

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.18.023

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240614.1659.017\(2024-06-15\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240614.1659.017(2024-06-15))

光学相干断层扫描在上消化道早癌诊断中的应用进展*

李俊杰, 窦维佳[△], 王 新

(空军军医大学第二附属医院消化内科, 西安 710038)

[摘要] 食管癌、胃癌是常见的上消化道恶性肿瘤。中国作为食管癌、胃癌的高发国家,大部分患者确诊时已是进展期,其5年生存率不到20%。若能实现上消化道肿瘤的早诊、早治,其5年生存率将超过90%,可以明显改善患者的预后。光学相干断层扫描(OCT)是一种无创、高分辨率、非侵入性光学成像技术,可以提供毫米量级深度、微米量级分辨率的生物组织微解剖图像。一方面可用于快速、无创地检测病变组织、器官、血管或腺体,另一方面还可以识别肿瘤早期病变的光学特征,对于上消化道肿瘤的早期诊断具有重要意义。该文综述了OCT的原理、分类,总结OCT在上消化道早癌中的最新应用进展,并探讨OCT结合人工智能(AI)技术进行深度学习的潜力。

[关键词] 光学相干断层扫描;上消化道早癌;人工智能;综述

[中图分类号] R735.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)18-2847-07

Advances in application of optical coherence tomography in diagnosis of upper gastrointestinal tract early cancer*

LI Junjie, DOU Weijia[△], WANG Xin

(Department of Gastroenterology, Second Affiliated Hospital of Air Force Military Medical University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

[Abstract] Oesophageal cancer and gastric cancer are the most common malignant tumors of the upper gastrointestinal tract. As a country with a high incidence of oesophageal cancer and gastric cancer, most patients are already in the progressive stage when diagnosed, and their 5-year survival rate is less than 20%. If early diagnosis and early treatment of upper digestive tract tumors can be achieved, the 5-year survival rate will exceed 90%, which can significantly improve the prognosis of the patients. Optical coherence tomography (OCT) is a non-traumatic, high-resolution, non-invasive optical imaging technique that provides microanatomical images of biological tissues at millimetre depth and micron resolution. On the one hand, it can be used for rapidly and non-invasively detecting the tissues, organs, blood vessels or glands in lesions. On the other hand, it can also identify the optical features of early tumor lesions, which has an important significance in the early diagnosis of upper gastrointestinal tract tumor. This paper reviewed the principle and classification of OCT, summarizes the latest application progress of OCT in upper gastrointestinal early cancer, and discussed the potential of OCT combined with artificial intelligence technology in deep learning.

[Key words] optical coherence tomography; upper gastrointestinal tract early cancer; artificial intelligence; review

食管癌和胃癌是常见的上消化道肿瘤。据2020年全球癌症统计,食管癌、胃癌发病率分别居恶性肿瘤的第五和第七位,死亡率居第四和第六位。2020年全球上消化道恶性肿瘤新增病例约170万,其中我国新增约80万,全球死亡病例约130万,我国死亡约67.5万^[1-2]。面对其“高发病率、高死亡率”的流行特征,如果能够在疾病早期阶段及时诊治,不仅能提高患者的长期生存率,还能减少手术风险及创伤,降低

并发症发生率,提高患者生活质量。因此,上消化道肿瘤早发现、早诊断、早治疗尤为重要,也受到了越来越多的关注。上消化道早癌是指局限于黏膜及黏膜下层的病变,病变范围较小,且淋巴转移风险低,若此时能够得到及时诊治,可明显改善患者预后。但该阶段病变往往缺乏典型的临床症状及体征,常易被忽视,很难得到及时的诊断与治疗,极易造成误诊、漏诊,最终发展至进展期癌,危及患者生命。胃镜是上

* 基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021SF-182);空军军医大学临床研究资助计划项目(2022LC2231)。△ 通信作者, E-mail: weijia_dou@126.com。

消化道早癌检出和诊断的重要工具, 尽管传统白光内镜已经取得了长足进展, 但较小的或平坦的病变往往隐蔽, 由于分辨率和透光性的限制, 可能会被漏诊^[3]。虽然目前临床可用有放大和窄带成像功能的高清晰度内镜识别食管和胃的早期病变, 也可用喷洒有色染料的色素内镜增强黏膜的细节观察, 但上述检查不仅耗时, 而且由于操作者经验不同会导致对结果解释的主观性较大。内镜光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)因其高分辨率和良好的成像能力, 在提高早期病变诊断准确性和改善疾病预后方面显示出了巨大的潜力。本文介绍了 OCT 的基本情况, 对 OCT 在上消化道早癌中的诊断效能进行综述, 并对其与人工智能(artificial intelligence, AI)技术的结合现状进行了探讨。

