或纯 GGO 可将意向性肺楔形切除术作为首选^[26-27]。鉴于机器人辅助手术费用昂贵且 VATS 简便快捷, 故手术机器人对于肺楔形切除术不具有优势, 因此不建议采用手术机器人开展肺楔形切除术^[8], 故本研究不对手术机器人在肺楔形切除术中的应用展开论述。

4.1 手术机器人在肺叶切除术中的应用 目前

肺癌防治形势严峻, 解剖性肺叶切除术 + 系统性淋巴结清扫仍是可切除肺癌的标准术式^[26]。2002 年 Melfi F M A 等人^[1]报道了首例机器人辅助肺叶切除术。赵晓菁等人^[28]开展了中国首例达芬奇机器人辅助肺叶切除术。此后机器人辅助肺叶切除术在国内外广泛开展, 关于机器人辅助手术在肺外科领域的研究也越来越深入。Kent M S 等人^[29]于 2023 年发布了一项大型多中心的回顾性研究, 共纳入 2391 例机器人辅助肺叶切除术 (Robotic Lobectomy, RL)、2174 例 VATS 和 1156 例开放肺叶切除术 (Open Lobectomy, OL) 患者。结果提示: RL 组的手术时间短于 VATS 组 ($P < 0.0001$) 和 OL 组 ($P =$

0.0004)。与OL组相比,RL组和VATS组的总体术后并发症较少,住院时间较短,输血率较低($P<0.02$)。与VATS组相比,RL组的中转开胸率更低($P<0.0001$),住院时间更短($P<0.0001$),术后输血率更低($P=0.01$)。RL组和VATS组的术后并发症发生率相当。各组的住院死亡率相当。得出结论:与OL组相比,RL组和VATS组的围手术期预后良好。与VATS组相比,RL组的住院时间更短,手术失败率更低。Kent M S等人^[30]报道了一项涵盖美国21家中心6646例临床I期~III A期肺癌手术患者的随访数据显示:未经调整的5年OS率以OL组(84%)最高,其次是RL组(81%)和VATS组(74%), $P=0.008$ 。经过逆概率处理加权调整后,也观察到了类似的趋势(RL组81%,VATS组73%,OL组85%, $P=0.001$)。多变量COX回归分析显示,与VATS组相比,OL组和RL组与显著较高的OS相关(OL组VsVATS组风险比为0.64, $P<0.001$;RL组VsVATS组风险比为0.79; $P=0.007$)。JIN R等人^[31]报道了一项比较RAL组和VAL组治疗非小细胞肺癌(Non-small Cell Lung Cancer, NSCLC)的前瞻性RCT研究结果提示:与VAL组相比,RAL组取得了同等的围手术期结局,两者在NSCLC治疗中皆安全可行,同时RAL组清扫了更多的N₁站淋巴结。清扫淋巴结数量明显增多[10(8~13)Vs8(5~10)]; $P=0.003$]。Patel Y S等人^[32]研究显示与VAL组相比,RPL-4组清扫淋巴结明显增多[10(8~13)Vs8(5~10)], $P=0.003$]。基于以上研究可见RL与VAL皆是两种安全可行的微创手术方式,而在淋巴结清扫方面RL更具优势。

4.2 手术机器人在肺段切除术中的应用

Ginsberg R J等人^[33]于1995年发表的前瞻性随机对照研究结果为解剖性肺叶切除术+系统淋巴结清扫术成为NSCLC外科治疗的金标准提供了坚实的理论基础。随着肺癌早筛的普及,近期针对小体积外周型NSCLC发表的两项多中心、非劣性、随机对照研究JCOG0802研究^[34]和CALGB140503研究^[35]表明对于IA期NSCLC的患者,亚肺叶切除术在无病生存率方面并不劣

