

• 综述 •

机器人支气管镜应用进展

陈淑娟^{1,2}, 方申存¹, 侯志波^{1,2*}

¹南京医科大学附属脑科医院呼吸内科, 江苏 南京 210029; ²南京市胸科医院内镜中心, 江苏 南京 210029

[摘要] 随着低剂量计算机断层扫描的广泛应用, 肺外周病变(peripheral pulmonary lesion, PPL)的检出率正逐年提高。为进一步明确PPL的性质, 需对PPL进行组织活检以获得病理诊断。PPL远离中央气道且靠近胸膜, 常规支气管镜难以到达, 诊断率和灵敏度都不理想。虽然经皮肺穿刺活检诊断率有所提高, 但具有较高的并发症。机器人支气管镜(robotic-assisted bronchoscopy, RAB)是用于诊断肺部病变的新技术, 提高了导航的精确度, 扩大了镜头的可达范围, 具有更高的准确性、稳定性、灵活性等优势, 较传统支气管镜诊断率更高、安全性更大。RAB还可作为介入平台与现有消融治疗方式结合, 对肺部肿瘤进行消融治疗。随着科技的不断完善, RAB的应用会越来越广泛, 是未来支气管镜的发展趋势。

[关键词] 机器人支气管镜; 肺外周病变; 经支气管肺活检

[中图分类号] R562

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2025)05-699-08

doi: 10.7655/NYDXBNSN250067

Application progress of robotic-assisted bronchoscopy

CHEN Shujuan^{1,2}, FANG Shencun¹, HOU Zhibo^{1,2*}

¹Department of Respiratory Medicine, the Affiliated Brain Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029;

²Department of Endoscopy, Nanjing Chest Hospital, Nanjing 210029, China

[Abstract] With the widespread use of low-dose computed tomography, the detection rate of peripheral pulmonary lesions (PPLs) is increasing year by year. Tissue biopsies of PPLs are required to obtain a pathological diagnosis. PPLs are far away from the central airway and close to the pleura, making it difficult to reach with conventional bronchoscopy, resulting in suboptimal diagnostic rates and sensitivity. Although percutaneous lung biopsy has improved diagnostic rates, it has a high rate of complications. Robotic-assisted bronchoscopy (RAB) is a new technology for the diagnosis of lung lesions, improving navigation accuracy, expanding the reach of the lens, and offering advantages of high accuracy, stability and flexibility, leading to higher diagnostic rate and safety compared to traditional bronchoscopy. RAB can also serve as an interventional platform combined with the existing ablation therapy for tumor ablation in the lungs. With continuous technological advancements, the application of RAB will become more widespread and represents the future trend in bronchoscopy development.

[Key words] robotic-assisted bronchoscopy; peripheral pulmonary lesions; transbronchial lung biopsy

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(05): 699-706]

随着胸部CT在晚期肺部疾病诊断中的应用增加以及肺癌筛查指南的放宽, 肺外周病变(peripheral pulmonary lesion, PPL)的检出率逐年增加^[1], 经影像学检查发现的肺结节约95%为良性^[2]。早发现早诊

断对具有高度恶性风险的PPL至关重要, 同时可以避免对良性病变的过度治疗。然而影像学表现不足以精准区分良性和恶性病变, 组织活检仍然是区分肺结节良恶性及制定合适治疗方案的金标准。目前, PPL活检方法主要有CT引导下经皮肺穿刺活检(percutaneous transthoracic needle biopsy, PTNB)、经支气管镜活检(transbronchial biopsy, TBB)和外科手术。PTNB是当前诊断肺癌的重要手段, 其灵敏

[基金项目] 江苏省自然科学基金(BK20221184)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: zhibohou@njmu.edu.cn (ORCID: 0009-0009-1361-8532)

度、特异度超过90%^[3],但是对于直径 ≤ 10 mm的肺小结节,其诊断阳性率下降至52%~88%^[4-5],且并发症发生率较高。CT引导下PTNB和细针穿刺活检的合并总并发症发生率分别为38.8%和24.0%,主要并发症(包括需要干预的气胸、血气胸、空气栓塞、针道播散和死亡)发生率分别为5.7%和4.4%^[6]。

TBB有常规TBB、经支气管超声导向鞘(endobronchial ultrasonography with a guide sheath, EBUS-GS)引导下的TBB、虚拟支气管镜导航(virtual bronchoscopic navigation, VBN)、电磁导航支气管镜(electromagnetic navigation bronchoscopy, ENB)以及机器人支气管镜(robotic-assisted bronchoscopy, RAB)引导下TBB。常规TBB仅限于靠近中央气管的肺部病灶,其安全性高,可在一次手术中进行多次和/或双侧活检。但是传统TBB的诊断阳性率及灵敏度、特异度常受到多种因素影响,对于直径 ≤ 20 mm的PPL, TBB对肺外周1/3的病灶诊断率只有14%^[7]。

