

吲哚菁绿引导示踪下机器人胃癌手术的应用现状及发展前景

胡祥 范义川 张驰

大连医科大学附属第一医院胃肠外科, 大连 116011

通信作者: 胡祥, Email: huxdmu@126.com

【摘要】 随着机器人手术技术的不断发展, 吲哚菁绿作为一种荧光染料在机器人胃癌手术中的应用逐渐受到关注。吲哚菁绿能够通过局部或静脉注射在肿瘤组织中积聚, 实现对肿瘤及相关淋巴结的实时成像, 从而提高手术的精确性和安全性。吲哚菁绿在机器人胃癌手术中能够有效识别肿瘤边界、降低漏切风险, 并改善患者预后。然而, 目前仍需进一步优化成像技术、开展大规模临床试验, 并结合人工智能等新技术, 以提高吲哚菁绿应用的可靠性与效果。未来, 吲哚菁绿在机器人辅助胃癌手术中的广阔应用前景, 有望进一步推动胃癌治疗的精准医学进程。笔者深入分析机器人手术系统的发展演变、吲哚菁绿示踪的生物特性、吲哚菁绿示踪在胃癌微创领域的应用等内容, 旨在探讨吲哚菁绿在该领域的应用现状及发展前景。

【关键词】 胃肿瘤; 机器人手术; 吲哚菁绿; 荧光成像; 应用现状; 发展前景

基金项目: 国家自然科学基金(81572883)

Application status and development prospects of indocyanine green-guided robotic gastrectomy

Hu Xiang, Fan Yichuan, Zhang Chi

Department of Gastrointestinal Surgery, The First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China

Corresponding author: Hu Xiang, Email: huxdmu@126.com

【Abstract】 With the continuous development of robotic surgery technology, the application of indocyanine green (ICG) as a fluorescent dye in robotic gastrectomy has gradually attracted attention. ICG can accumulate in tumor tissues through local or intravenous injection, enabling real-time imaging of tumors and related lymph nodes, thereby enhancing the precision and safety of surgery. ICG can effectively aid in identifying tumor boundaries, reducing the risk of missed excisions, and improving postoperative prognosis in robotic gastrectomy. However, further optimization of imaging technology, large-scale clinical trials, and integration with new technologies such as artificial intelligence are still needed to enhance the reliability and efficacy of ICG application. In the future, the broad prospect of ICG in robotic assisted-gastrectomy is expected to promote the precision medicine process of gastric cancer treatment. The authors analyze the development and evolution of robotic surgical systems, the biological characteristics of ICG tracing, and the application of ICG tracing in the minimally invasive field of gastric cancer, aiming to explore the application status and development prospects of ICG in this field.

【Key words】 Stomach neoplasms; Robotic surgery; Indocyanine green; Fluorescence imaging; Application status; Development prospects

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81572883)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20250103-00005

收稿日期 2025-01-03

引用本文: 胡祥, 范义川, 张驰. 吲哚菁绿引导示踪下机器人胃癌手术的应用现状及发展前景[J]. 中华消化外科杂志, 2025, 24(3): 310-316. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20250103-00005.



胃癌是全世界范围内发病率和致死率较高的恶性肿瘤,其早期诊断和精准治疗对改善患者预后至关重要^[1]。早期胃癌淋巴结转移发生率较低,避免过度淋巴结清扫是减少并发症、提高生命质量的重要因素。对于进展期胃癌,提高淋巴结清扫数目及阳性淋巴结检出数目对患者的准确分期及预后改善具有重要意义^[2]。日本胃癌协会规定的各组淋巴结中,如果有>1组的淋巴结未被清扫,即为淋巴结清扫不合规^[3]。淋巴结清扫不合规被认为是一个有效评估淋巴结清扫质量的方法,目前淋巴结清扫不合规被认为是胃癌根治术患者预后不良的独立危险因素^[4]。淋巴结清扫数目不足和淋巴结清扫不合规现象是困扰广大胃癌微创外科医师的难题。不增加术中并发症同时高效精准地获取足量的淋巴结是术者特别是初学者的挑战。

机器人手术技术因其精细的操作、出色的可视化效果和更小的创伤,逐渐成为胃癌手术的选择方案之一。与此同时,吲哚菁绿作为一种具有良好生物相容性的荧光示踪剂,近年来在肿瘤定位和术中成像方面显示出广阔的应用前景。吲哚菁绿能够通过局部注射或静脉注射,在肿瘤组织和淋巴系统、胆道系统中快速聚集,使外科医师在手术过程中更清晰地辨别肿瘤边界,识别淋巴系统及周围结构,可提高根治性切除及淋巴结检出率、保证消化道重建后血供稳定、减少吻合口相关并发症发生率、改善患者生命质量^[5]。