1 OCT 的原理及分类

OCT 是一种无创、高分辨率、非侵入性光学成像技术, 最早由 HUANG 等^[4]在 1991 年提出, 其使用低相干干涉测量法以类似于超声脉冲回波成像的方式从内部组织微结构产生光学散射的二维图像。OCT 发展至今, 已被广泛应用于各种生物医学领域, 包括眼科、口腔科、皮肤科、肿瘤科、泌尿科和心血管科等。OCT 技术在消化系统相关领域的动物实验最早应用于 1997 年^[5], 人体消化系统试验研究也在同年开展^[6]。

光的低相干干涉测量原理是 OCT 成像的基础, 主要测量光束在被样本反射后的传播延时和反射信号的强度, 其原理类似于超声成像。基于迈克尔逊干涉仪, 间接测量延时和反射强度。通过改变参照镜的相对位置, 可以检测到不同深度组织的背向散射光的强度^[7]。在轴向上, 针对组织表面不同深度的回波序列形成强度分布(A-scan), 多点 A-scan 重建产生组织的二维横断面图像, 称为 B-scan^[8]。然后通过在不同位置重建 B-scan 来获得组织的三维结构。

OCT 成像技术经历时域 OCT (time-domain OCT, TD-OCT)、谱域 OCT (spectral-domain OCT, SD-OCT) 和扫描源 OCT (swept source OCT, SS-OCT)。基于时域检测的第一代 OCT 系统, 依赖组织反射信号相对于参考镜反射信号的时间延迟测量。目标组织反射的光信号与参考镜反射的光信号叠加干涉形成 OCT, 该过程需要移动机械参考臂, 从而改变被扫描组织的深度^[9]。正是由于需要不断移动参考臂, TD-OCT 慢慢地被傅立叶域 OCT (fourier domain OCT, FD-OCT) 所取代。由于使用超快频率扫描光源而非机械参考镜, 与 TD-OCT 相比, FD-OCT 具有高 3 倍的空间分辨率和 10 倍的图像采集速度^[10]。FD-OCT 有两种实现方式即 SD-OCT 和 SS-OCT。SD-OCT 结构中参考臂的参考镜是固定的, 用

光谱仪测量干扰信号的频谱^[11], 数据采集率可以提高 45~100 倍^[12]。与 TD-OCT 相比, SD-OCT 具有更高的灵敏度^[13]、更好的分辨率和下降更少的信噪比^[14]。SS-OCT 又称为光频域成像(optical frequency domain imaging, OFDI), 它使用波长扫描光源和光电探测器测量干涉信号的光谱^[3]。归因于较成熟的元器件和较低的成本, 目前应用 SS-OCT 较为普遍。

内窥式 OCT 是将 OCT 的光学成像设备与内镜相结合, 提供食管、胃肠道高分辨率的图像。随着 OCT 技术的不断成熟, 成像探头已经成为内镜 OCT 应用的主要开发领域, 其与患者直接互动, 从而确定光学参数和机械参数等影响图像质量的重要特征^[3]。目前主要有两种探头结构, 即侧视探头和前视探头。侧视探头是目前最常见的配置, 用于大多数内镜 OCT 的研究, 特别是需要覆盖管腔内大面积图像时。根据应用的工作距离和横向分辨率不同需求, 探头被设计成了不同的样式, 如小直径的柔性鞘^[5]、大直径的充气球囊^[15]或刚性外壳^[16]。侧视探头的扫描机制既可以在近端由电动光纤旋转接头通过驱动轴或扭矩电缆驱动, 也可以由远端微型扫描仪直接驱动, 另外还通过后拉及前推机制实现 3D 成像。而前视探头则提供较小的视野, 扫描器通常位于探头远端, 提供类似放大内镜直观观察的二维扫描, 通常用于需要高放大率或与其他显微镜模式整合的应用^[17]。

