

## · 文献综述 ·

# 基于数字医学的手术规划及导航在胃肠外科中的应用进展<sup>\*</sup>

张贵棋 综述 吴东波<sup>\*\*</sup> 审校

(广西医科大学第四附属医院普通外科, 柳州 545027)

文献标识:A

文章编号:1009-6604(2024)02-0143-07

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2024.02.013

2001 年钟世镇院士在香山会议提出“中国数字人”的构想,拉开了我国数字化研究虚拟人的序幕<sup>[1]</sup>。近年来,以三维可视化、3D 打印、仿真模拟和分子成像为代表的数字医学技术已经改变了人们对传统医疗的认知<sup>[2]</sup>,特别在人工智能(artificial intelligence, AI)兴起后,在计算机辅助疾病诊断、分期分型、拟定治疗方案、疗效及预后评估等方面不断获得新的突破。

随着计算机辅助技术与分子成像技术的发展,数字医学的手术规划及导航凭借精准、高效的特点,已越来越多地应用到腹部外科各领域,推动传统经验手术向精准、实时的数字智能化手术转变,在提高手术安全性、实现精准根治、减少术后并发症及改善预后等方面发挥积极作用<sup>[3]</sup>。本文对基于数字医学的术前规划和术中导航在胃肠外科的应用进行文献总结。

## 1 术前规划和术中导航技术的概述

手术规划利用术前现有资料和个人经验进行病情评估和手术模拟,以制定个体化手术方案。手术导航系统结合术前资料,应用计算机仿真和影像学技术实时地指导外科医生进行手术,清晰展现手术目标与邻近解剖结构,达到精准的切除和更好的手术效果。目前,这些技术已在骨科、神经外科和肝胆外科方面广泛应用。通过术前评估和模拟评价,可

以降低手术难度和围手术期风险。应用增强现实等仿真技术和多模态导航技术可以提高手术安全性,避免重要解剖结构的损伤,并符合精准切除的理念。

## 2 术前规划和术中导航技术在胃肠外科应用的现状

### 2.1 在胃癌手术的应用

胃的周围血管交织复杂,常发生血管变异<sup>[4]</sup>。对血管变异的认识不足是造成术中出血与血管损伤的重要因素之一<sup>[5,6]</sup>,增加手术难度,甚至影响手术成败。通过三维重建技术,可以清晰展示包括腹腔干及其分支、门静脉及其分支在内的血管走行,有助于了解血管变异类型和肿瘤的大小、位置、形态,以及肿瘤与血管的空间位置关系。结合虚拟现实与 3D 打印,术者可以加深对肿瘤具体情况的认识<sup>[7]</sup>,通过手术规划及导航最大程度地减小手术难度,避免血管损伤<sup>[8]</sup>。董金付等<sup>[9]</sup>对 42 例胃癌行腹部血管三维重建和手术规划指导,6 例(14.3%)发现胃周血管变异,且术中分型与三维重建结果一致,与 42 例 CT 组比较,三维组手术时间明显缩短[(258.7 ± 49.7) min vs. (309.4 ± 53.9) min,  $P < 0.05$ ],术中出血量明显减少[(164.8 ± 31.5) ml vs. (225.5 ± 40.6) ml,  $P < 0.05$ ],输血例数少(0 例 vs. 5 例)。吴东波等<sup>[10]</sup>应用自行研发软件,建立以胰腺为中心的腹腔干及其分支、门静脉及其分支的三维图像重建,并应用于 4 例胃癌的术前规划和术中引导,重建

\* 基金项目:国家自然科学基金地区项目(81760324);柳州市科技计划项目(2022SB019);广西卫健委西医自筹科研课题(Z-B20231432, Z20210069)

\*\* 通讯作者, E-mail: wudongbobo@126.com

血管与术中所见一致,无大出血、血管误扎等术中并发症发生,1 例胃左静脉出现直接汇入门静脉的血管变异情况。Liu 等<sup>[11]</sup>应用海信计算机辅助系统对上述器官、血管三维重建,亦获得同样结果。3D 打印技术将虚拟模型物化,更利于外科医师对器官结构进行观察。吴宸等<sup>[12]</sup>打印胃癌及其周围血管 3D 模型,通过观察物理模型来加深对局部解剖结构的理解。Kim 等<sup>[13]</sup>利用吖啶菁绿(indocyanine green, ICG)实现术中不可预知的小血管的形态和起源识别,且在 80% (16/20) 的病例中正确识别幽门下动脉类型,表现出 ICG 的潜在应用价值。尽管三维可视化技术可以展示胃周围血管与组织器官的界限关系,但器官形变、运动伪影和血管变异等因素常导致三维模型显示效果不佳。此外,ICG 荧光技术需要额外的设备和材料,增加手术成本和操作难度。因此,需要进一步开发新的方法来增加对胃周血管的认识。