然而,尽管吲哚菁绿在机器人胃癌手术中具有显著优势,其临床应用仍面临技术挑战。如荧光信号可能受到各种生理因素和技术水平的影响,导致成像效果不佳。吲哚菁绿示踪技术是否可改善机器人胃癌手术淋巴结可视化水平、提高淋巴结检出率是目前研究者探索的重要方向。因此,深入研究吲哚菁绿与机器人手术系统的结合应用,有助于提升手术的精准性和安全性。笔者深入阐述吲哚菁绿示踪下机器人胃癌手术的应用现状,探讨其在临床实践中的效果与限制,展望未来的发展趋势,旨在为胃癌的治疗提供新思路与方法。

一、机器人手术系统的发展演变

达芬奇机器人手术系统是一种广泛应用于微创外科手术的机器人系统。自问世以来,达芬奇机器人在外科领域取得显著成就,标志着医疗机器人技术的一个重要里程碑。它通过提供更高的精度、灵活性和可视化效果,极大推动了外科手术的发展。

机器人手术的历史可以追溯到 20 世纪 80 年

代。随着微创外科手术的需求日益增长,传统的手术方式逐渐暴露出局限性,如切口大、出血量多、术后恢复时间长等问题。1999 年,Intuitive Surgical 公司推出达芬奇机器人手术系统,经历了三代机器人的发展与技术革新,第 4 代达芬奇机器人手术系统于 2014 年发布。从第 4 代开始,荧光系统升级为标准配置设备。这种名为萤火虫[®]的荧光技术具有 Firefly 高敏荧光功能,通过支持荧光功能的内窥镜,采集和显示近红外荧光信号,提供实时的图像引导,操作医师可随时切换显像模式,识别血管、胆管、淋巴系统和组织灌注情况等^[6]。

二、吲哚菁绿示踪的生物特性

Hiratsuka 等^[7]首次在开放胃手术中应用吲哚菁绿染色识别前哨淋巴结。近年来荧光成像技术得到较广泛应用,在乳腺癌、非小细胞肺癌、黑色素瘤等肿瘤前哨淋巴结定位上取得肯定的效果^[8-10]。吲哚菁绿是一种诊断性试剂,在波长 ≥ 820 nm 的激光束或近红外光激发后显像,吲哚菁绿激发出的荧光可通过专门研发的内窥镜和成像系统检测^[11]。(1)肿瘤周围注射吲哚菁绿有助于定位原发病灶。(2)吲哚菁绿具有淋巴趋向性,通过局部黏膜下或浆膜下注射后,吲哚菁绿可被淋巴系统吸收,并与淋巴系统中的 Alb 结合,随淋巴系统引流至淋巴结最终回流至血液系统,实现前哨淋巴结和淋巴链可视化。由于淋巴系统回流缓慢,其可在淋巴结内停留并显影>3 d,可指导淋巴结清扫范围。(3)静脉注射吲哚菁绿可以确认残胃的组织灌注充足情况。吲哚菁绿通过静脉注入体内,结合 Alb,由血液运输到肝脏,再经胆汁排到十二指肠,是可显示肝外胆道系统和评估胃肠手术组织灌注的理想化合物^[12]。(4)荧光血管造影还能使肠系膜血管弓可视化。利用不同组织吲哚菁绿摄取率不同的原理,术中可有效区分淋巴组织与胃肠道周围血管、脂肪等其他组织。

三、吲哚菁绿示踪在胃癌微创领域的应用基础

过去 10 年,吲哚菁绿荧光成像技术在腹腔镜胃癌根治术中的效果已得到国内外同行的认可并广泛应用^[13-15]。2004 年,日本临床肿瘤研究组开展 1 项基于吲哚菁绿示踪的胃癌前哨淋巴结活检的多中心临床研究(JCOG0302),但因术中吲哚菁绿的给药方式及病理学检查方法的缺陷造成假阴性率过高[46%(13/28)]而被迫中止^[16]。后续的研究在吲哚菁绿给药方式和病理学检查流程上不断优化,使吲哚菁绿荧光淋巴结示踪实现了淋巴结更高

