基础研究 DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.003708

单孔机器人辅助肺叶切除的动物实验

陶绍霖[1]，陈大理[2]，康珀铭[1]，齐东东[1]，张祖旺[1]，刘　训[1]，罗　艺[1]，刘成军[1]，谭群友[1]
（1.重庆医科大学附属大学城医院胸外科，重庆　401331；2.重庆医科大学附属第一医院胸外科，重庆　400016）

【摘　要】目的：通过动物实验评价国产单孔手术机器人系统用于辅助肺叶切除术的安全性和有效性，为其临床应用提供基础。**方法：**选取40 kg实验用雄性大白猪为手术对象，采用术锐®单孔机器人辅助手术系统实施左肺下叶切除+淋巴结清扫术。记录并分析围术期可行性、安全性和有效性指标。**结果：**成功使用单孔蛇形臂机器人手术系统实施左肺下叶切除+淋巴结清扫术，手术时间115 min，对接时间5 min，机器人腔内操作时间100 min，肺叶切除时间85 min、淋巴结清扫时间15 min、出血量约20 mL、术中无血管、肺、心包、神经等脏器结构损伤，未中转开胸。无器械腔内相互干扰、交叉打架、器械偏离视野范围情况，无器械盲目操作造成血管、肺及胸壁损伤情况，无术中器械故障发生。术中术后猪生命体征稳定，术后恢复良好，无相关并发症发生。**结论：**术锐®单孔机器人辅助手术系统实施猪肺叶切除安全可行。

【关键词】单孔腔镜手术；机器人辅助手术；肺叶切除术；动物实验
【中图分类号】R61　　**【文献标志码】**A　　**【收稿日期】**2024-03-19

Lobectomy with a single-port robotic surgical system: an animal experiment

Tao Shaolin[1], Chen Dali[2], Kang Poming[1], Qi Dongdong[1], Zhang Zuwang[1], Liu Xun[1], Luo Yi[1], Liu Chengjun[1], Tan Qunyou[1]
(1.Department of Thoracic Surgery, University-Town Hospital of Chongqing Medical University; 2. Department of Cardiothoracic Surgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University)

【Abstract】*Objective*: To assess the efficacy and safety of a novel domestic single-port robotic surgical system for lobectomy through an animal experiment, and to lay the groundwork for its clinical application. ***Methods*:** An experimental Large White pig (male, 40 kg) was selected to undergo left lower lobectomy and systematic lymph node dissection under the assistance of the SHURUI® single-port surgical robot. Its feasibility, safety, and efficacy during the perioperative period were evaluated. ***Results*:** Left lower lobectomy and systematic lymph node dissection were performed successfully with the single-port robotic surgical system with snake-like arms. The total operative time was 115 min, the docking time was 5 min, the operative time inside the chest cavity was 100 min, the time for lobectomy was 85 min, and the time for lymph node dissection was 15 min. The blood loss was about 20 mL. During operation, there was no damage to the lung, pericardium, vessels, or nerves; no conversion to open surgery; no interference or clash between instruments or instance of instruments moving away from the field of vision; no injuries of the vessels, lung, or chest wall caused by blind operation; and no system failure. The pig showed stable vital signs during and after the operation, and recovered well without relevant complications after the surgery. ***Conclusion*:** The SHURUI® single-port robotic surgical system is safe and feasible for performing lobectomy in pigs.

【Key words】single-port endoscopic surgery; robot-assisted surgery; lobectomy; animal experiment

随着医疗技术的不断发展，精准微创的手术理念成为每个外科医生不断追求的目标，而机器人辅助微创技术是其典型代表，因其三维术野立体真实、操作精细灵活，易于缝合打结、学习曲线低等优势，逐渐在全球范围内广泛普及[1-2]。目前最广泛的机器人辅助手术系统仍以多孔操作为主，虽然较传统胸腔镜已经有了很多优势，但仍未克服手术切口较多、操作臂磨损胸壁组织等问题[3-5]。达芬奇SP单孔机器人辅助手术系统（美国直观复兴公司）是

作者介绍：陶绍霖，Email：taoshaolin2004@163.com，研究方向：肺癌精准微创诊治。
通信作者：谭群友，Email：tanqy001@163.com。
基金项目：重庆市科卫联合医学科研资助项目（编号：2020FYYX061）。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.r.20250109.1033.010（2025-01-09）