胃癌吻合口漏是术后常见的严重的短期并发症。局部血运欠佳会增加产生“漏”的风险,靠目视评估吻合口血运情况并不可靠。ICG 在早期多用于食管切除后评估重建胃管的血液供应<sup>[14]</sup>。Huh 等<sup>[15]</sup>采用 ICG 对 30 例胃癌手术中的吻合口和切缘进行血流灌注评估,结果显示 76.7% (23/30) 的患者成功实现有效的 ICG 血流灌注可视化。Hayakawa 等<sup>[16]</sup>采用 ICG 对 55 例远端胃切除术中三角吻合口处的血运情况进行评估,对 10 例显示血运不佳的部位进行切除,55 例均未发生吻合口漏。Mori 等<sup>[17]</sup>对 100 例胃癌多因素分析显示:吻合口两端 ICG 荧光信号出现的时间差是消化道重建后吻合口漏发生的独立影响因素( $OR = 35.361, 95\% CI: 1.489 \sim 839.923, P = 0.027$ )。此外,该时间差能够有效预测重建后吻合口漏的发生情况,受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)为 0.983。不可忽视的是,尽管 ICG 在评估吻合口的血液供应和完整性方面有一定价值,但它并不能直接评估吻合口的紧密程度和牢固性,为此仍需要其他手段来进行辅助评估吻合质量和稳定性。

肿瘤细胞转移是胃癌术后肿瘤复发与预后不良的独立危险因素。合理、彻底的淋巴结清扫对改善病人预后及减少手术并发症有一定意义<sup>[18]</sup>。利用

术前 CT 的影像组学特征开发训练预测模型,刘婧娟等<sup>[19]</sup>预测淋巴结转移,在测试集中的 AUC 为 0.7 (95%  $CI: 0.514 \sim 0.891$ ),模型准确度为 65.7%,与专业影像医师的诊断结果无统计学差异,可作为术式选择与淋巴结清扫范围的参考。同时,Dong 等<sup>[20]</sup>在 CT 二维图像中实现晚期胃癌隐蔽性腹膜转移的识别,外部数据的验证队列 AUC 达 0.925 (95%  $CI: 0.913 \sim 0.937$ )。ICG 早年作为胃癌的前哨淋巴结示踪剂使用<sup>[21]</sup>,但存在假阴性的可能。Shoji 等<sup>[22]</sup>对 20 例早期胃癌行 ICG 引导下前哨淋巴结活检,并采用一步核酸扩增法(one-step nucleic acid amplification, OSNA)对 48 枚前哨淋巴结进行癌细胞转移的检测,ICG 前哨淋巴结的识别率为 85% (17/20),OSNA 法提示有 1 枚前哨淋巴结为阳性,余 721 枚淋巴结组织学检查未发现阳性结果,从而证实 ICG 前哨淋巴结活检结合 OSNA 检测淋巴结转移的安全性和可行性。目前,ICG 多用于淋巴结的示踪清扫。Kwon 等<sup>[23]</sup>提出术前一天内镜下黏膜下注射 ICG 的显影方法,ICG 组清扫平均总淋巴结数显著高于历史对照组(48.9 枚 vs. 35.2 枚,  $P < 0.001$ )。已有多项研究<sup>[24,25]</sup>证明 ICG 作为手术导航工具在增加胃癌淋巴结清扫的安全性和价值。淋巴结显影是否代表肿瘤细胞淋巴结转移仍有待研究,且清扫范围外的显影淋巴结是否值得保留还需更多证据证明。

对青年外科医师而言,胃癌手术的难点在于解剖层次多、涉及范围广、器官毗邻关系复杂。增强现实技术可以将全息模型显示到术野解剖结构的画面里,且能够与组织器官相重叠,实现更直观的定位与导航<sup>[26]</sup>。由于空腔脏器及其周围血管往往存在空间活动性大、体表柔软易产生形变的问题,利用术前数据构建的三维模型易与术中情况产生差异,所以仿真技术在空腔脏器的研究中更多用于术前模拟规划。因此,近年有研究尝试开发人工智能视觉引导系统,通过识别分析腹腔镜手术画面,提供相关信息与建议,帮助术者在术中快速、精确找到关键解剖部位。Sato 等<sup>[27]</sup>通过机器学习技术对胃癌手术视频中胰腺的图像轮廓进行机器识别并勾画,外科医生勾画注释的区域与学习模型分割区域的均交并比为 0.7,实现效果较好的胰腺轮廓追踪。Fer 等<sup>[28]</sup>利用 AI 识别 Roux-en-Y 胃旁路术手术视频中的关键解