检出率和准确率。黄昌明教授团队开展国际首项吲哚菁绿示踪在腹腔镜胃癌淋巴结清扫术中临床疗效的前瞻性 RCT(FUGES-012 研究, ClinicalTrials.Gov, NCT03050879)^[17], 结果显示: 吲哚菁绿示踪技术可指导临床医师行腹腔镜胃癌根治术时, 不增加术后并发症发生率的情况下, 且有效检出更多淋巴结并降低淋巴结清扫不合规率。该团队后续 1 项单中心前瞻性 RCT(FUGES-019 研究, ClinicalTrials.Gov, NCT04219332) 首次证实术中浆膜下注射吲哚菁绿较术前黏膜下注射展示出更优的操作便利性和更低的经济负担^[15]。根据以上研究成果, 中华医学会外科学分会胃肠外科学组发表布《吲哚菁绿近红外光成像技术在腹腔镜胃癌根治术中应用中国专家共识(2023 版)》^[18]。该共识明确了吲哚菁绿具体注射方法, 并指出吲哚菁绿应用的适应证包括: (1) 早期胃癌患者, 建议利用吲哚菁绿成像进行术中快速肿瘤定位; 并可行前哨淋巴结活检。(2) 拟行保留功能胃癌根治术如保留幽门胃癌根治术的患者, 建议通过吲哚菁绿荧光成像行淋巴结引流范围显影并可用于鉴别不同组织。(3) 术中静脉注射吲哚菁绿适用于术中评估胃壁、肠壁、吻合口血供及食管下端、十二指肠残端, 器官如脾脏、肝脏血供。禁忌证为碘剂过敏患者。

针对前哨淋巴结活检的安全性问题, 2018 年韩国开展前瞻性、多中心、Ⅲ期 RCT(SENORITA 试验), 探讨前哨淋巴结清扫的腹腔镜功能保留手术治疗早期胃癌是否具有肿瘤学安全性, 并制订 7 步法前哨淋巴结清扫技术^[19]。该项研究 2020 年发表的短期结果显示: 258 例前哨淋巴结导航手术患者中, 210 例(81.4%) 行保胃手术(包括内镜下黏膜剥离术、内镜下全层切除术、腹腔镜胃楔形切除术或腹腔镜节段胃切除术)^[20]。腹腔镜标准胃切除术组和腹腔镜前哨淋巴结导航手术组术后并发症分别为 19.0% 和 15.5%, Clavien-Dindo Ⅲ级及以上并发症发生率分别为 5.9% 和 5.0%, 两组比较, 差异均无统计学意义^[20]。因此, 该研究表明早期胃癌行腹腔镜前哨淋巴结导航手术后并发症发生率和严重程度与腹腔镜标准胃切除术相当。延续的 SENORITA 临床试验结果显示: 与标准胃切除术比较, 腹腔镜前哨淋巴结导航下的保留胃手术与腹腔镜标准胃切除术患者具有更好的长期生命质量和营养情况^[21]。所得结果有助于早期胃癌患者治疗决策的选择。

拟继续开展的 SENORITA-2 试验, 旨在探讨前哨淋巴结导航技术在腹腔镜黏膜下剥离术后再行腹

腔镜手术的可行性, 探究内镜黏膜下剥离术联合前哨淋巴结活检治疗的安全性和有效性。保留胃的原发肿瘤切除术是一种针对早期胃癌的微创治疗方法, 目前包括内镜黏膜下剥离术、部分胃切除术、节段胃切除术及全胃保留术。根据以上经验, 达芬奇机器人胃周淋巴结清扫联合内镜下黏膜剥离术也将逐步应用于临床。

四、吲哚菁绿示踪在机器人胃癌手术中的应用现状

作为达芬奇机器人手术系统的一部分, 荧光成像技术有助于克服缺乏触觉反馈的问题, 并提高安全性。机器人胃癌手术淋巴结清扫过程中采用荧光模式, 能够显著提高解剖层面的可视化质量, 协助寻找正确解剖间隙进行淋巴结清扫, 从而优化清扫过程。难以鉴别血管与淋巴结时, 可使用荧光模式进行甄别。清扫结束后, 可使用荧光模式检查有无遗漏淋巴结。见图 1。因此, 荧光成像技术可保证淋巴结清扫更彻底、更安全。

此外, 荧光标记淋巴结中的肿瘤状态可以高精度地预测整体标本中淋巴结状态。因此, 该领域通过两个层次的新研究目标, 验证荧光成像机器人胃切除术中淋巴结清扫的可行性及其作用: (1) 探讨荧光示踪手术(“导航手术”)的潜在优势。(2) 评估将吲哚菁绿标记的淋巴结作为肿瘤扩散状态预测因素的可能性(“靶向手术”)^[22]。

笔者团队回顾性对比分析达芬奇机器人手术系统辅助及腹腔镜下保留幽门及迷走神经胃部分切除术治疗早期胃癌的临床疗效, 结果显示: 两组患者均顺利完成手术, 无中转开腹; 行机器人手术患者术后总并发症、胃排空障碍、反酸、肺不张、切口感染、高淀粉酶血症、尿潴留发生率均低于腹腔镜对照组^[23]。此外, 笔者团队还回顾性研究 190 例患者分别行机器人及腹腔镜胃癌手术, 主要观察指标为手术和术后恢复情况以及术后并发症情况, 结果显示: 机器人手术组总并发症发生率低于腹腔镜手术组[28.9%(26/90)比 44.0%(44/100)]; 亚组分析结果显示: 男性、BMI<25 kg/m²、ASA 分级 2~3 级、术前合并基础疾病以及 TNM 分期 I~II 期的患者行机器人手术总并发症发生率更低($P<0.05$)^[24]。