于肺叶切除术,两种术式的总生存率相似。基于此多数学者认为亚肺叶切除术可作为小体积外周型NSCLC的标准术式。2016年Cerfolio R J等人^[20]报道了对100例患者进行机器人辅助肺段切除术的初步经验,并得出结论:机器人辅助肺段切除术是安全和有效的,术后30d和90d疗效显著。2.5年时的复发率约为3%。2020年李鹤成等人^[36]的一项多机构倾向性评分匹配分析结果表明:手术机器人和传统胸腔镜进行肺段切除术治疗早期NSCLC是安全可行的,手术机器人可能会带来更好的N1淋巴结清扫效果。近期Caso R等人^[37]的一项基于美国国家癌症数据库的一项比较不同入路肺段切除术的研究结果提示:开放手术与30d再入院率(开放手术组7%,VATS组5.5%,机器人组5.6%, $P<0.033$)和90d死亡率(开放手术组4.4%,VATS组2.2%,机器人组2.5%, $P<0.001$)较高相关。手术机器人入路与5年生存率的提高相关(开放手术组50%,VATS组58%,机器人组63%, $P<0.001$)。2023年张兰军等人^[38]的一项倾向性评分匹配研究提示:机器人辅助肺段切除术患者的失血量更少,术后住院时间更短,强效阿片类药物使用更少,但费用更高(均 $P<0.001$)。机器人辅助肺段切除术的围术期疗效优于VATS。此外达芬奇手术机器人在内窥镜摄像头中安装了近红外发射器,当ICG这种可注射染料暴露在近红外光下时,就会发出绿色荧光图像,便于快速确定段间平面从而缩短肺段切除术的手术时间。2014年Pardolesi A等人^[6]报道了一种在机器人辅助肺段切除术中使用ICG识别段间平面的方法。2019年Geraci T C等人^[39]报道了一项使用ICG进行机器人辅助肺段切除术的结果,该研究共纳入245例患者,结果提示:电磁导航支气管镜检查 and ICG定位在识别靶病变方面是有效的,静脉注射ICG成功勾画出了段间平面。

4.3 手术机器人在袖式肺叶切除术中的应用

对于多数中央型肺癌及部分伴有肺门淋巴结转移的周围型肺癌,支气管袖式肺叶切除术能够保留更多肺组织,降低术后并发症,提高患者

生活质量,并获得较好的长期生存。2011年奥地利 Schmid T M 等人^[40]报道了第1例达芬奇机器人辅助袖式肺叶切除术,揭开了机器人辅助手术治疗复杂中央型肺癌的序幕。QIU T 等人^[41]比较手术机器人、VATS 和开放袖式肺切除术的围术期疗效,共纳入了188例患者,结果提示三组之间的90 d死亡率或并发症发生率无统计学差异。机器人组患者的出血量、手术时间和导管引流时间均少于其他两组($P<0.001$)。机器人组未出现阳性支气管切缘和中转开胸的患者。在多变量分析中,手术技术与总生存率和无病生存率均无独立相关性($P>0.05$)。此外,本研究首次发现使用达芬奇手术机器人进行袖式肺叶切除术的手术时间缩短($P<0.001$)。JIN D C 等人^[42]比较了手术机器人与胸腔镜下袖式肺叶切除术的围术期结果:与传统胸腔镜手术组相比,RATS 组在清扫淋巴结数量($P=0.003$)、缩短术后住院时间($P=0.040$)、缩短引流时间($P=0.022$)、减少引流量($P=0.001$)方面具有优势。LIU A 等人^[43]的一项纳入104例接受机器人辅助袖式肺叶切除术患者的回顾性研究结果提示:该组患者总的5年DFS率和OS率分别为67.9%、73.0%,Ⅱ期患者分别为57.8%、69.7%,Ⅲ期患者分别为54.5%、63.7%。RASL长期生存率与VATS或开放技术相似。2022年QU J C 等人^[44]报道了15例使用半连续缝合技术吻合支气管的双孔机器人辅助下袖式肺叶切除术的方法及疗效,平均手术时间为(102.35 ± 46.31) min,平均支气管吻合时间为(25.80 ± 15.20) min,平均出血量为(64.71 ± 38.59) mL,平均术后住院时间为(4.76 ± 2.54) d,术后90 d内随访无死亡、无中转开胸,证实双孔机器人辅助袖式肺叶切除术安全可行。2023年Gonzalez-Rivas D 等人^[45]报道了30例单孔机器人辅助袖式肺叶切除术的手术技巧和初步经验,术者使用长25 cm的3-0双针倒刺线吻合支气管,其优点是缝合过程中不需要从切口取出缝线且在完成吻合时不会失去张力,从而缩短吻合时间且保证缝合的可靠性。平均手术时间为(178.00 ± 5.50) min,淋巴结清扫数量(16.70 ± 0.90)枚,淋巴结清

扫站数(4.30 ± 0.10)站,无中转开胸或转为VATS,术后胸管留置(4.80 ± 0.50) d,术后ICU监护(1.50 ± 0.30) d,术后漏气 >5 d者有4例,1例患者术后30 d因呼吸衰竭死亡。综上,机器人辅助袖式肺叶切除术是一种安全、可行,且围术期疗效优于VATS及开放手术,长期疗效与VATS及开放手术具有可比性。目前有限的研究证实单孔机器人辅助袖式肺叶切除术具有可行性,但远期疗效有待进一步研究论证。