剖标志, AI 的勾画注释能力与手动标记相当, 在胃的游离、囊的构建与加固等步骤的识别甚至比人工更好。同时, 有学者研究尝试利用视觉系统辅助寻找术中的纱布、落针<sup>[29,30]</sup>, 有助于减少额外的时间浪费与提高手术安全性。目前有学者开始对适用于腹部器官分割的腹腔镜图像进行注释、整理<sup>[31~33]</sup>。随着未来 AI 的发展, 将来极有可能实现类似当前汽车自动驾驶的“自动手术”。

## 2.2 在结肠癌手术的应用

三维可视化技术作为一种手术辅助工具, 可以直观地看到器官与血管之间的全局位置和方向走行, 帮助外科医师准确定位肿瘤位置, 制定合理手术规划。Soriero 等<sup>[34]</sup>报道 14 例结直肠手术由 2 名外科医生分别采用三维重建模型和 CT 图像进行手术规划, 与 CT 图像相比, 三维重建模型在术中观察与肠镜的病变定位具有更高的一致性 ( $Kappa = 1$  vs.  $Kappa = 0.8056$ ), 2 例在结肠镜检查中发现可疑病变, 但外科医生在 CT 图像未能发现。国内多项研究<sup>[35~37]</sup>对腹腔干及其分支进行三维可视化研究, 以了解肿瘤周围血管的分布及变异情况。值得注意的是, 肠道的运动和形变常常导致术中所见结构与术前重建模型存在差异。为减小手术导航中差异对结果的影响, Hojo 等<sup>[38]</sup>用柔性丝状材料(热塑性聚氨酯)3D 打印可变形的右半结肠癌模型, 术中随着横结肠的运动, 肠系膜上动静脉及其分支的空间位置会发生改变, 但经过变形后的 3D 打印模型能够与实际情况保持一致。

提取影像学特征进行分析, 可预测肿瘤转移浸润的状态, 为手术方案的制定提供更全面的个体化信息。Yuan 等<sup>[39]</sup>将 ResNet-3D 算法和支持向量机算法结合, 用于检测结直肠癌患者的腹膜转移, 通过对 40 例 7837 张 CT 图像进行验证, 该模型准确率达 94.11%, 灵敏度为 93.75%, 特异性为 94.44%, 阳性预测值为 93.75%, 阴性预测值为 94.44%。Zhao 等<sup>[40]</sup>构建影像基因组学的数学模型, 预测结肠癌淋巴结转移及与其影像学特征相关的基因表型, 通过多组学交叉获得了更有可靠性的结果。同时, AI 技术为影像学特征中临床相关信息的提取提供一种强有力的工具。Bedrikovetski 等<sup>[41]</sup>纳入 12 项研究进行 meta 分析, 评估 AI 在结直肠癌术前淋巴结分期中的应用效果, 结果显示 AI 模型作为一种诊断工

具, 相较于放射组学模型 ( $AUC = 0.808$ , 95%  $CI$ :  $0.739 \sim 0.876$ ) 和放射科医师 ( $AUC = 0.688$ , 95%  $CI$ :  $0.603 \sim 0.772$ ), 在预测结直肠癌的淋巴结转移方面具有更好的诊断表现 ( $AUC = 0.917$ , 95%  $CI$ :  $0.882 \sim 0.952$ )。此外, 肿瘤的发生发展往往伴随新生营养血管的形成, 为肿瘤细胞的血行转移提供新的路径。肿瘤血管重建同样可以提示“可能”的转移范围。陈建新等<sup>[42]</sup>对右半结肠的肿瘤及其供血动脉三维重建, 并对其根部淋巴结进行清扫, 结果显示病理阳性的动脉供血转移淋巴结, 为术中清扫肝曲周围淋巴结的指证提供证据。虽然 AI 可以准确识别影像学特征, 但复杂结肠癌转移的处理仍需临床医生参与, 需要大规模临床实验数据进行训练和验证。同时, 预测结肠癌转移还需要综合其他临床信息进行全面评估, 以确保诊断的准确性和可靠性。