(一) 吲哚菁绿示踪下机器人胃癌手术的研究现状

1. 淋巴结示踪

2010 年以后吲哚菁绿的临床应用价值被关注, 相关研究也如雨后春笋般涌现。多项研究结果表

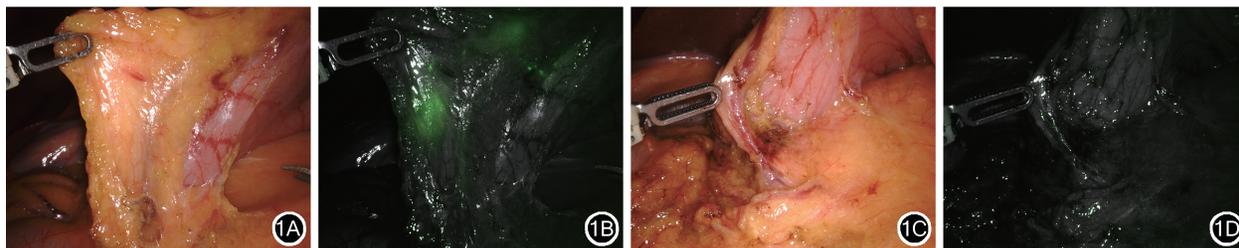


图1 吲哚菁绿示踪下机器人胃癌根治术中成像情况 1A:幽门下区清扫前普通光镜成像;1B:幽门下区清扫前近红外光成像淋巴结荧光信号;1C:幽门下区清扫后普通光镜成像;1D:幽门下区清扫后近红外光成像下无荧光信号

Figure 1 Intraoperative imaging of robotic gastrectomy under indocyanine green tracing 1A: Conventional light microscopy imaging before pyloric dissection; 1B: Near infrared imaging of lymph node with fluorescence signal before pyloric dissection; 1C: Conventional light microscopy imaging after pyloric dissection; 1D: Near infrared imaging of lymph node without fluorescence signal after pyloric dissection

明吲哚菁绿可以指导外科医师在腹腔镜或机器人胃切除术中有效清扫更多淋巴结。2023年1篇荟萃分析纳入5项研究的结果显示:吲哚菁绿示踪下机器人胃癌手术的淋巴结检出数目高于非吲哚菁绿组,两组患者术中出血量及术后并发症比较,差异均无统计学意义,吲哚菁绿示踪可缩短整体手术时间^[25]。

Kwon等^[26]和Romanzi等^[27]的前瞻性研究结果显示:吲哚菁绿组淋巴结清扫数目显著高于非吲哚菁绿组,注射荧光剂消耗的时间对于整体手术时间可以忽略不计。

Lan等^[28]回顾性分析79例行机器人胃癌根治术患者资料,其中14例行吲哚菁绿示踪下机器人胃癌根治术,65例行常规机器人胃癌根治术,结果显示:两组患者手术时间、出血量、淋巴结总检出数目比较,差异均无统计学意义;吲哚菁绿组胃大弯下(第4d及6组)淋巴结检出数目多于非吲哚菁绿组;5例发生淋巴结转移,且转移淋巴结位于淋巴显影区域;且荧光成像质量的决定因素是吲哚菁绿注射的剂量,而不是注射途径或注射和手术之间的持续时间。但Cianchi等^[29]和Fujimoto等^[30]的回顾性研究结果显示:机器人吲哚菁绿组患者的淋巴结检出总数目明显高于对照组。但Cianchi等^[29]认为:该技术对转移性淋巴结未能显示良好的选择性。

Fujimoto等^[30]分析393例Ⅱ期或Ⅲ期胃癌患者的临床资料,分为腹腔镜组(288例)、吲哚菁绿腹腔镜组(61例)和吲哚菁绿机器人手术组(44例),结果显示:吲哚菁绿机器人手术组成功率(检出>30枚淋巴结的患者)最高(90.9%),吲哚菁绿示踪的机器人手术是实现淋巴结清扫的重要预测因素($OR=3.151$)。

以上研究结果的差异,除了回顾性研究选择偏倚、不同研究纳入标准不一等原因外,不同研究所用吲哚菁绿注射方式、点位、时间、浓度不同,同时机器人手臂缺乏触觉反馈所造成的造影剂外漏,均是导致结果不一的重要原因。Calcara等^[31]指出术前内镜黏膜下注射吲哚菁绿简单、有效,但术中浆膜下注射也可行。《吲哚菁绿近红外光成像技术在腹腔镜胃癌根治术中应用中国专家共识(2023版)》也指出:浆膜下注射吲哚菁绿展示出更优的操作便利性和更低的经济及精神负担,推荐优先选择浆膜下注射吲哚菁绿^[18]。