2 OCT 在上消化道早癌中的应用

2.1 巴雷特食管(Barrett's esophagus, BE)及异型增生

BE 是一种癌前疾病, 表现为正常复层鳞状上皮被柱状上皮所取代。据估计, BE 患者患食管腺癌的可能性是普通人群的 30~125 倍^[17]。既往内镜筛查需沿可疑黏膜每 1~2 厘米进行随机四象限活检。然而, 随机活检容易出现抽样误差, 并且可能会遗漏小的癌灶或异型增生^[18]。JACKLE 等^[19]在 2000 年首次于白光内镜检查中进行 OCT 的临床研究, 获得了正常的食管和胃黏膜的高分辨率图像, 其中食管中段和下段 OCT 图像可以清晰地显示出弱散射的上皮层、高散射的固有层、弱散射的黏膜肌层、中等散射的黏膜下层和弱散射的固有肌层。同年, 该团队在对 9 例 BE 患者进行 OCT 检查后, 发现其黏膜表面不平整, 由于黏膜上皮层中存在深度不等的低散射隐窝, 因此具有柱状上皮的黏膜上皮层与明亮的固有层形成了鲜明的对比, 而食管其余各层结构尚完整^[20]。LI 等^[21]针对正常食管和 BE 的 OCT 图像对比发现, 正常食管从上皮细胞到固有肌层显示清晰; 相反, 在 BE 中观察到腺体和隐窝样形态存在, 同时各层结构缺失。ZUCCARO 等^[22]对 12 例患者 209 张 BE 图像进行了 OCT 检查, 显示 BE 的特征为: 虽然食管各层结

构保留,但巴雷特黏膜中存在扩张腺体,光散射性差,同时由于其常伴有反流性食管炎,因此 BE 的 OCT 图像具有个体差异。CHEN 等^[23]通过内镜超高分辨率 OCT 发现巴雷特区域的食管鳞状上皮层结构破坏,被隐窝腺体结构所取代,因此比正常食管更具异质性,主要表现为黏膜层可见低背向散射的扩张腺体,固有层可见高背向散射的结缔组织交错区域,而较深的黏膜肌层和黏膜下层与正常食管表现并无差异。综合以上研究 BE 的 OCT 图像主要表现为黏膜表面不平整、腺体扩张及光散射减少等特征。由于其高分辨率和低穿透深度,OCT 图像可以与病变黏膜的病理学结果相媲美。而上述研究也具有一定局限性:即光学探头必须放置在靠近或接触待研究病变的位置,大约需要 3 s 才能获得 OCT 图像并显示在计算机屏幕上,对于快速监测长节段 BE 并不理想。

BE 伴异型增生是食管的癌前病变。在一项前瞻性双盲研究中,ISENBERG 等^[24]对 33 例 BE 患者进行 OCT 检查,发现 BE 异型增生的典型 OCT 图像表现为正常鳞状上皮结构缺失,取而代之的是类似于胃小凹和结肠隐窝结构,从而导致光散射不均匀,黏膜下层存在腺体及黏膜增厚。以活检组织病理学为标准,OCT 诊断异型增生的灵敏度为 68%,特异度为 82%,阳性预测值为 53%,阴性预测值为 89%,诊断准确率为 78%。PONEROS 等^[17]通过分析特异肠化生(specialized intestinal metaplasia, SIM)图像并将它们与食管和胃的 OCT 图像进行对比,发现 SIM 的 OCT 图像特征为:缺乏正常鳞状上皮的 stratified 分层结构,组织对比度不均匀,黏膜表面不规则及黏膜下存在腺体。应用该标准在后续回顾性研究中发现其对 SIM 诊断的灵敏度为 100%,特异度为 93%;在前瞻性研究中灵敏度为 97%,特异度为 92%,因此 OCT 对 SIM 诊断具有高度的灵敏度和特异度。研究还观察到随着异型程度的增加,腺体结构越来越不规则,这表明 OCT 能够检测到早期肿瘤变化。CHEN 等^[23]通过内镜超高分辨率 OCT 发现高度异型增生(high-grade dysplasia, HGD)的 OCT 图像以不规则、扭曲和绒毛状的腺体结构为特征,并且比非异型增生的 Barrett 上皮更不均匀,上皮-间质界面更不规则,且 HGD 区域整体背向散射强度更低。COBB 等^[25]选取 14 例经病理活检证实为食管 HGD 或腺癌的患者,对切除的标本即刻进行内镜超高分辨率 OCT 成像,发现 HGD 的 OCT 信号均匀并迅速衰减,其穿透深度比正常食管组织浅;在腺癌中,OCT 信号也是均匀的,但比 HGD 衰减更快。OCT 信号衰减程度似乎提示细胞核与细胞质比例,可以通过量化来区分 HGD 和腺癌。但该研究同样有局限性,由于其检测的是离体标本缺乏血流,因此很难区分新生鳞状上皮下的