## 2.3 在直肠癌手术的应用

侧方淋巴结转移是肿瘤复发与预后不良的高危因素之一。侧方淋巴结清扫是一种高技术要求的外科手术, 涉及复杂血管、神经多, 术后极易出现性功能、排尿功能障碍等并发症。骨盆三维模型可以提高手术的安全性和准确性。Kim 等<sup>[43]</sup>在新辅助放化疗后, 建立包括骨盆、侧方淋巴结及动脉在内的直肠三维模型, 指导侧方淋巴结的清扫, 帮助外科医师增强对盆腔复杂结构的理解能力, 减少不必要的损伤。此外, Hojo 等<sup>[44]</sup>研究显示存在侧方淋巴结转移时, 外科医师更喜欢使用 3D 打印的骨盆模型进行术前模拟规划, 而不是评估传统的三维虚拟图像。还有学者尝试利用 AI 视觉识别、神经显影等技术, 力求避免关键膜结构与神经区域的损伤<sup>[45,46]</sup>。值得关注的是, 困难骨盆的狭窄空间会加大侧方淋巴结清扫的难度, 限制外科医师技术的发挥。利用三维重建模型, 外科医师可对腹腔镜中低位直肠癌手术的困难程度进行预测<sup>[47]</sup>, 以制定合理的手术方案和及时的手术模拟。由于操作界面结构复杂, 术中 ICG 导航在侧方淋巴结清扫中表现出独特优势。Zhou 等<sup>[48]</sup>报道术中 ICG 导航指导直肠癌侧方淋巴结清扫, ICG 组术中出血量更少 [ $(55.8 \pm 37.5)$  ml vs.  $(108.0 \pm 52.7)$  ml,  $P = 0.003$ ], 清扫的侧方淋巴结数量更多 [ $(11.5 \pm 5.9)$  枚 vs.  $(7.1 \pm 4.8)$  枚,  $P = 0.017$ ]。此外, ICG 还准确显示淋巴结和淋巴管的路径, 提供隐匿或遗漏淋巴结的线索, 实现尽可



能彻底的淋巴结切除。Kim 等<sup>[43]</sup>报道 ICG 指导下转移淋巴结清扫更彻底,40% (4/10) 患者在侧方淋巴结清扫后病理显示淋巴结转移。

直肠癌术后吻合口漏是外科医师术后密切关注的问题。良好的血供被认为是胃肠道手术预防吻合口并发症的重要因素之一。Yotsov 等<sup>[49]</sup>采用 CT 血管造影评估血管结扎和吻合口血供,结合 ICG 血管显影调整手术方案,结果显示 ICG 显影改变 26% (7/27) 病人的原有手术计划,且 27 例术后无吻合口漏。一项倾向性评分匹配后多中心队列研究<sup>[50]</sup>报道 ICG 在低位前切除术中评估断端血流灌注可以显著降低直肠吻合口漏发生率,与非 ICG 组比较,ICG 组 Clavien-Dindo 分级系统 II 级及以上吻合口漏发生率较低 [4.7% (10/211) vs. 10.4% (22/211),  $P=0.042$ ], III 级及以上吻合口漏发生率也较低 [2.8% (6/211) vs. 9.5% (20/211),  $P=0.007$ ]。多项 meta 分析<sup>[51-53]</sup>证实术中使用 ICG 显影可降低吻合口漏的发生率,ICG 预测直肠吻合口漏的发生是安全可行的。此外,吻合口漏发生率的降低似乎还能减少住院期间总体并发症的发生风险<sup>[43]</sup>。值得关注的是,近年来 3 项随机对照研究<sup>[54-56]</sup>均显示 ICG 可有效评估吻合口的血运情况,但 PILLAR 研究认为 ICG 不能降低吻合口漏的风险<sup>[55]</sup>。De Nardi 等<sup>[56]</sup>通过多中心的研究亦得出上述观点。FLAG 研究显示相对高位直肠癌(距肛缘 9~15 cm),ICG 的应用可以明显降低低位直肠癌(距肛缘 4~8 cm)吻合口漏的发生(14.4% vs. 25.7%,  $P=0.04$ )<sup>[54]</sup>。

术中加强输尿管和血管、神经的保护也是腹腔镜结直肠癌根治术的操作重点之一。利用 ICG 对输尿管逆行造影,在无创的情况下帮助外科医师辨认和保护输尿管<sup>[57]</sup>。吴德庆等<sup>[58]</sup>报道 27 例术中亚甲蓝输尿管显影观察双侧输尿管,显影的中位时间为 20 min。但是亚甲蓝输尿管显影最佳效果的剂量和使用方式有待进一步研究。李博等<sup>[59]</sup>对比术前增强 CT 和术中 ICG 血管造影识别和分类 32 例直肠癌肠系膜下动脉的效果,并指导手术操作,结果显示影像分型与荧光分型有统计学差异 ( $P=0.032$ ),与影像学分型相比,ICG 血管造影分型成功率更高 [100.0% (32/32) vs. 90.6% (29/32)],分型正确率也最高 [100.0% (32/32) vs. 81.3% (26/32)],