据报道,EBUS-GS引导的TBB对于PPL的诊断率可达63%~79%^[8-9],直径 ≤ 20 mm和直径 > 20 mm的诊断率分别为56%和78%^[10],较常规TBB具有更高的诊断率。但EBUS-GS对PPL的定位准确性及诊断效率受病变位置、大小及探头与病变位置关系的影响,且不能实时导航。VBN联合EBUS的TBB,对PPL的诊断阳性率波动于63%~84%,直径 ≤ 20 mm的PPL诊断阳性率为67%^[11]。多项研究显示ENB对PPL的诊断率 $> 70%$ ^[12-14]。VBN和ENB均可提高PPL的诊断率,但荟萃分析结果显示导航支气管镜总诊断率仅为70.9%,联合C形臂锥束CT(cone-beam CT, CBCT)诊断阳性率可提高至80%左右^[15]。此外,导航支气管镜还缺乏直视下导航和活检功能。

RAB通过机械臂来控制导管进退和调节角度等进行操作,能进入更远端的肺外周气道,并且具有更好的可视性、稳定性和灵活性,缩短操作时间,进而提高诊断率。医生仅需操作控制台上的轨迹球和滚轮,即可控制导管运动,实现精确导航与活检,对肺癌早诊早治有重大意义。目前有3种RAB系统被美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)批准上市。2018年3月FDA批准首个由Auris Health公司研发的Monarch RAB。Intuitive Surgical公司研发的Ion RAB于2019年2月上市。另一种是Noah Medical公司研发的Galaxy RAB,于2023年3月获得FDA批准上市。其中,Monarch RAB和Ion RAB已获国家药品监督管理局(National

Medical Products Administration, NMPA)批准在国内上市。

还有2款国产RAB系统正在进行临床试验,尚未获得上市批准。和导航支气管镜一样,RAB均需预先对胸部进行高分辨率计算机断层扫描,通过胸部薄层CT生成虚拟三维重建和目标路径的规划,然后上传到机器人系统中。本文将探讨上述RAB在PPL的诊断应用进展,并对其与介入治疗的结合进行展望。

1 Monarch RAB系统

Monarch RAB系统使用电磁导航机器人辅助支气管镜(electromagnetic navigation RAB, EMN-RAB)。该系统的控制设备类似于游戏的手柄控制器,操作者可以用手持控制器来控制支气管镜^[16]。机器人系统包括一个电磁场发生器和传感器,患者以类似电磁导航的方式进行注册。Monarch RAB采用可伸缩嵌套式结构,外鞘6 mm,内窥镜直径4.2 mm,内含1个摄像头和1个2.1 mm的工作通道。光纤摄像头安装在支气管镜导管中,实现了导航过程中以及采集组织样本时,操作中的持续可视化。外鞘为系统提供结构稳定性,通常只能被推进到叶或段支气管,可以在任何方向上弯曲130°,内窥镜进入下一级支气管,可在任何方向上弯曲180°,较小的内窥镜能通过外周细小气道到达病变部位。导航至目标病灶后,经X线透视或支气管内超声确认后可以将鞘管锁定位置进行活检。

在2018年发表的REACH研究中,Monarch RAB首次在人类尸体中进行了评估,尽管具有相同的支气管镜直径(4.2 mm),但相比传统细支气管镜,Monarch RAB可以到达更远端气道^[17]。与传统细支气管镜相比,该机器人系统能够更灵敏地应对较大的支气管角度变化,尤其在右肺上叶尖段支气管和左肺上叶尖后段支气管这些呈锐角的气道内。

Chen等^[18]进行了首个关于机器人系统准确性的ACCESS研究。对Monarch RAB到达和诊断肺外周人造肿瘤靶点的能力进行了评估。选用8具尸体,共67个肺结节,直径为10~30 mm,平均大小为20.4 mm,距最近的胸膜边缘的平均距离为16 mm。Monarch RAB对肺结节的总体诊断率为97%(65/67)。

Rojas-Solano等^[19]首次对Monarch RAB进行了人体安全性和可行性的前瞻性单中心队列研究。研究纳入15例患者,3例为中心型病灶,病灶平均大

小为26 mm。93%(14例)的患者成功取样,未报告显著不良事件(包括气胸和显著出血)。

Chaddha等^[20]进行了首个大型多中心回顾性研究,共165例患者,167个病灶,病灶平均大小为25 mm,其中<30 mm的病变占71.3%,70.7%的病灶位于肺外周1/3,63.5%的病变有支气管征象。Monarch RAB成功导航到88.6%(148/167)的病灶,97.6%(161/165)的患者成功进行了组织活检,诊断率为69%~77%。3.6%(6例)的患者发生气胸,2.4%(4例)的患者需置胸管引流,2.4%(4例)的患者出现明显出血。