2. 消化道吻合口血运评估

实时吲哚菁绿近红外荧光成像可以有效评估切缘血供及胃癌术后胃肠道吻合处的血液灌注。吲哚菁绿最终会扩散至低灌注区域,故推荐在静脉注射后10~30s至4~5min观察目标区域,通过荧光成像直观判断脏器的血运情况。DeLong等^[32]首次在机器人食管切除术中展示荧光系统评估移植胃的活性,通过近红外光模式显示微血管的绿色灌注一直通向移植胃的尖端,吻合口血运良好。

Hayakawa等^[33]纳入55例行机器人远端胃手术患者,采用Billroth I式消化道重建三角吻合法,通过静脉注射吲哚菁绿的方法评估吻合口血运,结果显示:45例患者吻合口荧光显影(血运良好),10例血运欠佳且存在较多变异肝左血管。以吲哚菁绿为基础的血流评价可能是预防三角吻合中吻合口并发症的有效方法。de Groot等^[34]应用吲哚菁绿判断机器人减重手术后吻合口漏的发生情况,150例患者均使用吲哚菁绿识别漏液,其中4例检测到漏液,漏液发生率为2.66%。

目前的临床应用研究在评估吻合口血流灌注方面存在局限性,如荧光强度缺少客观量化标准,

只能依靠术者主观评估;缺少定量测量组织灌注的手段。Nerup 等^[35]建立实验猪模型,旨在探索量化组织血流灌注的方法。在实验动物的胃标记感兴趣区域后,通过胃的灌注血管注入吲哚菁绿荧光剂和中子活化微球,并使用近红外光系统对标记区域进行照射,以计算局部血流灌注,并发现局部血流灌注与荧光曲线斜率间存在很强的相关性,与他们推导出的算法具有较高一致性。尽管动物模型显示定量预测组织灌注可行,但将该结果转化为临床应用的研究尚待完成。

3. 肿瘤定位

术前内镜下于肿瘤周围黏膜下 4 点注射吲哚菁绿,有助于术中精准定位肿瘤,保证 R₀ 切除。Nakanishi 等^[36]采用以上方法为 6 例早期胃下部癌患者行吲哚菁绿示踪机器人远端胃切除术,每例均能保证 2 cm 阴性上切缘。但是 Osminin 等^[37]开展的 43 例小样本研究认为吲哚菁绿示踪并不能影响切缘阳性数量($P=0.883$)。

(二) 吲哚菁绿示踪下机器人胃癌手术存在的局限问题

目前关于吲哚菁绿示踪下机器人胃癌手术的研究样本量较小,患者基线特征存在较大异质性,手术方式也各不相同,其优势及推广还需多中心、大样本的高级别循证医学证据支持,以明确其临床价值和对照预后的影响。另一个挑战是未检出的淋巴结吲哚菁绿染色的低敏感性,这代表潜在的转移风险,并阻碍了完全依靠吲哚菁绿荧光引导的淋巴结清扫^[31]。因此,对于疑似淋巴结转移的胃癌患者,D₁或D₂淋巴结清扫仍然是标准操作。另外,对于行新辅助治疗后患者,吲哚菁绿示踪技术是否可行,仍需开展研究。除此之外,还有以下两方面问题亟待解决。

1. 成像设备的依赖性

吲哚菁绿的有效应用依赖于高质量的成像系统和设备,与腹腔镜荧光系统比较,达芬奇机器人系统在荧光成像技术上存在局限性。腹腔镜荧光系统可进行多种模式显像:重叠荧光模式翡翠绿和深海蓝双色可选、黑白荧光模式、强度导航模式,还能在光镜下进行增强调节,使得荧光信号更为鲜明,背景对比度更高,从而极大地提升肿瘤和正常组织的识别能力。然而,达芬奇机器人手术系统的荧光模式仅能呈现“负显影”特性。在这种模式下,吲哚菁绿浸润的位置会显现出明亮的荧光绿色,而其周围的组织则呈现黑色背景。外科医师需要不

断切换不同的视图模式,以找到合适的视角进行淋巴结清扫,这不仅增加操作的复杂性,还可能导致手术时间的延长和视觉疲劳。

2. 示踪剂外溢

目前第四代达芬奇机器人手术系统仍无法提供触觉反馈,医师不能直接感知组织的阻力和质地变化,行术中浆膜下注射荧光剂时,当注射针头穿透胃壁,如果没有准确的手感反馈,医师可能无法及时判断注射器是否已达到预期深度,从而增加示踪剂外溢风险。一旦吲哚菁绿示踪剂外溢至胃腔外或者周围组织,不仅会导致荧光信号的非特异性分布,还可能掩盖肿瘤和正常组织间的界限,干扰外科医师在手术期间的判断。