其中影像分型将 1 例 I 型误诊为 IV 型,1 例 II 型误诊为 I 型,1 例 II 型误诊为 III 型。在 ICG 辅助下,除 2 例 IV 型外,30 例成功保留左结肠动脉。Zhong 等<sup>[60]</sup>将 196 例直肠癌分为磁共振神经成像 (magnetic resonance neuroimaging, MRN) 组和非 MRN 组进行手术指导,男性患者中,MRN 组术后 6 个月泌尿功能和性功能评分均显著优于非 MRN 组 [(3.24 ± 1.23) 分 vs. (4.05 ± 1.41) 分,  $P<0.05$ ; (20.56 ± 1.94) 分 vs. (19.78 ± 1.88) 分,  $P<0.05$ ]; 女性患者中,MRN 组术后性功能评分也显著高于非 MRN 组 [(27.67 ± 2.50) 分 vs. (25.53 ± 2.03) 分,  $P<0.05$ ],且 MRN 组术前和术后性功能评分无统计学差异 ( $P=0.08$ )。此外,MRN 组手术前后对于上腹下神经、腹下神经、下腹下神经、盆神经、神经血管束和阴部神经的可见度无统计学差异 ( $P>0.05$ )。该研究显示出 MRN 在盆腔神经保护和减少术后泌尿生殖功能障碍发生率方面的潜力。

### 3 展望

确定无瘤切缘以提高患者的总体预后,是外科医师密切关注问题。分子显影技术可从细胞分子水平对肿瘤细胞进行可视化成像,为确定无瘤切缘提供可靠工具。肿瘤标记物单克隆抗体的靶向分子探针显影已实现术中肿瘤细胞检测<sup>[61]</sup>。近年来,光声分子影像技术的发展将光声成像与靶向分子探针的多模态显像技术应用于肿瘤诊疗中,有望提高早期癌症的检测率及成像引导的准确性,实现有效识别肿瘤边缘<sup>[62]</sup>。越来越多关于分子显影技术的研究已进入临床验证阶段,抗体载体等分子靶向运输技术的安全性和可靠性在临床验证中也取得了进展,结果令人期待。

虚拟现实 (virtual reality, VR)、增强现实 (augmented reality, AR) 技术在神经外科、骨科、腹部外科已被广泛应用。实时配准与及时的模型修正仍是空腔脏器导航中必须解决的难点之一,我们期待这一问题在 AI 与 AR 的结合下得到解决。值得注意的是,“自动手术”正在成为可能。目前,已有研究实现对器官和解剖层面的自动识别,未来系统实现自动解剖和避让解剖结构,并对术中潜在风险提出警告和建议不再遥远。此外,结合手术机器人,在外科医师监督下系统可以实现自动化机器人手术,

这一发展前景也令人振奋。

在大数据时代,以临床需求为导向,利用 AI 挖掘病历系统中有价值的临床基本特征和各项结果,并构建数学模型,将有望实现开发智能化疾病诊疗系统的目标。方国旭等<sup>[63]</sup>开发的肝病 AI 辅助诊疗系统,实现肝癌的快速诊断与评估,也为今后手术规划和导航的数字化方向提供一种新的思路。

数字医学的发展已为胃肠外科带来许多成果,但要步入数字医学 5.0 时代仍需很长的路程。未来光学分子显影技术、仿真技术、AI 和大数据的进一步发展与应用将为外科医师和病人带来更多益处。在手术规划和导航方面,只有在加强多学科合作和创新、推动多领域多组学的融合下,解决临床实践中的问题,探索医工结合的新可能,才能最终实现提高病人生活质量和延长生存期的目标。