Chen等^[21]对54例周围型肺结节患者进行了首个前瞻多中心可行性BENEFIT研究。肺结节的直径为10~50 mm,中位大小为23 mm,78%的病变≤30 mm,有支气管征象的病灶占59.2%(32例)。结果显示96.2%(51/54)的患者病灶定位成功,总体诊断阳性率为74.1%(40/54),共有3.7%(2例)的患者出现气胸,1.9%(1例)的患者需行胸腔引流。

Khan等^[22]对264例行Monarch RAB术后的患者进行了回顾性研究。结果显示43%为恶性病变,41%为良性病变,15%为非诊断性病变,初始诊断阳性率为85%。经过12个月的随访后,诊断为非特异性良性病变的活检假阴性率为26%,其中至少17%的病例被诊断为恶性肿瘤或出现影像学进展,非诊断性病变的活检假阴性率为43%,最终诊断率为79%。研究提示需要重视活检假阴性率,体现出RAB活检后随访的重要性,以免造成漏诊。

Agrawal等^[23]在124例患者的回顾性队列研究中描述了影响诊断准确率的相关因素,这是迄今为止发表的最大的一项随访12个月的研究。病灶中位大小为20.5 mm,诊断阳性率为77%。最终经过12个月的随访和多变量分析,径向支气管超声(radial probe EBUS, r-EBUS)信号和病变大小是准确率最重要的预测因子,同心性、偏心性和缺失r-EBUS信号的诊断阳性率分别为85%、84%和38%,而病变>20 mm诊断率阳性率为87%,病变<20 mm诊断阳性率为82%。

相比传统细支气管镜,Monarch RAB能更进一步导航到远端气道,更好地在角度增大的支气管中进行定位活检。Monarch RAB导航成功率为88%~96%,诊断阳性率为69%~79%,且并发症发生率低,是一项安全可靠的高新技术。影响其诊断阳性率最重要的预测因子包括r-EBUS是否显示病变(诊断阳性率:同心性>偏心性>缺失r-EBUS信号)和病变的大小。

2 Ion RAB系统

Ion RAB系统是基于内部形状传感机器人辅助支气管镜系统(shape-sensing robotic-assisted bronchoscopy, SS-RAB)。2024年3月, Ion RAB通过NMPA审批获准上市。Ion RAB平台使用由单个机械臂控制的单个支气管镜,用于导航的轨迹球控制器由医生使用,在直视下引导内镜进入预先规划好的支气管。Ion系统有1个外径3.5 mm的形状传感导管和1个2.0 mm的工作通道,尖端部分可在任何方向上伸展180°,通过工作通道置入1.8 mm的视觉探头,可提供120°的视野,同时配备19G~21G活检针。在导航过程中,视觉探头通过形状传感导管进入目标气道,到达目标后,可以用径向超声、X线透视或CBCT确认定位,但在使用活检设备采集组织时,活检针占用工作通道,视觉探头需要从导管工作通道收回,因此采样时不能直接可视化。为了方便实现多次活检,可以记录活检针的活动轨迹。

2019年Fielding等^[24]发表了首个使用Ion RAB的人体安全性可行性研究。该研究包括29例患者,病变平均大小为12.2 mm,68.9%的病变位于肺上叶,58.6%的患者有支气管征象,约一半的病例有偏心性r-EBUS图像。96.6%的患者达到目标并获取样本。通过6个月的随访,总体诊断阳性率为79.3%,恶性肿瘤的诊断阳性率为88.2%。在手术过程中未观察到不良事件。

Kalchiem-Dekel等^[25]对130例患者的159例肺部病变进行了一项回顾性单中心研究,首次证明了SS-RAB在肺实质病变取样中的有效性和诊断率。病灶大小的中位数为18 mm,59.1%的病灶位于肺上叶,66.7%的病灶超过第6级支气管。导航成功率为98.7%(157/159),总诊断率为81.7%(130/159)。对于直径>20 mm的病变,诊断率>90%,而对于直径≤10 mm的病变,诊断率为66%。术后总并发症发生率为3.0%,其中1.5%的患者出现气胸,没有发生与SS-RAB相关的重大出血、气道穿孔或死亡病例。

上海市胸科医院联合国内多家医疗中心开展了“形状传感机器人辅助支气管镜在周围肺结节取样中的应用”的前瞻性、多中心临床可行性研究^[26]。该研究共纳入90例患者,应用SS-RAB为患者进行肺结节取样诊断,并长期随访,观察诊断准确率、并发症发生率。入组患者中,60%以上肺结节分布在肺外周1/3处,导航成功率100%,总体诊断率为93.3%。经6个月随访,总体诊断率为87.8%,恶性诊断灵敏