5 机器人辅助肺切除术进展

目前RATS通常需要4~5个切口,单孔VATS只需1个切口,RATS增加的手术切口降低了患者的满意度及美学效果,对此近期有多位学者开始尝试减孔RATS并成功开展。2021年YANG N 等人^[18]报道了18例双孔达芬奇Si手术系统辅助下肺叶切除术的围术期效果,结果表明双孔机器人辅助肺叶切除术治疗肺癌安全有效。2021年YANG Y H 等人^[46]报道了世界首例使用达芬奇Xi手术系统行单孔机器人辅助右肺上叶切除术的成功案例,术者于第4肋间腋中线做一长约4 cm的切口,置入1号臂,30°镜头臂及2号臂。2022年被誉为“单孔胸腔镜之父”的Gonzalez-Rivas D 等人^[19]报道了运用达芬奇Xi手术系统行单孔机器人辅助胸外科手术(Uniportal Robot-assisted Thoracic Surgery, U-RATS)的方法,其切口通常位于腋前线和腋中线第6~7肋间,袖切时切口上移至第5肋间水平。此后1年该团队报道了多个使用U-RATS的患者^[47-51],所开展的手术包括了肺段切除术、肺叶切除术、袖式肺叶切除术、双袖式切除术、保留肺的隆突袖状切除与重建在内的多种术式。相信随着临床研究的不断深入U-RATS在临床定能获得广阔的应用前景。

6 总结与展望

机器人手术系统因具有高清三维视野、过滤抖动及灵活的腕式操作器械而受到术者的青睐,其在胸外科领域的应用越来越广泛,尤其在一些复杂疑难手术方面(如袖式肺叶切除术、复杂肺段切除术)具有胸腔镜无法比拟的优势,

此外能够缩短微创手术学习曲线及清扫更多 N₁ 及 N₂ 淋巴结也是 VATS 无法比拟的。RATS 的安全性、可行性及疗效已被临床研究证实，但目前仍缺乏大型多中心随机对照研究论证。尽管第 5 代达芬奇机器人手术系统解决了缺乏力反馈的问题，然而其并未在国内上市且价格比达芬奇 Xi 手术系统贵 30% 左右，目前国内仍以应用达芬奇 Si、Xi 手术系统为主。手术费用昂贵是 RATS 推广最大的阻碍，目前国内外多家公司已开展了手术机器人的研发并推出了相应产品，随着达芬奇手术机器人市场垄断地位的打破，尤其是国产手术机器人的上市，相信在不久的将来 RATS 定能造福更多的患者。今后随着术中超声探查定位、术中支气管定位导航、三维重建等技术的整合与应用，新一代的手术机器人必将在肺结节无创定位方面为术者提供极大的帮助。伴随通讯技术的快速发展，通过 5G 通信技术与手术机器人的融合实现优质医疗技术的千里传输已不是梦想，这将在一定程度上缓解我国医疗资源分布不均衡的问题。另外，手术机器人最有潜力的发展方向乃是具有深度学习能力的人工智能手术机器人，其能够为术者提供手术方案指导和术中导航，相信在不久的将来通过医工跨学科合作的研发及不懈努力这一目标终会实现。

利益冲突声明： 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明： 陈军负责设计论文框架，起草论文，文献查阅，绘制图表，论文修改；罗润波负责拟定写作思路，指导撰写文章并最后定稿。