## 参考文献

- 1 方驰华,顾 杨.数字医学技术在我国腹部外科临床应用现状、困难和发展前景.中国实用外科杂志,2013,33(1):25-29.
- 2 方驰华,刘允怡,蔡 伟.数字医学技术在我国普通外科应用的现状和前景.中华外科杂志,2017,55(1):11-14.
- 3 方驰华,田 捷,张 鹏.等.数字医学技术在肝胆胰外科的应用;20 年历史回顾与未来展望.中华外科杂志,2021,59(10):807-811.
- 4 Mu GC, Huang Y, Liu ZM, et al. Relationship between celiac artery variation and number of lymph nodes dissection in gastric cancer surgery. World J Gastrointest Oncol, 2019, 11(6):499-508.
- 5 杨 昆,胡建昆.4K 腹腔镜胃癌根治术右侧站位胰腺上区淋巴结清扫.中华消化外科杂志,2020,19(1):50-53.
- 6 周 岳,韩 博.不同胃周动脉类型胃癌患者围手术期结局及中期预后研究.检验医学与临床,2022,19(12):1644-1647,1652.
- 7 方驰华,张 鹏,刘允怡,等.肝胆胰疾病数字智能化诊疗核心技术、体系构建及其应用.中华外科杂志,2019,57(4):253-257.
- 8 Iino I, Kikuchi H, Suzuki T, et al. Comprehensive evaluation of three-dimensional anatomy of perigastric vessels using enhanced multidetector-row computed tomography. BMC Surg, 2022, 22(1):403.
- 9 董金付,陈剑锋,孙春荣,等.基于三维重建的腹腔镜下胃癌根治术临床效果.中华普外科手术学杂志(电子版),2021,15(2):154-156.
- 10 吴东波,张学军,马隆佰,等.腹腔血管和胰腺三维图像在胃癌术前规划和术中指导的初步探讨.中国临床新医学,2017,10(5):444-446.
- 11 Liu H, Wang F, Liu B, et al. Application of three-dimensional

reconstruction with a Hisense computer-assisted system in upper pancreatic lymph node dissection during laparoscopic-assisted radical gastrectomy. Asian J Surg, 2021, 44(5):730-737.

- 12 吴 宸,彭方兴,罗 亮,等.3D 打印技术在复杂胃肠道肿瘤手术中的应用研究.中国医学装备,2020,17(3):89-92.
- 13 Kim M, Son SY, Cui LH, et al. Real-time vessel navigation using indocyanine green fluorescence during robotic or laparoscopic gastrectomy for gastric cancer. J Gastric Cancer, 2017, 17(2):145-153.
- 14 Saito T, Yano M, Motoori M, et al. Subtotal gastrectomy for gastric tube cancer after esophagectomy: a safe procedure preserving the proximal part of gastric tube based on intraoperative ICG blood flow evaluation. J Surg Oncol, 2012, 106(1):107-110.
- 15 Huh YJ, Lee HJ, Kim TH, et al. Efficacy of assessing intraoperative bowel perfusion with near-infrared camera in laparoscopic gastric cancer surgery. J Laparoendosc Adv Surg Tech A, 2019, 29(4):476-483.
- 16 Hayakawa S, Ogawa R, Ueno S, et al. Impact of the indocyanine green fluorescence method for anastomotic blood flow in robotic distal gastrectomy. Surg Today, 2022, 52(10):1405-1413.
- 17 Mori M, Shuto K, Hirano A, et al. A novel parameter identified using indocyanine green fluorescence angiography may contribute to predicting anastomotic leakage in gastric cancer surgery. World J Surg, 2020, 44(8):2699-2708.
- 18 中国抗癌协会胃癌专业委员会.局部进展期胃癌规范化淋巴结清扫范围中国专家共识(2022 版).中华胃肠外科杂志,2022,25(4):277-283.
- 19 刘娟娟,刘 炜,薛华丹,等.基于增强 CT 的影像组学定量特征模型在预测胃癌分期中的价值.放射学实践,2022,37(9):1061-1067.
- 20 Dong D, Tang L, Li ZY, et al. Development and validation of an individualized nomogram to identify occult peritoneal metastasis in patients with advanced gastric cancer. Ann Oncol, 2019, 30(3):431-438.
- 21 Hiratsuka M, Miyashiro I, Ishikawa O, et al. Application of sentinel node biopsy to gastric cancer surgery. Surgery, 2001, 129(3):335-340.
- 22 Shoji Y, Kumagai K, Kamiya S, et al. Prospective feasibility study for single-tracer sentinel node mapping by ICG (indocyanine green) fluorescence and OSNA (one-step nucleic acid amplification) assay in laparoscopic gastric cancer surgery. Gastric Cancer, 2019, 22(4):873-880.
- 23 Kwon IG, Son T, Kim HI, et al. Fluorescent lymphography-guided lymphadenectomy during robotic radical gastrectomy for gastric cancer. JAMA Surg, 2019, 154(2):150-158.
- 24 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. *JAMA Surg*,2020,155(4):300–311.

25 Deng C, Zhang Z, Qi H, et al. Safety and efficacy of indocyanine green near-infrared fluorescent imaging-guided lymph nodes dissection during radical gastrectomy for gastric cancer: A systematic review and meta-analysis. *Front Oncol*,2022,12:917541.