度为87.7%。即使在肺结节 ≤ 20 mm的亚组中,诊断率也达85.7%。在安全性方面,仅有1例无需置管的气胸发生,未有任何需要干预的出血发生。

为进一步提高诊断阳性率,研究者尝试将CBCT联合RAB诊断PPL。Yarmus等^[27]分别使用Ion RAB、ENB和超细支气管镜+r-EBUS对20个植入性假肿瘤靶点(80%位于肺外周)进行导航和活检。结节平均大小为16.5 mm,50%的结节有支气管征象,3种方式都使用CBCT来证实活检针进入靶内。与其他2种方法相比,RAB对PPL的定位和穿刺成功率更高(80% vs. 45% vs. 25%)。此研究中的定位率和成功率可能过于乐观,因为与实际操作相比,CT-人体误差(CT to body divergence, CTBD)在尸体研究中没有显现出来。

Benn等^[28]对52例患者的59个PPL进行了前瞻性研究。PPL平均直径 < 20 mm,以实性结节居多(41.7%),所有病例均行术中CBCT确认定位。所有PPL均成功到达,其中9例在行CBCT后需要进行微小的方向调整。通过影像学随访,最终恶性肿瘤灵敏度为84%(31/37),总体诊断阳性率为86%(51/59)。

梅奥诊所发起的一项单中心研究Ion RAB联合CBCT定位取样,PPL平均大小17.5 mm(10~30 mm),肺部病灶距胸膜平均距离14.9 mm,经CBCT确认96.7%的结节成功到达,结果显示PPL诊断阳性率达93.3%^[29]。

同样,Pritchett等^[30]报告了一项SS-RAB的前瞻性多中心研究。所有病例均采用CBCT确认定位,活检工具进入病灶率为91%,诊断阳性率为94%。SS-RAB采用CBCT确认定位,可以最大限度地减少术前和术中靶病灶定位之间的差异,提高病灶到达准确率和诊断阳性率。

一项回顾性分析使用CBCT和/或r-EBUS对200例肺部病变进行活检,总诊断阳性率不低于83.2%,对恶性疾病的诊断阳性率为91.4%,灵敏度为87.3%。该研究中唯一的并发症是气胸,发生率为10%,其中1例需要引流^[31]。

另一项回顾性研究分析了112例患者的120例PPL,通过Ion RAB对每个病灶都使用针吸、钳夹和冷冻探针进行活检。48%的患者存在支气管征象,73%为实性病变,病灶在距胸膜表面6 mm处。在108例确诊的肺结节中,31.5%(34例)的病变经针吸活检确诊,77.8%(84例)的病变经支气管钳夹活检确诊,97.2%(105例)的病变经冷冻活检确诊。并且在近18%的病例中,冷冻活检是唯一的诊断方法。

冷冻活检诊断呈阳性的病变超过97%,可能是由于冷冻活检的探针能够360°全方位采样^[32]。

综上所述,Ion RAB导航成功率为91%~100%,诊断阳性率为79.3%~94.0%。Ion RAB提高了导航精确度,扩大了镜头的可达范围,在定位和穿刺PPL方面表现出更高的成功率,且并未增加并发症的风险。将CBCT添加到SS-RAB中,以及采用冷冻探针进行活检均可能提高诊断阳性率。

3 Galaxy RAB系统

Noah Medical公司的Galaxy RAB系统采用数字断层合成技术(tool-in-lesion technology, TiLT)和EMN平台的专有组合,其创新的单臂设计与C型臂或锥形束CT系统无缝集成,以实现更准确的定位导航和实时活检定位,确保操作的安全性和有效性。TiLT技术可以实时跟踪和确认工具的位置。此外,该系统是目前市场上所有机器人系统中占地面积最小,更容易定位和在房间之间移动并且是目前唯一提供一次性支气管镜的手术机器人平台。Galaxy RAB鞘管外径4 mm,工作通道2.1 mm,镜身可在任意方向上实现180°弯曲。Galaxy RAB根据导航图进行气道配对,操作人员在EMN引导下,使用手持控制器将支气管镜引导至目标结节20 mm以内,使用专有的CTBD校正、透视增强、TiLT来确认病变,确认位置后进行活检。

在动物模型的临床前试验中,Galaxy RAB以猪作为实验模型进行了20次肺结节活检,结节平均大小为16.3 mm,最终CBCT显示活检工具在病灶内为95%,活检成功率为100%^[33]。