参考文献

- [1] Melfi F M A, 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.
- [2] LIN M W, KUO S W, YANG S M, et al. Robotic-assisted thoracoscopic sleeve lobectomy for locally advanced lung cancer[J]. *J Thorac Dis*, 2016, 8(7): 1747-1752.
- [3] 张斯渊,董信春,苟云久,等. 达芬奇机器人辅助支气管袖式肺叶切除的围术期疗效和安全性分析[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(10): 1145-1149.
- [4] JIAO W J, ZHAO Y D, QIU T, et al. robotic bronchial sleeve lobectomy for central lung tumors: technique and outcome[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2019, 108(1): 211-218.
- [5] HAN Y, ZHANG Y J, LI C Q, et al. Robotic lung cancer surgery: from simple to complex, from surgery to clinical study[J]. *Journal of thoracic disease*, 2020, 12(2): 51-53.
- [6] Pardolesi A, Veronesi G, Solli P, et al. Use of indocyanine green to facilitate intersegmental plane identification during robotic anatomic segmentectomy[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 148(2): 737-738.
- [7] Cerfolio R, Louie B E, Farivar A S, et al. Consensus statement on definitions and nomenclature for robotic thoracic surgery[J]. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2017, 154(3): 1065-1069.
- [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] Ninan M, Dylewski M R. Total port-access robot-assisted pulmonary lobectomy without utility thoracotomy[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2010, 38(2): 231-232.
- [10] Veronesi G, Agolia B G, Melfi F, et al. Experience with robotic lobectomy for lung cancer[J]. *Innovations (Phila)*, 2011, 6(6): 355-360.
- [11] 张连民,赵晓亮,徐峰,等. 全孔道(port-only)人工气胸下机器人辅助肺叶切除术[J]. *中国肺癌杂志*, 2020, 23(1): 50-54.
- [12] Veronesi G, Galetta D, Maisonneuve P, et al. Four-arm robotic lobectomy for the treatment of early-stage lung cancer[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2010, 140(1): 19-25.
- [13] Park B J, Flores R M, Rusch V W. Robotic assistance for video-assisted thoracic surgical lobectomy: technique and initial results[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2006, 131(1): 54-59.
- [14] Parini S, Massera F, Papalia E, et al. Port placement strategies for robotic pulmonary lobectomy: a narrative review[J]. *Journal of clinical medicine*, 2022, 11(9): 2612.
- [15] 李重武,黄佳,李剑涛,等. 连续 1000 例机器人辅助胸腔镜肺部手术回顾性分析[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2019, 26(1): 42-47.
- [16] 孟浩,王希龙,许世广,等. 达芬奇机器人手术系统胸外科手术切口选择: 661 例手术经验分析[J]. *临床军医杂志*, 2016, 44(06): 556-562.
- [17] 许世广,王述民. 做好达芬奇机器人肺叶切除手术前的准备工作——一个助手的经验分享[J]. *实用医院临床杂志*, 2015, 12(01): 35-38.
- [18] YANG N, HE X Y, BAI Q Z, et al. Analysis of the short-term outcomes of biportal robot-assisted lobectomy[J]. *The international journal of medical robotics and computer assisted surgery*, 2021, 17(6): e2326.
- [19] Gonzalez-Rivas D, Manolache V, Bosinceanu M L, et al. Uniportal pure robotic-assisted thoracic surgery-technical aspects, tips and tricks[J]. *Ann Transl Med*, 2023, 11(10): 362.
- [20] Cerfolio R J, Watson C, Minnick D J, et al. One hundred planned robotic segmentectomies: early results, technical details, and preferred port placement[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2016, 101(3): 1089-1096.
- [21] Cerfolio R J. Total port approach for robotic lobectomy[J]. *Thoracic surgery clinics*, 2014, 24(2): 151-156.
- [22] Khan N, Fikfak V, Chan E Y, et al. "Five on a Dice" port placement allows for successful robot-assisted left pneumonectomy[J]. *Thorac Cardiovasc Surg Rep*, 2017, 6(1): e42-e44.
- [23] Kim M P, Chan E Y. "Five on a dice" port placement for robot-assisted thoracoscopic right upper lobectomy using robotic stapler[J]. *Journal of thoracic disease*, 2017, 9(12): 5355-5362.
- [24] Oh D S, Tisol W B, Cesnik L, et al. Port Strategies for robot-assisted