Barrett 腺体和离体组织中的血管。LEE 等^[26]对 52 例接受 BE 监测或内镜根除治疗的食管异型增生患者进行 OCT 检查并获得相应的病理学诊断,证实 OCT 能够区分低度异型增生(low-grade dysplasia, LGD)和 HGD,并能够高精度地显示 LGD/HGD 相关的微血管特征,即异常的血管分支及大小不均的血管。以上研究通过对食管异型增生的观察,发现食管黏膜结构完整性缺失,存在低背向散射的扩张腺体,同时随着异型程度的增加,腺体结构越来越不规则,病变区域的背向散射强度更低。

EVANS 等^[27]建立了一个异型增生评分系统,分别评估食管上皮表面成熟度和腺体结构,使用该系统评分相加 ≥ 2 时对黏膜内癌和重度异型增生诊断的灵敏度和特异度分别为 83.3%和 75.0%。由于该研究尚未解决食管成像中 OCT 诊断观察者间的一致性问题,且未确定结果能否在一般人群中推广,该结论仍需要在更广泛的范围内被进一步研究,基于此也为未来开发计算机软件算法得到诊断提供了方向。容积激光内镜(volumetric laser endomicroscopy, VLE)采用二代高速 OCT 技术,能够以 10 μm 的显微结构分辨率快速扫描长度为 6 cm、深度达 3 mm 的食管。LEGGETT 等^[28]提出了一种新的 VLE 诊断算法,通过黏膜层结构完整性、非典型腺体数量和黏膜层/黏膜下层强度比来对 OCT 图像进行评级,其灵敏度为 86%,特异度为 88%,诊断准确率为 87%,在体外检测 BE 异型增生方面显示出比 EVANS 等^[27]建立的评分系统更好的诊断性能。SWAGER 等^[29]开发和验证了 BE 相关性肿瘤的 VLE 预测评分,得出 3 个独立预测因子:水平分层结构破坏、黏膜层信号增高、不规则扩张的腺体或导管出现,该预测评分的 ROC 曲线下面积为 0.81,灵敏度和特异度分别为 83%和 71%。EVANS、LEGGETT、SWAGER 等^[27-29]均建立了异型增生的评分系统,但关于评分系统的主观标准或 BE 相关性肿瘤评分系统的普遍共识尚未达成,因此,需要结合体内扫描和多个评估者进行进一步研究,以确定和验证用于临床实践的最佳 VLE 评分系统。另一方面,由于 VLE 扫描包含海量数据,如何实现实时解释可能是日常临床实践中的一个挑战。因此需要更客观的技术以协助 VLE 解释,如果自动化算法的性能可以非劣于 VLE,则计算机辅助检测将减少 VLE 扫描所需的时间,并可以在临床评估中提高诊断性能。

2.2 食管腺癌

食管癌可分为两种不同的病理学类型,即腺癌和鳞癌。腺癌与 BE、胃食管反流病史、肥胖和吸烟有关^[30]。JACKLE 等^[20]对 6 例食管远端腺癌患者进行了 OCT 检查,显示其缺乏规则的食管各层结构,黏膜