2024年刚发表的FRONTIER临床试验数据显示,针对19个肺结节采用Galaxy RAB进行首次人体实验^[34]。病灶平均大小20 mm,距胸膜平均距离11.6 mm。导航成功率为100%,活检工具在病灶内为100%,诊断率为94.7%,该研究证实Galaxy RAB在人体可实现高导航成功率和诊断率。

4 微创RAB系统

微创RAB系统是由微创医疗公司生产的支气管手术机器人,EMN能在术中对支气管镜导管的位置和形态信息进行实时反馈。支气管镜导管是RAB系统的核心部分,可以实现极限角度接近270°弯曲,控制手柄用于操控支气管镜,手柄摇杆控制着导管弯曲,可实现360°全方向弯曲^[35]。

2022年3月微创RAB完成首例肺活检人体临床

试验^[36]。RAB进入患者的左肺上叶后段支气管,到达靶位置,在内镜直视和虚拟影像双重定位下顺利完成活检,并现场确定活检成功,术后患者无明显不适。

5 Polaris 北极星支气管镜导航机器人

Polaris 北极星支气管镜导航机器人(常州朗合医疗)在内镜视野和电磁导航可视化实时定位引导下,精确操控内镜臂的移动。RAB系统的柔性内镜臂外径为3.3 mm,内含1.2 mm的工作通道。其外径达到超细镜的设计标准,可使内镜臂更容易进入远端气道。内镜臂远端可进行360°任意转向,在任意方向上的最大弯角均达到210°,相较于传统气管镜提升了内镜臂前端的灵活度,使其较易进入转弯角度较大的支气管^[37]。

广州呼吸健康研究院在2021年6月使用该RAB完成了首次动物实验^[37]。结果显示,2只比格犬共成功置入12枚弹簧圈,导航成功率为100%(12/12),导航时间(43.9±19.8)s。组织取样成功率为100%(12/12),取样时间为(42.4±11.3)s。该RAB 2021年开始在广州医科大学第一附属医院国家呼吸医学中心进行多中心临床研究,目前数据尚未公布。

6 RAB 诊断优势

综上,3种已上市的机器人支气管镜系统有不

同的技术要求(表1),Monarch RAB使用电磁场来保持空间定向,Ion RAB使用形状传感来传递导管形态和位置信息,Galaxy RAB则使用电磁导航+数字断层合成来保持定向。Ion RAB的鞘管外径最小,而工作通道直径相差不大,理论上可以到达更远的肺外周病变。除了Ion RAB,其他两种系统均能实现活检的直接可视化。RAB具有更好的灵活性,有助于在复杂弯曲的支气管树中到达更外周的病变。Zhang等^[38]在2024年发表了Meta分析评估机器人支气管镜活检在诊断外周结节方面的诊断率和安全性,纳入10项队列研究共681例患者,725个肺结节,其中6项研究使用Ion RAB,4项研究使用Monarch RAB。荟萃分析显示,RAB的总体诊断率为80.4%,并发症发生率为3.0%。另一项纳入了13项使用Ion RAB,6项使用Monarch RAB的Meta分析显示,RAB的总体诊断率为84.96%,其中恶性病变诊断率为81.79%^[39]。RAB的平均操作时间61.86 min,并发症的发生率为4.76%。与以往针对ENB的前瞻性、多中心队列研究结果相比,RAB在诊断效能上具有更大的优势^[12,40]。特别提出的是,CBCT联合RAB提高PPL诊断阳性率至93.3%^[29],冷冻活检则提高诊断阳性率至97.0%^[32]。在安全性方面,RAB具有高度安全性,与其他支气管镜技术无明显差异。

表1 机器人支气管镜检查平台的技术差异

Table 1 Technical differences in robotic bronchoscopy platforms

Variable	Monarch system	Ion system	Galaxy system
Navigation technology	Electromagnetic navigation	Shape sensing	Electromagnetic with digital tomosynthesis TiLT+Technology™
Catheter outer diameter	Outer sheath:6 mm, Inner scope:4.2 mm	3.5 mm	4.0 mm
Working channel diameter	2.1 mm	2.0 mm	2.1 mm
Vision during biopsy	Yes	No	Yes
The availability of 5G remote capability	No	No	No

7 RAB 的不足

影响RAB系统对PPL诊断率的主要原因是CTBD,即导航路线规划时预测的目标位置与行支气管镜检查时实际目标位置之间的差异。在术前规划阶段,使用全吸气时获得的薄层CT来创建气道的虚拟三维重建并绘制通往目标病变的虚拟路径。然而,在行检查时患者处于全身麻醉状态,肺体积小前期CT扫描时的肺体积,因此虚拟三维重建与