26 Lim AK, Ryu J, Yoon HM, et al. Ergonomic effects of medical augmented reality glasses in video-assisted surgery. *Surg Endosc*, 2002,36:988–998.

27 Sato Y, Sese J, Matsuyama T, et al. Preliminary study for developing a navigation system for gastric cancer surgery using artificial intelligence. *Surg Today*,2022,52(12):1753–1758.

28 Fer D, Zhang B, Abukhalil R, et al. An artificial intelligence model that automatically labels Roux-en-Y gastric bypasses, a comparison to trained surgeon annotators. *Surg Endosc*, 2023, 37(7):5665–5672.

29 de la Fuente López E, Muñoz García Á, Santos Del Blanco L, et al. Automatic gauze tracking in laparoscopic surgery using image texture analysis. *Comput Methods Programs Biomed*,2020,190:105378.

30 Lai SL, Chen CS, Lin BR, et al. Intraoperative detection of surgical gauze using deep convolutional neural network. *Ann Biomed Eng*, 2023,51(2):352–362.

31 Carstens M, Rinner FM, Bodenstedt S, et al. The Dresden surgical anatomy dataset for abdominal organ segmentation in surgical data science. *Sci Data*,2023,10(1):3.

32 Bamba Y, Ogawa S, Itabashi M, et al. Object and anatomical feature recognition in surgical video images based on a convolutional neural network. *Int J Comput Assist Radiol Surg*,2021,16(11):2045–2054.

33 Kitaguchi D, Takeshita N, Matsuzaki H, et al. Development and validation of a 3-dimensional convolutional neural network for automatic surgical skill assessment based on spatiotemporal video analysis. *JAMA Netw Open*,2021,4(8):e2120786.

34 Soriero D, Batistotti P, Malinaric R, et al. Efficacy of high-resolution preoperative 3D reconstructions for lesion localization in oncological colorectal surgery-first pilot study. *Healthcare (Basel)*, 2022,10(5):900.

35 殷进丽,石娜,董昕昕,等.腹腔镜结肠癌根治术前行腹部CTA和结肠三维成像对手术的指导价值. *武警医学*,2020,31(5):409–413.

36 王庆国,秦俭,李念云,等.腹腔镜下右半结肠癌根治术术前CTA评价Henle干变异的价值. *放射学实践*,2021,36(8):1038–1041.

37 杨强帮,戎祯祥,张浩,等.腹腔镜右半结肠癌D3根治术的术前MSCT三维重建观测指标的探讨. *广东医学*,2016,37(18):2757–2759.

38 Hojo D, Kawai K, Muro K, et al. Establishment of deformable three-dimensional printed models for laparoscopic right hemicolectomy in transverse colon cancer. *ANZ J Surg*,2021,91(7–8):E493–E499.

39 Yuan Z, Xu T, Cai J, et al. Development and validation of an image-based deep learning algorithm for detection of synchronous peritoneal carcinomatosis in colorectal cancer. *Ann Surg*,2022,275(4):e645–e651.

40 Zhao J, Wang H, Zhang Y, et al. Deep learning radiomics model related with genomics phenotypes for lymph node metastasis prediction in colorectal cancer. *Radiother Oncol*,2022,167:195–202.

41 Bedrikovetski S, Dudi-Venkata NN, Kroon HM, et al. Artificial intelligence for pre-operative lymph node staging in colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis. *BMC Cancer*,2021, 21(1):1058.

42 陈建新,袁燕文,彭伟谦,等.三维重建技术在腹腔镜右半结肠癌D3根治术中的应用. *南方医科大学学报*,2022,42(5):760–765.

43 Kim HJ, Choi GS, Park JS, et al. S122: impact of fluorescence and 3D images to completeness of lateral pelvic node dissection. *Surg Endosc*,2020,34:469–476.

44 Hojo D, Muro K, Nozawa H, et al. Utility of a three-dimensional printed pelvic model for lateral pelvic lymph node dissection. *Int J Colorectal Dis*,2020,35(5):905–910.

45 Igaki T, Kitaguchi D, Kojima S, et al. Artificial intelligence-based total mesorectal excision plane navigation in laparoscopic colorectal surgery. *Dis Colon Rectum*,2022,65(5):e329–e333.

46 Jin H, Zheng L, Lu L, et al. Near-infrared intraoperative imaging of pelvic autonomic nerves: a pilot study. *Surg Endosc*,2022, 36(4):2349–2356.