表面不平整,恶性细胞区域明亮,而非细胞区域的反射较少。ZUCCARO 等^[22]研究的 69 例患者中,采集了 19 例患者的 96 张食管远端及胃食管结合部腺癌 OCT 图像,显示食管壁水平分层结构完全消失,由于恶性细胞的高背向散射,导致光学成像的深度很小。同时也对食管腺癌的切除标本进行了 OCT 检查,发现断层照片中可见强光散射和弱散射隐窝交替出现的区域,食道规则的层状结构消失,且肿瘤的溃疡区域产生明亮的图像。CHEN 等^[23]的研究发现腺癌内镜超高分辨率 OCT 有明显的形态紊乱,表现为腺体结构不规则且拥挤,而总的背向散射强度降低,同时 OCT 图像显示从 BE 到 HGD 并最终到腺癌的结构不规则性逐渐增加。另一项研究^[25]表明,在食管腺癌中 OCT 信号均匀且衰减速度比 HGD 快,穿透深度浅于正常食管。根据以上研究,食管腺癌 OCT 的图像特征为食管壁的形态紊乱、规则水平层状结构完全消失,总的背向散射强度降低。但是,对于 HGD 及腺癌 OCT 信号的均匀性,不同的研究结论尚有分歧,可能需要在今后的研究中进一步总结和验证。同时,以上研究样本量均较小,需进一步扩大样本量进行深入研究。

2.3 食管鳞癌

局限于黏膜上皮或黏膜固有层的浅表性食管鳞状细胞癌(superficial esophageal squamous cell carcinoma, SESCC)是内镜切除的标准适应证。HATTA 等^[31]选取 62 例白光内镜病理诊断为 SESCC 的患者,其 OCT 图像在黏膜上皮表现为小的低反射成分,虽然较难与正常组织区分,但可以显示浸润至黏膜固有层更深的 SESCC,表现为黏膜肌层高反射微结构及黏膜下层的轻微侵袭。与病理学结果进行比较,发现总体准确率为 92.7%,上皮层/固有层、黏膜肌层和黏膜下层癌术前分期的准确率分别为 94.9%、85.0% 和 90.9%。然而,他们也发现 OCT 具有一定局限性:首先是穿透深度较浅,最大信号穿透深度为 1.5 mm;其次是无法识别亚细胞结构的差异,如核异常的存在,因此难以区分癌细胞侵袭和炎性细胞浸润;再次是由于在鳞状上皮层中正常组织、炎性组织和癌组织之间的差异较小,因此区分上皮层癌和正常食管组织仍有一定困难。2012 年 HATTA 等^[32]前瞻性研究 123 例患者的 131 个 SESCC 病变,发现 OCT 对上皮层/固有层的诊断准确率(94.6%)明显高于超声内镜(80.6%)。当然,该研究具有患者数量少、单中心、非随机等局限性。ZUCCARO 等^[22]同样对食管鳞癌 OCT 图像进行了研究,发现鳞癌的 OCT 图像类似于腺癌,失去了正常食管的规则层状结构,OCT 图像呈异质性,肿瘤上皮的高散射区域和弱光散射的非细胞区域交替出现,且成像深度小。TRINDADE 等^[33]通过长 16 cm 的食管病变提出 OCT 可帮助对浅表多灶

性食管鳞癌进行诊断分期,并可预测内镜治疗的候选对象。

2.4 胃癌

虽然 OCT 已经在胃肠道上进行了大量的实验,但相比于具有高分辨率横截面图像且易于扫描的食管而言,胃癌的 OCT 研究报道较少,可能由于胃的穿透深度和图像质量不如食管,造成这些差异的原因可能与每个器官固有的光学特性有关。早在 2000 年 JACKLE 等^[19]进行 OCT 临床研究中便获得了正常胃黏膜的高分辨率图像,发现其 OCT 图像对比度相较于食管要小得多,并且无法区分黏膜层与黏膜肌层,而黏膜下层与黏膜肌层和固有肌层的对比度较弱。SIVAK 等^[34]收集了 38 例患者 72 个部位的 OCT 图像,验证了 OCT 在胃肠道内的可行性,并提供了黏膜和黏膜下层的高分辨率图像。GUPTA 等^[35]利用 VLE 观察正常胃贲门及其异型增生的图像特点,正常胃贲门表现为宽大皱襞、胃小凹及透光性差,而异型增生在 VLE 下表现为胃小凹结构消失、不均匀散射、不规则的表面及非典型的腺体结构。LUO 等^[36]获取 6 例患者正常胃组织及 8 例患者胃癌组织体外标本,通过 OCT 图像提取 5 个定量的形态特征,对比正常胃组织的均匀结构,发现胃癌组织破坏了典型的黏膜纹理,导致纹理紊乱。提示 OCT 可以区分正常组织、纤维化组织和残留癌,其灵敏度和特异性分别为 79% 和 67%。该项研究是在体外进行,OCT 应用于胃癌组织图像的研究有限、病例有限,需要进一步对 OCT 在体内诊断胃癌进行研究。