五、吲哚菁绿示踪机器人胃癌手术未来发展前景

吲哚菁绿示踪机器人胃癌手术在胃外科领域中对于血管解剖结构的可视化、肿瘤定位、前哨淋巴结示踪和转移性淋巴结定位以及吻合口血流灌注评估已得到初步证实,未来仍有很大的发展空间等待探索。

(一) 技术创新和设备升级

对机器人系统进行技术升级,引入更高分辨率的荧光成像技术、集成多种显像模式,以更好地识别肿瘤和淋巴结。此外,结合先进的光学成像设备,如多光谱成像和超高分辨率成像,将有助于提供更清晰的可视化效果,改善术中判断效果。

(二) AI 与数据分析

AI 在医学影像分析中的应用正逐渐普及,可以帮助医师更准确地解读荧光成像图像。在吲哚菁绿示踪机器人手术中,AI 技术可以用于实时分析荧光信号,从而提高对肿瘤及淋巴结的定位能力,增强手术的精准性。此外,机器学习算法可以帮助识别微小淋巴结,通过模式识别和自动化数据分析,减少判断的主观性和不确定性。

(三) 研发精准化荧光示踪剂

目前广泛使用的吲哚菁绿示踪效果满意,但仍存在缺陷:(1)信噪比高,灵敏度低。(2)特异性和靶向性差,导致假阴性。(3)光稳定性差。应积极研发肿瘤组织特异性示踪剂,如生物标志物响应型荧光示踪剂,对于肿瘤组织,由于示踪剂具有高靶向性,能够高效靶向趋化至肿瘤组织,实现不同部位肿瘤组织实时检测、手术引导以及转移性淋巴结可视化识别,更为精准地指导肿瘤及微小转移灶可视化切除,提高手术疗效和患者预后。

(四) 临床试验与标准化

目前, 吲哚菁绿在机器人胃癌手术中的应用仍处于研究阶段, 对于吲哚菁绿的注射方法、部位、时间和剂量应制订机器人行业标准和规范; 未来需要进行更多大规模 RCT, 以验证其临床效果和安全性, 提供更为可靠的证据支持, 制订相应的操作标准和指南, 促进吲哚菁绿在机器人手术中的普遍应用。