- lobectomy by high-volume thoracic surgeons: a nationwide survey[J]. *Innovations (Phila)*, 2019, 14(6): 545-552.
- [25] Sung H, Ferlay J, Siegel R L, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA: a cancer journal for clinicians*, 2021, 71(3): 209-249.
- [26] 董懂, 黄意恒, 张亚杰, 等. 《中华医学会肺癌临床诊疗指南(2023版)》解读[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2023, 30(11): 1533-1538.
- [27] 胡坚, 陈军, 陈昶, 等. 肺部结节(≤2 cm)楔形切除胸外科全国专家共识(2023版)[J]. *中国肺癌杂志*, 2023, 26(05): 338-347.
- [28] ZHAO X J, QIAN L Q, LIN H, et al. Robot-assisted lobectomy for non-small cell lung cancer in china: initial experience and techniques[J]. *Journal of thoracic disease*, 2010, 2(1): 26-28.
- [29] Kent M S, Hartwig M G, Vallieres E, et al. Pulmonary open, robotic, and thoracoscopic lobectomy (portal) study: an analysis of 5721 cases[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(3): 528-533.
- [30] Kent M S, Hartwig M G, Vallières E, et al. Pulmonary open, robotic, and thoracoscopic lobectomy (portal) study: survival analysis of 6646 cases[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(6): 1002.
- [31] JIN R, ZHENG Y 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*, 2022, 275(2): 295.
- [32] Patel Y S, Baste J M, Shargall Y, et al. Robotic lobectomy is cost-effective and provides comparable health utility scores to video-assisted lobectomy: early results of the raval trial[J]. *Ann Surg*, 2023, 278(6): 841-849.
- [33] Ginsberg R J, Rubinstein L V. Randomized trial of lobectomy versus limited resection for T1 N0 non-small cell lung cancer. Lung Cancer Study Group[J]. *Ann Thorac Surg*, 1995, 60(3): 615-622.
- [34] Saji H, Okada M, Tsuboi M, et al. Segmentectomy versus lobectomy in small-sized peripheral non-small-cell lung cancer (JCOG0802/WJOG4607L): a multicentre, open-label, phase 3, randomised, controlled, non-inferiority trial[J]. *The Lancet (British edition)*, 2022, 399(10335): 1607-1617.
- [35] Altorki N, Wang X, Kozono D, et al. Lobar or Sublobar resection for peripheral stage ia non-small-cell lung cancer[J]. *The New England journal of medicine*, 2023, 388(6): 489-498.
- [36] ZHANG Y J, 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.
- [37] Caso R, Watson T J, Tefera E, et al. Comparing robotic, thoracoscopic, and open segmentectomy: a national cancer database analysis[J]. *Journal of surgical research*, 2024, 296: 674-680.
- [38] YANG M Z, TAN Z H, LI J B, et al. Comparison of short-term outcomes between robot-assisted and video-assisted segmentectomy for small pulmonary nodules: a propensity score-matching study[J]. *Ann Surg Oncol*, 2023, 30(5): 2757-2764.
- [39] Geraci T C, Ferrari-Light D, Kent A, et al. Technique, outcomes with navigational bronchoscopy using indocyanine green for robotic segmentectomy[J]. *Ann Thorac Surg*, 2019, 108(2): 363-369.
- [40] Schmid T M, Augustin F M, Kainz G M, et al. Hybrid video-assisted thoracic surgery-robotic minimally invasive right upper lobe sleeve lobectomy[J]. *Ann Thorac Surg*, 2011, 91(6): 1961-1965.
- [41] QIU T, ZHAO Y, XUAN Y P, 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.
- [42] JIN D C, DAI Q, HAN S C, et al. Effect of Da Vinci robot-assisted versus traditional thoracoscopic bronchial sleeve lobectomy[J]. *Asian J. Surg*, 2023, 46(10): 4191-4195.
- [43] LIU A, ZHAO Y D, QIU T, et al. The long-term oncologic outcomes of robot-assisted bronchial single sleeve lobectomy for 104 consecutive patients with centrally located non-small cell lung cancer[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2022, 11(5): 869-879.
- [44] QU J C, ZHANG W T, JIANG L. Two-port robotic sleeve lobectomy using Stratafix sutures for central lung tumors[J]. *Thorac Cancer*, 2022, 13(10): 1457-1462.
- [45] Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Manolache V, et al. Uniportal fully robotic-assisted sleeve resections: surgical technique and initial experience of 30 cases[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(1): 9-22.
- [46] YANG Y H, SONG L W, HUANG J, et al. A uniportal right upper lobectomy by three-arm robotic-assisted thoracoscopic surgery using the Da Vinci (Xi) Surgical System in the treatment of early-stage lung cancer[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2021, 10(3): 1571-1575.
- [47] Gonzalez-Rivas D, Bale M, Bosinceanu M L, et al. Uniportal robotic-assisted thoracoscopic surgery right upper lobectomy for aspergilloma[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 142-143.
- [48] Motas N, Manolache V, Bosinceanu M L, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery anatomic segmentectomies[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 133-135.
- [49] Gonzalez-Rivas D, Koziej P H, Sediqi S, et al. Uniportal hybrid robotic-assisted right upper sleeve lobectomy in an 83-year-old patient with severe pulmonary hypertension[J]. *Annals of cardiothoracic surgery*, 2023, 12(2): 136-138.
- [50] Gonzalez-Rivas D, Essa R A, Motas N, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery lung-sparing carinal sleeve resection and reconstruction[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 130-132.
- [51] Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Manolache V, et al. Uniportal fully robotic-assisted bronchovascular sleeve bilobectomy[J]. *Annals of cardiothoracic surgery*, 2023, 12(2): 144-146.

编辑: 赵敏

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎指导