3 OCT 与 AI

AI 是一种自动学习和识别数据模式的数学预测技术,在日常生活和科学研究中变得越来越重要。大多数先进的 AI 方法均依赖于机器学习,特别是深度学习和神经网络^[37]。深度学习利用神经网络的 AI 算法和先进的机器学习方法^[38],已经成功地应用于广泛的医学成像领域。

近期有研究^[39-41]着眼于将深度学习应用于食道 OCT 图像分析,并取得了较好的结果,但需要大量的数据。GAN 等^[42]提出了一种对抗性学习变分自编码器来生成高质量的食道 OCT 样本,以简单而有效的方式结合了对抗网络和变分自编码器,保留了变分自编码器的优点,并且不需要额外的鉴别器,进一步简化了模型架构,获得更好的生成性能。ZENG 等^[43]基于深度学习的模式识别 OCT 系统捕捉人体结肠 OCT 图像,成功检测到了正常和肿瘤组织的模式,将模式识别 OCT 系统预测的实验诊断与已知的组织学结果进行比较,灵敏度为 100%,特异度为 99.7%,ROC 曲线下面积为 0.998。LUO 等^[36]开发了基于形态特征的分析分类方法,将其与机器学习相

结合来识别癌症组织,这种识别方法包括胃组织的定量结构特征和监督分类方法,选择 5 个定量特征作为胃癌组织 OCT 图像的描述符。结果表明,基于形态特征分析的方法具有良好的分类效果和性能。当然他们研究时胃癌 OCT 还处于相对早期的阶段,存在有限的数量导致过度拟合和分类结果不佳等问题。继基于形态特征分析的机器学习方法之后,LUO 等^[44]又提出了一种优化的残差网络对 OCT 采集的胃组织图像进行分类,该网络能够对正常胃组织和胃癌组织的 OCT 图像进行分类,准确率达到 99.90%,将深度学习成功地应用于 OCT 图像的胃癌组织智能分类识别。以上研究局限性均在于获取标本为体外成像,无法真正与体内复杂环境相媲美,并且需要更多的训练样本量。卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)的最新进展使眼科和心脏病学恶性肿瘤检测的临床应用成为可能^[45-46]。此外,CNN 还作为自动诊断的图像分类工具应用于食管、胃和结肠组织^[47-53]。其中,QI 等^[49]为检测 BE 中的异型增生,将 13 例患者的 106 张内镜 OCT 图像纳入研究,开发了计算机辅助诊断算法,该算法基于标准的纹理分析方法,以组织学为参考标准,其灵敏度为 82%,特异度为 74%,准确率为 83%。该算法消除了观察者间的差异,使监测大面积 BE 异型增生成为可能,但该研究样本量较小,下一步可开展更大规模的研究,并通过改进 OCT 图像分辨率及灵敏度进一步提高适用性及可靠性。为区分正常与癌变结肠组织图像,LUO 等^[54]建立了 OCT 导管和基于残差神经网络的深度学习模型,并对其进行训练,执行 OCT 图像的自动处理和实时诊断,其 ROC 曲线下面积为 0.975。随着研究的不断深入,OCT 结合 AI 技术对识别上消化道病变具有更多的可能性,有望下一步在体内 OCT 的临床实践中实时应用。

4 展 望

作为一种应用于新领域成熟的成像方法,OCT 有其独特的优势:(1)OCT 可以提供非侵入性、高质量的细节图像。OCT 可以提供微米级分辨率的组织图像及高分辨率的 3D 成像,可用于上消化道肿瘤的早诊、早治工作。(2)OCT 可以集成到小探头和导管中,通过内镜活检孔道进入食管和胃内进行肿瘤成像和诊断。(3)OCT 将在未来与其他学科和技术融合,如 AI、医学图像分析、智能机械制造、安全环保的新材料工艺等。当然,OCT 也具有一定的局限性:(1)OCT 对异型增生的分辨力不够,对肿瘤和炎症细胞鉴别缺乏依据;(2)由于胃内分辨率低和穿透深度不足,与食管 OCT 图像质量存在差距;(3)体外标本的 OCT 成像无法真正与体内复杂环境相媲美。另外,目前还有许多新兴的显微成像系统,如共聚焦激光显