六、结语

吲哚菁绿引导示踪下的机器人胃癌手术代表微创外科的精准化趋势, 其技术融合显著提升手术安全性和功能保留效果。随着技术的不断提高和临床研究的深入, 其在胃癌治疗中发挥越发重要的作用。然而, 目前仍面临手术费用高昂、基层医院设备不足等挑战, 需通过国产替代、医保政策支持及规范化培训体系加速该技术普及。笔者预测: 未来吲哚菁绿引导示踪下机器人胃癌根治术通过“精准定位+智能操作”的双重突破, 为胃癌治疗提供更安全、高效且功能保留性更优的解决方案, 或将成为胃癌外科治疗的主流模式, 推动个体化诊疗目标的实现。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Arnold M, Abnet CC, Neale RE, et al. Global burden of 5 major types of gastrointestinal cancer[J]. *Gastroenterology*, 2020,159(1):335-349.e15. DOI:10.1053/j.gastro.2020.02.068.
- [2] Japanese Gastric Cancer Association. Japanese gastric cancer treatment guidelines 2021 (6th edition)[J]. *Gastric Cancer*, 2023,26(1):1-25. DOI:10.1007/s10120-022-01331-8.
- [3] 日本胃癌学会. 胃癌取扱い規約[M]. 15 版. 東京: 金原出版株式会社, 2017.
- [4] 林光铨, 陈起跃, 郑朝辉, 等. 腹腔镜胃癌手术淋巴结不符合与预后相关性及其影响因素分析[J]. *中国实用外科杂志*, 2020,40(7):830-836. DOI:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2020.07.24.
- [5] Landsman ML, Kwant G, Mook GA, et al. Light-absorbing properties, stability, and spectral stabilization of indocyanine green[J]. *J Appl Physiol*, 1976,40(4):575-583. DOI:10.1152/jappl.1976.40.4.575.
- [6] Lee YJ, van den Berg NS, Orosco RK, et al. A narrative review of fluorescence imaging in robotic-assisted surgery[J]. *Laparosc Surg*, 2021, 5:31. DOI:10.21037/lis-20-98.
- [7] Hiratsuka M, Miyashiro I, Ishikawa O, et al. Application of sentinel node biopsy to gastric cancer surgery[J]. *Surgery*, 2001,129(3):335-340. DOI:10.1067/msy.2001.111699.
- [8] Vahrmeijer AL, Hutteman M, van der Vorst JR, et al. Image-guided cancer surgery using near-infrared fluorescence[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2013,10(9):507-518. DOI:10.1038/nrclinonc.2013.123.
- [9] Valente SA, Al-Hilli Z, Radford DM, et al. Nearinfrared fluorescent lymph node mapping with indocyanine green in breast cancer patients: a prospective trial[J]. *J Am Coll Surg*, 2019,228(4):672-678. DOI:10.1016/j.jamcollsurg.2018.12.001.
- [10] Yamashita S, Tokuishi K, Anami K, et al. Video-assisted thoracoscopic indocyanine green fluorescence imaging system shows sentinel lymph nodes in non-small-cell lung cancer[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2011,141(1):141-144. DOI:10.1016/j.jtcvs.2010.01.028.
- [11] Alander JT, Kaartinen I, Laakso A, et al. A review of indocyanine green fluorescent imaging in surgery[J]. *Int J Biomed Imaging*, 2012,2012:940585. DOI:10.1155/2012/940585.
- [12] Keller DS, Ishizawa T, Cohen R, et al. Indocyanine green fluorescence imaging in colorectal surgery: overview, applications, and future directions[J]. *Lancet Gastroenterol Hepatol*, 2017,2(10):757-766. DOI:10.1016/S2468-1253(17)30216-9.
- [13] Miyashiro I, Miyoshi N, Hiratsuka M, et al. Detection of sentinel node in gastric cancer surgery by indocyanine green fluorescence imaging: comparison with infrared imaging[J]. *Ann Surg Oncol*, 2008,15(6):1640-1643. DOI:10.1245/s10434-008-9872-7.
- [14] Tajima Y, Yamazaki K, Masuda Y, et al. Sentinel node mapping guided by indocyanine green fluorescence imaging in gastric cancer[J]. *Ann Surg*, 2009,249(1):58-62. DOI:10.1097/SLA.0b013e3181927267.
- [15] Chen QY, Zhong Q, Li P, et al. Comparison of submucosal and subserosal approaches toward optimized indocyanine green tracer-guided laparoscopic lymphadenectomy for patients with gastric cancer (FUGES-019): a randomized controlled trial[J]. *BMC Med*, 2021,19(1):276. DOI:10.1186/s12916-021-02125-y.
- [16] Miyashiro I, Hiratsuka M, Sasako M, et al. High false-negative proportion of intraoperative histological examination as a serious problem for clinical application of sentinel node biopsy for early gastric cancer: final results of the Japan Clinical Oncology Group multicenter trial JCOG0302[J]. *Gastric Cancer*, 2014,17(2):316-323. DOI:10.1007/s10120-013-0285-3.
- [17] Chen QY, Xie JW, Zhong Q, et al. Safety and efficacy of indocyanine green tracer-guided lymph node dissection during laparoscopic radical gastrectomy in patients with gastric cancer: a randomized clinical trial[J]. *JAMA Surg*, 2020, 155(4):300-311. DOI:10.1001/jamasurg.2019.6033.
- [18] 中华医学会外科学分会胃肠外科学组. 吲哚菁绿近红外光成像技术在腹腔镜胃癌根治术中应用中国专家共识(2023 版)[J/OL]. *中华普通外科学文献(电子版)*, 2023,17(3):161-168[2025-01-02]. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/Ch9QZXJpb2RpY2FsQ0hJTMV3UzlwMjUwMTE2MTYzNjE0EhJ6aHB0d2t4d3gyMDIzMDMwMDEaCG5kbXppOHFfx>. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-0793.2023.03.001.
- [19] An JY, Min JS, Lee YJ, et al. Safety of laparoscopic sentinel basin dissection in patients with gastric cancer: an analysis from the SENORITA prospective multicenter quality control trial[J]. *J Gastric Cancer*, 2018,18(1):30-36. DOI:10.5230/jgc.2018.18.e6.
- [20] An JY, Min JS, Hur H, et al. Laparoscopic sentinel node navi-

gation surgery versus laparoscopic gastrectomy with lymph node dissection for early gastric cancer: short-term outcomes of a multicentre randomized controlled trial (SENORITA)[J]. Br J Surg,2020,107(11):1429-1439. DOI: 10.1002/bjs.11655.

[21] Eom BW, Yoon HM, Kim YW, et al. Quality of life and nutritional outcomes of stomach-preserving surgery for early gastric cancer: a secondary analysis of the SENORITA randomized clinical trial[J]. JAMA Surg,2024,159(8):900-908. DOI:10.1001/jamasurg.2024.1210.

[22] Desiderio J, Trastulli S, Gemini A, et al. Fluorescence image-guided lymphadenectomy using indocyanine green and near infrared technology in robotic gastrectomy[J]. Chin J Cancer Res,2018,30(5):568-570. DOI:10.21147/j.issn.1000-9604.2018.05.11.

[23] 范义川,张驰,魏茂华,等.第4代达芬奇机器人手术系统辅助保留幽门及迷走神经胃部分切除术治疗早期胃癌的临床疗效[J].中华消化外科杂志,2023,22(8):1014-1020. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20230512-00205.