现实情况并不完全匹配。除此以外,胸部CT扫描与支气管镜检查之间的时间间隔、结节大小的变化、膈肌运动和肺不张等可进一步加重CTBD^[41]。同样,全身麻醉引起的肺不张被认为是影响PPL诊断率另一个原因,肺不张可在插管数分钟内发生,结节位置改变,与术前CT不一致,导致r-EBUS产生假阳性结果。为了确认活检工具和实际目标的位置关系,将定位辅助技术(如CBCT)与RAB系统的联合使用,可以消除r-EBUS假阳性带来的影响,

有助于对 CTBD 进行实时校正,提高 PPL 的活检诊断率。

8 RAB 未来发展方向

RAB 提高了支气管镜到达 PPL 成功率和诊断率,并为实施消融治疗提供一个稳定的平台^[42]。研究已经证明了支气管镜引导下消融治疗的可行性,如光动力治疗、微波消融、射频消融和冷冻消融等^[43]。在进行介入治疗时,RAB 可以保持仪器在气管内的稳定性,提高病变组织定位的效率和准确性,是经自然通道、微创、精准定位、快速诊断及治疗的方法,未来在肺结节治疗方面具有独特优势。此外,有研究正在探索经 RAB 直接向肿瘤内注射化疗药物和其他治疗剂,以增强局部肿瘤微环境中免疫疗法效果^[44]。

RAB 还可用于肺结节术前定位,在胸腔微创手术中具有重要作用,RAB 到达病灶后,通过导管注射吲哚菁绿等特殊染料,相比经皮穿刺具有无创、高效等优势^[45]。

9 小 结

RAB 是一项新兴技术,其诞生旨在克服传统支气管镜和导航支气管镜检查对 PPL 活检的一些限制。RAB 具有高精度、高准确性、高稳定性、高灵活性的优势,与磁导航辅助下支气管镜检查及普通支气管镜检查相比,有更高的准确性、诊断率,并发症也相对较少。RAB 与 X 线透视、r-EBUS、CBCT 等定位辅助技术的结合可以进一步提高准确性。机器人支气管镜系统在使用经支气管镜消融治疗不可手术的 PPL 中具有巨大潜力。相信随着其技术的不断开发完善,以及更多临床试验数据的支持,机器人支气管镜技术将更好地得以应用,成为临床医生诊断治疗肺外周病变的有力工具。

利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

Conflict of Interests:

The authors report no conflicts of interest in this work.

作者贡献声明:

陈淑娟负责稿件的撰写起草、稿件的修改;方申存负责稿件的撰写起草;侯志波负责提出综述选题、稿件修改。

Author's Contributions:

CHEN Shujuan was responsible for writing original draft, reviewing and editing; FANG Shencun was responsible for writing original draft; HOU Zhibo was responsible for proposing review topics and revising manuscripts.

[参考文献]

- [1] MEZA R, JEON J, TOUMAZIS I, et al. Evaluation of the benefits and harms of lung cancer screening with low-dose computed tomography: modeling study for the US preventive services task force[J]. JAMA, 2021, 325(10): 988-997
- [2] WALTER K. Pulmonary nodules[J]. Jama, 2021, 326(15): 1544
- [3] KIM J, CHEE C G, CHO J, et al. Diagnostic accuracy and complication rate of image-guided percutaneous transthoracic needle lung biopsy for subsolid pulmonary nodules: a systematic review and meta-analysis[J]. Br J Radiol, 2021, 94(1127): 20210065
- [4] JIN K N, PARK C M, GOO J M, et al. Initial experience of percutaneous transthoracic needle biopsy of lung nodules using C-arm cone-beam CT systems[J]. Eur Radiol, 2010, 20(9): 2108-2115
- [5] OHNO Y, HATABU H, TAKENAKA D, et al. CT-guided transthoracic needle aspiration biopsy of small(≤ 20 mm) solitary pulmonary nodules[J]. AJR Am J Roentgenol, 2003, 180(6): 1665-1669
- [6] HEERINK W J, DE BOCK G H, DE JONGE G J, et al. Complication rates of CT-guided transthoracic lung biopsy: meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2017, 27(1): 138-148
- [7] AMACK S, ROX M, MITCHELL J, et al. Design and control of a compact, modular robot for transbronchial lung biopsy[J]. Proc Spie Int Soc Opt Eng, 2019, 10951: 109510I
- [8] ASAHINA H, YAMAZAKI K, ONODERA Y, et al. Transbronchial biopsy using endobronchial ultrasonography with a guide sheath and virtual bronchoscopic navigation[J]. Chest, 2005, 128(3): 1761-1765
- [9] IZUMO T, SASADA S, CHAVEZ C, et al. The diagnostic utility of endobronchial ultrasonography with a guide sheath and tomosynthesis images for ground glass opacity pulmonary lesions[J]. J Thorac Dis, 2013, 5(6): 745-750
- [10] STEINFORT D P, KHOR Y H, MANSER R L, et al. Radial probe endobronchial ultrasound for the diagnosis of peripheral lung cancer: systematic review and meta-analysis[J]. Eur Respir J, 2011, 37(4): 902-910
- [11] ASANO F, EBERHARDT R, HERTH F J F. Virtual bronchoscopic navigation for peripheral pulmonary lesions[J]. Respiration, 2014, 88(5): 430-440
- [12] FOLCH E E, PRITCHETT M A, NEAD M A, et al. Electromagnetic navigation bronchoscopy for peripheral pulmonary lesions: one-year results of the prospective, multi-center NAVIGATE study[J]. J Thorac Oncol, 2019, 14(3): 445-458