微内镜、高分辨率显微内镜、细胞内镜等,也越来越多地受到了国内外研究者的关注,开展了相关的临床研究。而 OCT 与其相比是否具有优势,需要在接下来的研究中进一步证实。

综上所述,OCT 不仅可以用于上消化道肿瘤的早期诊断,为更客观、更精确的成像测量提供依据,还可以用于疾病的常规检测,为更安全、更快捷的技术解决方案提供依据。虽然具有一定局限性,目前还未在临床诊疗工作中常规开展,但随着研究的深入和技术的发展,内镜 OCT 将进一步推进胃肠病学实践并提高患者的生活质量。

参考文献

- [1] 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 Cancer J Clin, 2021,71(3):209-249.
- [2] 周家琛,郑荣寿,王少明,等. 2020 年中国和世界部分国家主要消化道肿瘤负担比较[J/CD]. 肿瘤综合治疗电子杂志,2021,7(2):26-32.
- [3] TSAI T H, LEGGETT C L, TRINDADE A J, et al. Optical coherence tomography in gastroenterology: a review and future outlook[J]. J Biomed Opt, 2017,22(12):1-17.
- [4] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, et al. Optical coherence tomography [J]. Science, 1991,254(5035):1178-1181.
- [5] TEARNEY G J, BREZINSKI M E, BOUMA B E, et al. In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography [J]. Science, 1997,276(5321):2037-2039.
- [6] SERGEEV A, GELIKONOV V, GELIKONOV G, et al. In vivo endoscopic OCT imaging of precancer and cancer states of human mucosa [J]. Opt Express, 1997,1(13):432-440.
- [7] YANG L, CHEN Y, LING S, et al. Research progress on the application of optical coherence tomography in the field of oncology[J]. Front Oncol, 2022,12:953934.
- [8] TSANG S H, SHARMA T. Optical coherence tomography [J]. Adv Exp Med Biol, 2018, 1085:11-13.
- [9] MASSATSCH P, CHARRIERE F, CUCHE E, et al. Time-domain optical coherence tomography with digital holographic microscopy[J].