47 颜惠华,楼征,生晶,等.CT三维重建骨盆测量预测全直肠系膜切除手术的困难程度. *中华胃肠外科杂志*,2011,14(11):846–850.

48 Zhou SC, Tian YT, Wang XW, et al. Application of indocyanine green-enhanced near-infrared fluorescence-guided imaging in laparoscopic lateral pelvic lymph node dissection for middle-low rectal cancer. *World J Gastroenterol*,2019,25(31):4502–4511.

49 Yotsov T, Karamanliev M, Maslyankov S, et al. Mesenteric vascular evaluation with pre-operative multidetector computed tomographic angiography and intraoperative indocyanine green angiography to reduce anastomotic leaks after minimally invasive surgery for colorectal cancer. *JSLs*,2022,26(3):e2022.00022.

50 Watanabe J, Ishibe A, Suwa Y, et al. Indocyanine green fluorescence imaging to reduce the risk of anastomotic leakage in laparoscopic low anterior resection for rectal cancer: a propensity score-matched cohort study. *Surg Endosc*,2020,34(1):202–208.

51 Song M, Liu J, Xia D, et al. Assessment of intraoperative use of indocyanine green fluorescence imaging on the incidence of anastomotic leakage after rectal cancer surgery: a PRISMA-compliant systematic review and meta-analysis. *Tech Coloproctol*,

2021,25(1):49–58.

52 Pang HY, Chen XL, Song XH, et al. Indocyanine green fluorescence angiography prevents anastomotic leakage in rectal cancer surgery: a systematic review and meta-analysis. *Langenbecks Arch Surg*,2021,406(2):261–271.

53 Liu D, Liang L, Liu L, et al. Does intraoperative indocyanine green fluorescence angiography decrease the incidence of anastomotic leakage in colorectal surgery? A systematic review and meta-analysis. *Int J Colorectal Dis*,2021,36(1):57–66.

54 Alekseev M, Rybakov E, Shelygin Y, et al. A study investigating the perfusion of colorectal anastomoses using fluorescence angiography: results of the FLAG randomized trial. *Colorectal Dis*, 2020,22(9):1147–1153.

55 Jafari MD, Pigazzi A, McLemore EC, et al. Perfusion assessment in left-sided/low anterior resection (PILLAR III): A randomized, controlled, parallel, multicenter study assessing perfusion outcomes with PINPOINT near-infrared fluorescence imaging in low anterior resection. *Dis Colon Rectum*,2021,64(8):995–1002.

56 De Nardi P, Elmore U, Maggi G, et al. Intraoperative angiography with indocyanine green to assess anastomosis perfusion in patients undergoing laparoscopic colorectal resection: results of a multicenter randomized controlled trial. *Surg Endosc*,2020,34(1):53–60.

57 White LA, Joseph JP, Yang DY, et al. Intraureteral indocyanine green augments ureteral identification and avoidance during complex robotic-assisted colorectal surgery. *Colorectal Dis*, 2021, 23 ( 3 ): 718–723.

58 吴德庆,杨悦生,张维富.等. 静脉滴注亚甲蓝溶液在腹腔镜下结肠直肠术中输尿管显影中的应用. *中华胃肠外科杂志*,2022, 25(12):1098–1103.

59 李博,胡刚,邱文龙.等. 原始荧光模式下吲哚菁绿荧光血管造影技术辅助结肠癌根治术中保留左结肠动脉可行性研究. *中国实用外科杂志*,2023,43(5):578–582.

60 Zhong G, Yang B, Zhong J, et al. Magnetic resonance neuroimaging promotes the preservation of pelvic autonomic nerves in laparoscopic total mesorectal excision: a comparative study. *Ann Transl Med*,2021,9(24):1756.

61 Boogerd LSF, Hoogstins CES, Schaap DP. et al. Safety and effectiveness of SGM-101, a fluorescent antibody targeting carcinoembryonic antigen, for intraoperative detection of colorectal cancer: a dose-escalation pilot study. *Lancet Gastroenterol Hepatol*, 2018,3(3):181–191.

62 He L, Zhang Y, Chen J, et al. A multifunctional targeted nanoprobe with high NIR-II PAI/MRI performance for precise theranostics of orthotopic early-stage hepatocellular carcinoma. *J Mater Chem B*,2021,9(42):8779–8792.

63 方国旭,郭鹏飞,范鉴慧.等. 基于可解释人工智能的临床决策支持系统:孟超肝病外脑. *中华消化外科杂志*,2023,22(1):70–80.

(收稿日期:2023–06–20)

(修回日期:2023–10–15)

(责任编辑:李贺琼)