临床应用最早的单孔机器人辅助系统，其采用1对钢丝联合滑轮驱动的技术，在多孔类似腕关节的基础上增加了肘关节加大操作空间、降低器械臂间的交叉，但仍面临一些难题，如存在同轴视野、手术操作空间狭小、臂体负载能力降低及钢丝绷断等局限[6-7]。

术锐单孔手术机器人（北京）为国内首个内窥镜单孔手术系统，其临床应用目前已经获得了国家药品监督管理局批准。该系统采用蛇形手术器械搭载“对偶连续体机构”技术，体外定位臂在操作过程中保持静止，避免了术中器械相互碰撞的风险，体内“蛇形”机械臂的灵活走位，充分延展操作空间，为术者提供了充足的视野及操作角度，得到了外科医生的广泛关注，并在泌尿外科手术取得成功应用和探索[8-9]，但尚未获批用于胸外科手术。为求进一步评价和探索其在肺叶切除术中的手术方法、技巧、安全性及有效性，本研究尝试以实验猪为手术对象并成功实施肺叶切除术，现将相关技巧和经验分享如下。

1 材料与方法

1.1 实验动物

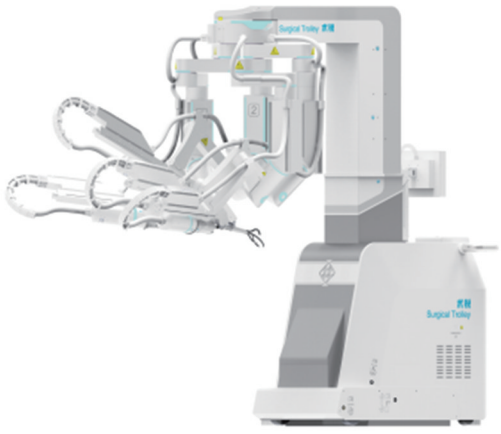
本研究选取体质量40 kg雄性实验用大白猪为手术对象，实验动物获得北京通和立泰生物科技有限公司实验动物福利和伦理审查委员会批准（编号：IACUC-A-2023015），驱除寄生虫，检疫隔离4周后接受手术。实验动物的处置符合1988年国家科学技术委员会颁布的《实验动物管理条例》。行机器人辅助下左肺下叶切除+淋巴结清扫术，记录术中、术后各项指标及并发症情况。

1.2 实验设备

单孔机器人辅助手术系统为国产单孔蛇形臂机器人手术系统（术锐®技术有限公司，北京）。包含外科医生远程操控台（图1A），容纳蛇形机械臂的手术执行系统等部分（图1B）。蛇形手术机械臂具有2段，均可四向弯转，直径为8 mm，且末端可携带剪刀、双极抓钳、持针器等操作器械（图1C）。蛇形机械臂采用对偶连续体形变驱控技术，由20根超弹性镍钛合金结构骨组成，镍钛合金结构骨首尾相连，形成具有远端、近端两组连续体构节的双连续体结构，通过推拉这些镍钛合金结构骨即可使机械臂实现推拉、弯曲等功能（图1D）。蛇形机械臂通过专用单孔多腔道套管置入体内，各机械臂成三角形或者扇形展开，便于术中操作（图1E）。