- [13] YANG W H, XU T Q, ZHANG Y, et al. Application of electromagnetic navigation bronchoscopy in the early diagnosis and treatment of lung cancer: a narrative review[J]. *Transl Cancer Res*, 2021, 10(3): 1583-1593
- [14] BONDUE B, TATON O, TANNOURI F, et al. High diagnostic yield of electromagnetic navigation bronchoscopy performed under cone beam CT guidance: results of a randomized Belgian monocentric study[J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 185
- [15] KOPS S E P, HEUS P, KOREVAAR D A, et al. Diagnostic yield and safety of navigation bronchoscopy: a systematic review and meta-analysis [J]. *Lung Cancer*, 2023, 180: 107196
- [16] MURGU S D. Robotic assisted - bronchoscopy: technical tips and lessons learned from the initial experience with sampling peripheral lung lesions [J]. *BMC Pulm Med*, 2019, 19(1): 89
- [17] CHEN A C, GILLESPIE C T. Robotic endoscopic airway challenge: reach assessment[J]. *Ann Thorac Surg*, 2018, 106(1): 293-297
- [18] CHEN A C, PASTIS N J, MACHUZAK M S, et al. Accuracy of a robotic endoscopic system in cadaver models with simulated tumor targets: access study [J]. *Respiration*, 2020, 99(1): 56-61
- [19] ROJAS-SOLANO J R, UGALDE-GAMBOA L, MACHUZAK M. Robotic bronchoscopy for diagnosis of suspected lung cancer: a feasibility study [J]. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2018, 25(3): 168-175
- [20] CHADDHA U, KOVACS S P, MANLEY C, et al. Robot-assisted bronchoscopy for pulmonary lesion diagnosis: results from the initial multicenter experience [J]. *BMC Pulm Med*, 2019, 19(1): 243
- [21] CHEN A C, PASTIS N J, MAHAJAN A K, et al. Robotic bronchoscopy for peripheral pulmonary lesions A multicenter pilot and feasibility study (BENEFIT) [J]. *Chest*, 2021, 159(2): 845-852
- [22] KHAN F, SEAMAN J, HUNTER T D, et al. Diagnostic outcomes of robotic-assisted bronchoscopy for pulmonary lesions in a real-world multicenter community setting [J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 161
- [23] AGRAWAL A, HO E, CHADDHA U, et al. Factors associated with diagnostic accuracy of robotic bronchoscopy with 12-month follow-up [J]. *Ann Thorac Surg*, 2023, 115(6): 1361-1368
- [24] KOPS S E P, HEUS P, KOREVAAR D A, et al. Diagnostic yield and safety of navigation bronchoscopy: a systematic review and meta-analysis [J]. *Lung Cancer*, 2023, 180: 107196
- [25] KALCHIEM-DEKEL O, CONNOLLY J G, LIN I H, et al. Shape-sensing robotic-assisted bronchoscopy in the diagnosis of pulmonary parenchymal lesions [J]. *Chest*, 2022, 161(2): 572-582
- [26] XIE F F, ZHANG Q C, MU C Y, et al. Shape-sensing robotic - assisted bronchoscopy (SS - RAB) in sampling peripheral pulmonary nodules: a prospective, multicenter clinical feasibility study in China [J]. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2024, 31(4): e0981
- [27] YARMUS L, AKULIAN J, WAHIDI M, et al. A prospective randomized comparative study of three guided bronchoscopic approaches for investigating pulmonary nodules: the PRECISION-1 study [J]. *Chest*, 2020, 157(3): 694-701
- [28] BENN B S, ROMERO A O, LUM M, et al. Robotic-assisted navigation bronchoscopy as a paradigm shift in peripheral lung access [J]. *Lung*, 2021, 199(2): 177-186
- [29] REISENAUER J, DUKE J D, KERN R, et al. Combining shape-sensing robotic bronchoscopy with mobile three-dimensional imaging to verify tool-in-lesion and overcome divergence: a pilot study [J]. *Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes*, 2022, 6(3): 177-185
- [30] PRITCHETT M, SCHIRMER C. Shape-sensing robotic assisted bronchoscopy for the diagnosis of peripheral pulmonary lesions [J]. *Chest*, 2021, 160(4): A1631-A1632
- [31] STYRVOKY K, SCHWALK A, PHAM D, et al. Shape-sensing robotic - assisted bronchoscopy with concurrent use of radial endobronchial ultrasound and cone beam computed tomography in the evaluation of pulmonary lesions [J]. *Lung*, 2022, 200(6): 755-761
- [32] OBERG C L, LAU R P, FOLCH E E, et al. Novel robotic-assisted cryobiopsy for peripheral pulmonary lesions [J]. *Lung*, 2022, 200(6): 737-745
- [33] BHADRA K, RICKMAN O B, MAHAJAN A K, et al. "Tool-in-lesion" accuracy of galaxy system-a robotic electromagnetic navigation Bronchoscopy with integrated tool-in-lesion-tomosynthesis technology: the MATCH study [J]. *J Bronchology Interv Pulmonol*, 2024, 31(1): 23-29
- [34] SAGHAIE T, WILLIAMSON J P, PHILLIPS M, et al. First-in-human use of a new robotic electromagnetic navigation bronchoscopic platform with integrated tool-in-lesion tomosynthesis (TiLT) technology for peripheral pulmonary lesions: the FRONTIER study [J]. *Respirology*, 2024, 29(11): 969-975
- [35] 占 雄, 张飘艺, 周 刚, 等. 一种新型支气管镜手术机器人系统 [J]. *中国医疗器械杂志*, 2023, 47(1): 19-25
- ZHAN X, ZHANG P Y, ZHOU G, et al. A novel robotic bronchoscopic surgical system [J]. *Chinese Journal of*