[24] 范义川,张驰,梁品,等.第4代达芬奇机器人手术系统与腹腔镜辅助胃癌根治术的近期疗效对比分析[J].中华胃肠外科杂志,2024,27(8):808-815. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20231017-00138.

[25] Zhang Z, Deng C, Guo Z, et al. Safety and efficacy of indocyanine green near-infrared fluorescent imaging-guided lymph node dissection during robotic gastrectomy for gastric cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. Minim Invasive Ther Allied Technol,2023,32(5):240-248. DOI: 10.1080/13645706.2023.2165415.

[26] Kwon IG, Son T, Kim HI, et al. Fluorescent lymphography-guided lymphadenectomy during robotic radical gastrectomy for gastric cancer[J]. JAMA Surg,2019,154(2):150-158. DOI:10.1001/jamasurg.2018.4267.

[27] Romanzi A, Mancini R, Ioni L, et al. ICG-NIR-guided lymph node dissection during robotic subtotal gastrectomy for gastric cancer. A single-centre experience[J]. Int J Med Robot, 2021,17(2):e2213. DOI:10.1002/rcs.2213.

[28] Lan YT, Huang KH, Chen PH, et al. A pilot study of lymph node mapping with indocyanine green in robotic gastrectomy for gastric cancer[J]. SAGE Open Med, 2017, 5: 2050312117727444. DOI:10.1177/2050312117727444.

[29] Cianchi F, Indennitate G, Paoli B, et al. The clinical value of fluorescent lymphography with indocyanine green during robotic surgery for gastric cancer: a matched cohort study [J]. J Gastrointest Surg,2020,24(10): 2197-2203. DOI: 10.1007/s11605-019-04382-y.

[30] Fujimoto D, Taniguchi K, Takashima J, et al. Indocyanine green tracer-guided radical robotic distal gastrectomy using the firefly™ system improves the quality of lymph node dissection in patients with gastric cancer[J]. J Gastrointest Surg,2023,27(9): 1804-1811. DOI:10.1007/s11605-023-05740-7.

[31] Calcara C, Cociolillo S, Marten Canavesio Y, et al. Endoscopic fluorescent lymphography for gastric cancer[J]. World J Gastrointest Endosc,2023,15(2): 32-43. DOI: 10.4253/wjge.v15.i2.32.

[32] DeLong JC, Kelly KJ, Jacobsen GR, et al. The benefits and limitations of robotic assisted transhiatal esophagectomy for esophageal cancer[J]. J Vis Surg,2016,2:156. DOI:10.21037/jovs.2016.09.01.

[33] Hayakawa S, Ogawa R, Ueno S, et al. Impact of the indocyanine green fluorescence method for anastomotic blood flow in robotic distal gastrectomy[J]. Surg Today,2022,52(10):1405-1413. DOI:10.1007/s00595-022-02476-w.

[34] de Groot EM, Kuiper GM, van der Veen A, et al. Indocyanine green fluorescence in robot-assisted minimally invasive esophagectomy with intrathoracic anastomosis: a prospective study[J]. Updates Surg,2023,75(2):409-418. DOI: 10.1007/s13304-022-01329-y.

[35] Nerup N, Andersen HS, Ambrus R, et al. Quantification of fluorescence angiography in a porcine model[J]. Langenbecks Arch Surg,2017,402(4):655-662. DOI:10.1007/s00423-016-1531-z.

[36] Nakanishi K, Tanaka C, Kanda M, et al. Preoperative indocyanine green fluorescence injection to accurately determine a proximal margin during robotic distal gastrectomy [J]. Asian J Endosc Surg,2023,16(1):152-156. DOI:10.1111/ases.13121.

[37] Osminin SV, Vetshev FP, Bilyalov IR, et al. Fluorescence navigation and angiography with indocyanine green in stomach cancer surgery[J]. Khirurgiia (Mosk),2024,(2.Vyp.2): 34-41. DOI:10.17116/hirurgia202402234.

广告目次

强生(上海)医疗器械有限公司……………封二
 奥林巴斯(北京)销售服务有限公司……………对中文目次 1
 上海微创医疗机器人(集团)股份有限公司……………对中文目次 2
 柯惠医疗器械国际贸易(上海)有限公司……………对英文目次 1
 宁波市金迈得医疗科技有限公司……………对英文目次 2
 雅培贸易(上海)有限公司……………对正文 1

《中华医学杂志》社有限责任公司……………406a
 雅培贸易(上海)有限公司……………406b
 广东欧谱曼迪科技股份有限公司……………406c
 雅培贸易(上海)有限公司……………对封三
 费森尤斯卡比华瑞制药有限公司……………封三
 柯惠医疗器械国际贸易(上海)有限公司……………封四