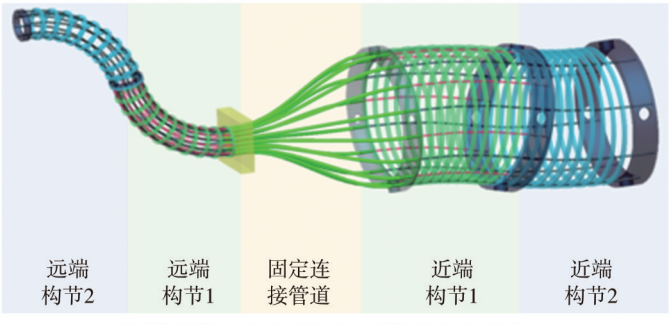
A. 远程操控台



B. 容纳蛇形机械臂的手术执行系统



C. 末端携带剪刀、双极抓钳、持针器的蛇形机



D. 蛇形机械臂对偶连续体形变驱控技术示意图

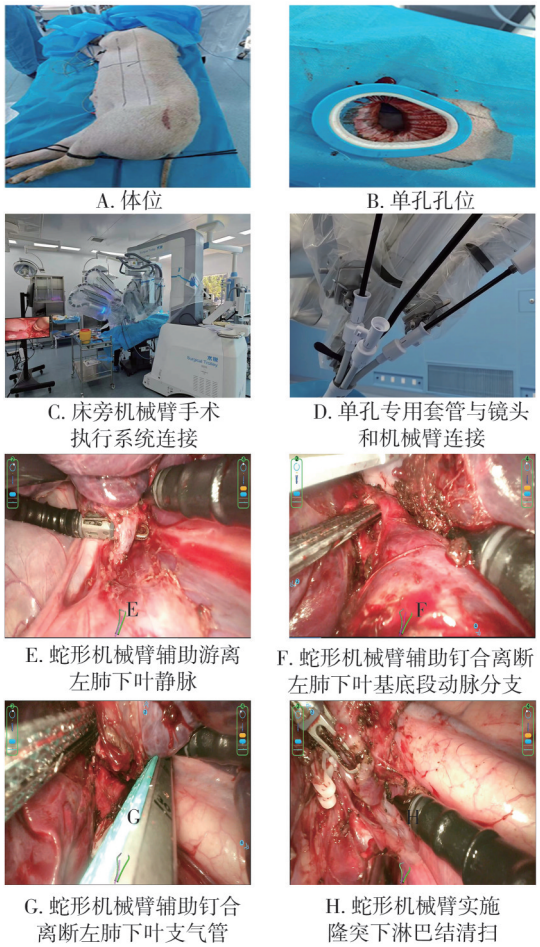


E. 蛇形机械臂腔内工作平面

图1 单孔蛇形臂机器人手术系统组成及工作原理示意图

1.3　手术操作

采用肌注和静脉复合麻醉实验猪后，插单腔气管插管到右侧主支气管，右肺单肺通气。取右侧 90°卧位，固定四肢（图 2A）。常规消毒铺巾，选择左侧锁骨中线向外肋弓下缘长约 5 cm 切口为单孔孔位，逐层切开皮肤、皮下脂肪、肌肉组织，肋弓下缘进入胸腔，见胸腔内无粘连，左肺萎陷可，安置切口保护套（图 2B）。床旁机器人手术系统从猪背侧头端斜行进入（图 2C），安置单孔专用套管，各机械臂与套管进行连接，中间孔置入镜头，左侧孔置入带双极电凝头的蛇形臂，右侧孔置入带单极电凝钩头的蛇形臂，助手器械由单孔专用套管内侧凹陷区出入（图 2D）。经单孔多通道套管置入的蛇形机械臂，展开平面成三角形，向上牵拉下肺，离断下肺韧带，打开前方和后方纵隔胸膜，游离显露下肺静脉，使用结扎夹双重结扎离断（图 2E）。打开不全叶间裂，暴露叶间动脉干，继续向远端游离，显露背段动脉分支，使用双极电凝凝固后电切离断，暴露基底段动脉分支，使用直线切割缝合器+白钉钉合离断（图 2F）。充分游离支气管，使用绿钉钉合离断（图 2G）。分别清扫隆突下（图 2H）、主动脉弓上、弓下淋巴结。回缩蛇形臂，连通专用套管移出腔内，经切口取出左下肺，再次置入套管及蛇形臂，生理盐水冲洗胸腔，检查无活动性出血，移除机器人系统，切口安置输液管引流，逐层缝合切口，术毕。术后肌内注射头孢拉定 25 mg/kg，2 次/d，连续 3 d。随访 1 周后，给予氯化钾注射安乐死。



A. 体位　B. 单孔孔位
C. 床旁机械臂手术执行系统连接　D. 单孔专用套管与镜头和机械臂连接
E. 蛇形机械臂辅助游离左肺下叶静脉　F. 蛇形机械臂辅助钉合离断左肺下叶基底段动脉分支
G. 蛇形机械臂辅助钉合离断左肺下叶支气管　H. 蛇形机械臂实施隆突下淋巴结清扫

图 2　单孔蛇形臂机器人手术系统左肺下叶切除关键步骤

1.4　观察指标

分别记录手术时间、对接时间、床旁机械臂腔内操作时间、肺叶切除时间、淋巴结清扫时间、出血量、术中出血、肺损伤等及围术期生命体征。

2　结　果

使用单孔蛇形臂机器人手术系统顺利完成了猪的左肺下叶切除+淋巴结清扫术，手术时间 115 min，对接时间 5 min，机器人腔内操作时间 100 min，肺叶切除时间 85 min、淋巴结清扫时间 15 min、出血量 50 mL，术中无血管、肺、心包、神经等脏器结构损伤，未中转开胸。无器械腔内相互干扰、交叉打架情况，无器械偏离视野范围情况，无器械盲目操作造成血管、肺及胸壁损伤情况，无术中器械故障发生。手术全程实验猪生命体征稳定，无心律失常、氧合下降、呼吸衰竭等情况。术后 2 h 拔除气管插管，术后 1 d 猪恢复行走，术后 3 d 拔除引流管，术后 1 周生命体征正常，无发热、昏迷、厌食等情况。