- Medical Instrumentation, 2023, 47(1): 19–25
- [36] 任嘉霖, 刘凯. 四川大学华西医院: 完成全国首例国产机器人辅助经支气管镜肺结节活检术[J]. 中华医学信息导报, 2022, 37(7): 7
REN J L, LIU K. West China Hospital of Sichuan University: Completed the first domestic robot-assisted transbronchial lung nodule biopsy in China [J]. China Medical News, 2022, 37(7): 7
- [37] 钟长镐, 周子青, 马家骏, 等. 机器人支气管镜系统对比格犬肺外周预置弹簧圈定位及移除的有效性和安全性初步探究[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2021, 44(12): 1071–1077
ZHONG C H, ZHOU Z Q, MA J J, et al. Effectiveness and safety of robotic assisted-bronchoscopy system in locating and removing spring coils placed in the peripheral lung of beagle dogs: a pilot study [J]. Chinese Journal of Tuberculosis and Respiratory Diseases, 2021, 44(12): 1071–1077
- [38] ZHANG C X, XIE F F, LI R C, et al. Robotic-assisted bronchoscopy for the diagnosis of peripheral pulmonary lesions: a systematic review and meta-analysis [J]. Thorac Cancer, 2024, 15(7): 505–512
- [39] 郭超, 张家齐, 李楨, 等. 机器人支气管镜在肺结节活检中有效性与安全性的系统评价与Meta分析[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2023, 30(2): 226–232
- [40] FOLCH E E, BOWLING M R, PRITCHETT M A, et al. NAVIGATE 24 - month results: electromagnetic navigation bronchoscopy for pulmonary lesions at 37 centers in Europe and the United States [J]. J Thorac Oncol, 2022, 17(4): 519–531
- [41] PRITCHETT M A, BHADRA K, CALCUTT M, et al. Virtual or reality: divergence between preprocedural computed tomography scans and lung anatomy during guided bronchoscopy [J]. J Thorac Dis, 2020, 12(4): 1595–1611
- [42] CHADDHA U, KYLE HOGARTH D, MURGU S. Bronchoscopic ablative therapies for malignant central airway obstruction and peripheral lung tumors [J]. Ann Am Thorac Soc, 2019, 16(10): 1220–1229
- [43] ROZMAN A, GRABCZAK E M, GEORGE V, et al. Interventional bronchoscopy in lung cancer treatment [J]. Breathe (Sheff), 2024, 20(2): 230201
- [44] DEMAIIO A, STERMAN D. Bronchoscopic intratumoural therapies for non-small cell lung cancer [J]. Eur Respir Rev, 2020, 29(156): 200028
- [45] CHAN J W Y, CHANG A T C, YU P S Y, et al. Robotic assisted-bronchoscopy with cone-beam CT ICG dye marking for lung nodule localization: experience beyond USA [J]. Front Surg, 2022, 9: 943531

[收稿日期] 2025-01-14

(本文编辑: 戴王娟)