3　讨　论

肺叶切除+淋巴结清扫术是胸外科最常见手术术式之一，同时因其涉及肺组织牵拉暴露、血管支气管的精细解剖和分离，是开展内镜微创手术的常用目标术式。实验动物猪与人体手术中的活体组织解剖结构、血管支气管等手术平面的识别和出血控制有很大的相似性，是目前外科手术操作的最常用动物模型。因此，本研究在实验动物猪身上进行左肺下叶切除+淋巴结清扫术，以此评估手术操作的安全性和有效性。

从传统的开胸手术，到昔日流行的多孔胸腔镜，再到目前不断改进的单孔胸腔镜，以及现在广泛发展应用的机器人辅助系统，胸外科手术正全面进入精准微创的新时代[10]。机器人辅助系统因其具有三维视觉成像系统、动作定标系统、震颤消除系统和机器臂特有“转腕功能”，能够三维、放大、稳定、多方位地进行切割、缝合、打结等技术，在一定程度上还原了开胸手术操作习惯[2]。Gonzalez-Rivas D 等[11]报道使用达芬奇机器人 Xi 系统在单孔下完成肺切除成功的案例，实现机器人在单孔下复杂手术应用。2014 年法国报道达芬奇单孔机器人 SPTM 手术系统，因其末端具有可弯曲的 0°镜头和操作臂，提高了狭小空间中操作的灵活度和可控性，应用于泌尿生殖系统手术，取得良好的治疗效果[12-13]。2020 年新一代达芬奇单孔机器人 SP1098 模型在韩国被批准用于胸外科手术，报道了 17 例纵隔肿瘤患者进行 SP 手术取得良好效果，以及施行肺叶切除的可行性和安全性[7]。然而使用过程中仍发现它存在部分限制[14-15]：①为了让机械臂的肘部和腕部都能施展，机器臂需要至少伸出鞘管口 10 cm，从而限制了其运动范围和最短操作距离；②腕关节的最大活动度为 40°~50°，造成单臂侧摆最大只有

4.5 cm，操作范围局限，手术区域被分割成多个小区域，需要频繁的整体移动定位臂；③价格昂贵，目前仅能在国外少数单位开展。

本研究使用国产术锐单孔机器人手术系统，成功实施了猪的左肺下叶切除+淋巴结清扫术，术中无明显出血，无肺损伤、机械故障等事件发生。与达芬奇SP系统不同，术锐机器人手术系统有以下特点[8]：①蛇形臂力度适宜。蛇形臂搭载“对偶连续体机构”技术，由20根超弹性镍钛合金结构骨组成，可以推也可以拉，开口角大和夹持力度适宜，既满足操作需求，又避免意外损伤。②操作距离短。蛇形器械臂具有整体连续形变模式，纵向展开距离短，只需要伸出鞘管口7 cm就可以开始工作。③操作范围大。蛇形器械臂没有明确的关节，第一段关节的弯转角度可以达到90°，单臂侧摆可以达到9 cm，在不移动定位臂情况下可以完成大范围的手术操作。④操作灵活精准。蛇形手术臂双构节，可向任意方向弯转，弯转角度大，有利于精细操作。⑤内窥镜灵活。内窥镜采用独特的“眼镜蛇”模式，可以抬起，跨越前方障碍，进行观察。⑥操作视野和平面合理。“蛇形手术臂”展开形成菱形布局，可满足各方向牵拉，避免筷子效应。⑦整体连续形变模式，体外机械臂移动不打架。

本研究过程中，因猪的左肺下叶体积较大，并且实施右侧单侧气管插管，目标侧肺叶残留较多气体，手术视野和操作空间有限，增加了手术难度。根据这一实际情况，本研究将套管置入胸腔后即展开蛇形臂，且展开为三角形平面，镜头紧贴顶胸壁蛇形弯曲，扩大手术视野覆盖区域，以及操作蛇形器械臂的横向和纵向的移动空间，达到充分显露和精细操作效果。此外，手术入路的选择对手术是否顺利实施至关重要，经肋间或肋弓下缘入路一直存在争议。经肋间入路容易出现肋间神经压榨增加术后疼痛，经肋弓下缘容易损伤膈肌进入腹腔等。本研究采用经肋弓下缘切口进胸，安置一次性切口保护套，便于机器人专用套管和辅助器械进出，无额外的膈肌及腹腔脏器损伤。术中无胸壁、血管支气管及肺组织损伤，无器械故障出现。术后无出血、肺部感染等并发症。在实验动物水平初步证实了国产术锐单孔机器人实施肺叶切除术的可行性和安全性。当然，与达芬奇机器人SP比较，国产术锐单孔机器人亦存在以下缺点，如医师操控台手柄离合不能实现360°旋转，单孔鞘管无整体移动功能，辅助孔与机器人专用套管同一切口进出容易形成“筷子效应”而互相碰撞和干扰，需要适当改进。此外，大部分国产机器人手术系统目前处于研发或临床试用阶段，可能偶尔出现系统误差和操作期间医生控制台上的错误反馈，开发者也正在持续更新，以最大限度地减少这种错误和不便。

本研究为应用术锐单孔蛇形臂机器人手术系统进行肺叶切除的动物实验研究，由于尚处于研究初期，未设立对照组，仅能参考其他术式或文献报道相比较。但本研究结果初步证实，采用术锐单孔蛇形臂机器人手术系统可安全、有效地开展肺叶切除+淋巴结清扫术，手术效果良好。

参 考 文 献

[1] Parekh DJ, Reis IM, Castle EP, et al. Robot-assisted radical cystectomy versus open radical cystectomy in patients with bladder cancer (RAZOR): an open-label, randomised, phase 3, non-inferiority trial[J]. Lancet, 2018, 391(10139): 2525-2536.

[2] Peters BS, Armijo PR, Krause C, et al. Review of emerging surgical robotic technology[J]. Surg Endosc, 2018, 32(4): 1636-1655.

[3] Zeng LP, He TY, Hu J. Minimally invasive thoracic surgery: robot-assisted versus video-assisted thoracoscopic surgery[J]. Videosurgery Other Miniinvasive Tech, 2023, 18(3): 436-444.

[4] Veronesi G, Novellis P, Voulaz E, et al. Robot-assisted surgery for lung cancer: state of the art and perspectives[J]. Lung Cancer, 2016, 101: 28-34.

[5] Hu JJ, 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.

[6] Cheng X, Huang CH, Jia WQ, et al. Clinical status and future prospects of single-incision robotic-assisted surgery: a review[J]. Int J Surg, 2023, 109(12): 4221-4237.

[7] Park SY, Lee JH, Stein H, et al. Initial experience with and surgical outcomes of da Vinci single-port system in general thoracic surgery [J]. J Thorac Dis, 2022, 14(6): 1933-1940.

[8] Guo ZC, Shi YQ, Song ZJ, et al. Single-incision robotic assisted surgery: a nonrandomized cohort pilot study on a novel surgical platform in colorectal surgery[J]. Int J Surg, 2023, 109(11): 3417-3429.

[9] Peng D, Jing TL, Yao XL, et al. Preliminary experience of partial nephrectomy through a new single-port surgical robot system[J]. J Endourol, 2023, 37(5): 535-541.

[10] Schwartz G, Sancheti M, Blasberg J. Robotic thoracic surgery[J]. Surg Clin North Am, 2020, 100(2): 237-248.

[11] 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.

[12] Kaouk JH, Haber GP, Autorino R, et al. A novel robotic system for single-port urologic surgery: first clinical investigation[J]. Eur Urol, 2014, 66(6): 1033-1043.

[13] Lenfant L, Sawczyn G, Aminsharifi A, et al. Pure single-site robot-assisted radical prostatectomy using single-port versus multiport robotic radical prostatectomy: a single-institution comparative study[J]. Eur Urol Focus, 2021, 7(5): 964-972.

[14] Wilson-Smith AR, Wilson-Smith CJ, Anning, et al. The perioperative outcomes of uniportal robotic-assisted thoracic surgeries-a systematic review and meta-analysis of surgical cohort studies and case reports[J]. Ann Cardiothorac Surg, 2023, 12(2): 73-81.

[15] Park SY, Lee JH, Kim YH, et al. Multi-institutional surgical outcomes of robotic single-port surgery: a Korean experience[J]. Ann Cardiothorac Surg, 2023, 12(1): 41-45.

（责任编辑：李青颖）

本文引用格式：

陶绍霖，陈大理，康珀铭，等. 单孔机器人辅助肺叶切除的动物实验[J]. 重庆医科大学学报，2025，50(2)：250-253.