- Appl Opt, 2005, 44(10):1806-1812.
- [10] MCCABE J M, CROCE K J. Optical coherence tomography [J]. *Circulation*, 2012, 126 (17): 2140-2143.
- [11] NASSIF N, CENSE B, PARK B H, et al. In vivo human retinal imaging by ultrahigh-speed spectral domain optical coherence tomography [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(5):480-482.
- [12] TITIYAL J S, KAUR M, NAIR S, et al. Intraoperative optical coherence tomography in anterior segment surgery [J]. *Surv Ophthalmol*, 2021, 66(2):308-326.
- [13] CHOMA M, SARUNIC M, YANG C, et al. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography [J]. *Opt Express*, 2003, 11(18):2183-2189.
- [14] YAQOUB Z, WU J, YANG C. Spectral domain optical coherence tomography: a better OCT imaging strategy [J]. *Biotechniques*, 2005, 39 (Suppl. 6):6-13.
- [15] SUTER M J, VAKOC B J, YACHIMSKI P S, et al. Comprehensive microscopy of the esophagus in human patients with optical frequency domain imaging [J]. *Gastrointest Endosc*, 2008, 68(4):745-753.
- [16] GORA M J, SAUK J S, CARRUTH R W, et al. Tethered capsule endomicroscopy enables less invasive imaging of gastrointestinal tract microstructure [J]. *Nature Med*, 2013, 19(2):238-240.
- [17] PONEROS J M, BRAND S, BOUMA B E, et al. Diagnosis of specialized intestinal metaplasia by optical coherence tomography [J]. *Gastroenterology*, 2001, 120(1):7-12.
- [18] FALK G W, RICE T W, GOLDBLUM J R, et al. Jumbo biopsy forceps protocol still misses unsuspected cancer in Barrett's esophagus with high-grade dysplasia [J]. *Gastrointest Endosc*, 1999, 49(2):170-176.
- [19] JACKLE S, GLADKOVA N, FELDCHEIN F, et al. In vivo endoscopic optical coherence tomography of the human gastrointestinal tract-toward optical biopsy [J]. *Endoscopy*, 2000, 32(10):743-749.
- [20] JACKLE S, GLADKOVA N, FELDCHEIN F, et al. In vivo endoscopic optical coherence tomography of esophagitis, Barrett's esophagus, and adenocarcinoma of the esophagus [J]. *Endoscopy*, 2000, 32(10):750-755.
- [21] LI X D, BOPPART S A, VAN DAM J, et al. Optical coherence tomography: advanced technology for the endoscopic imaging of Barrett's esophagus [J]. *Endoscopy*, 2000, 32(12):921-930.
- [22] ZUCCARO G, GLADKOVA N, VARGO J, et al. Optical coherence tomography of the esophagus and proximal stomach in health and disease [J]. *Am J Gastroenterol*, 2001, 96 (9): 2633-2639.
- [23] CHEN Y, AGUIRRE A D, HSIUNG P L, et al. Ultrahigh resolution optical coherence tomography of Barrett's esophagus: preliminary descriptive clinical study correlating images with histology [J]. *Endoscopy*, 2007, 39(7):599-605.
- [24] ISENBERG G, SIVAK M V, CHAK A, et al. Accuracy of endoscopic optical coherence tomography in the detection of dysplasia in Barrett's esophagus: a prospective, double-blinded study [J]. *Gastrointest Endosc*, 2005, 62(6):825-831.
- [25] COBB M J, HWANG J H, UPTON M P, et al. Imaging of subsquamous Barrett's epithelium with ultrahigh-resolution optical coherence tomography: a histologic correlation study [J]. *Gastrointest Endosc*, 2010, 71(2):223-230.
- [26] LEE H C, AHSEN O O, LIANG K, et al. Endoscopic optical coherence tomography angiography microvascular features associated with dysplasia in Barrett's esophagus (with video) [J]. *Gastrointest Endosc*, 2017, 86(3):476-484.
- [27] EVANS J A, PONEROS J M, BOUMA B E, et al. Optical coherence tomography to identify intramucosal carcinoma and high-grade dysplasia in Barrett's esophagus [J]. *Clin Gastroenterol Hepatol*, 2006, 4(1):38-43.
- [28] LEGGETT C L, GOROSPE E C, CHAN D K, et al. Comparative diagnostic performance of volumetric laser endomicroscopy and confocal laser endomicroscopy in the detection of dysplasia associated with Barrett's esophagus [J]. *Gastrointest Endosc*, 2016, 83(5):880-888.
- [29] SWAGER A F, TEARNEY G J, LEGGETT C L, et al. Identification of volumetric laser endomicroscopy features predictive for early neoplasia in Barrett's esophagus using high-quality histological correlation [J]. *Gastrointest Endosc*, 2017,

85(5):918-926.

- [30] MORGAN E, SOERJOMATARAM I, RUM-GAY H, et al. The global landscape of esophageal squamous cell carcinoma and esophageal adenocarcinoma incidence and mortality in 2020 and projections to 2040: new estimates from GLOBOCAN 2020[J]. *Gastroenterology*, 2022, 163(3):649-658.
- [31] HATTA W, UNO K, KOIKE T, et al. Optical coherence tomography for the staging of tumor infiltration in superficial esophageal squamous cell carcinoma[J]. *Gastrointest Endosc*, 2010, 71(6):899-906.
- [32] HATTA W, UNO K, KOIKE T, et al. A prospective comparative study of optical coherence tomography and EUS for tumor staging of superficial esophageal squamous cell carcinoma[J]. *Gastrointest Endosc*, 2012, 76(3):548-555.
- [33] TRINDADE A J, RISHI A, STEIN P H, et al. Use of volumetric laser endomicroscopy in staging multifocal superficial squamous carcinoma of the esophagus[J]. *Gastrointest Endosc*, 2016, 84(2):369.
- [34] SIVAK M V, KOBAYASHI K, IZATT J A, et al. High-resolution endoscopic imaging of the GI tract using optical coherence tomography[J]. *Gastrointest Endosc*, 2000, 51(4):474-479.
- [35] GUPTA N, SIDDIQUI U, WAXMAN I, et al. Use of volumetric laser endomicroscopy for dysplasia detection at the gastroesophageal junction and gastric cardia[J]. *World J Gastrointest Endosc*, 2017, 9(7):319-326.
- [36] LUO S, FAN Y, CHANG W, et al. Classification of human stomach cancer using morphological feature analysis from optical coherence tomography images[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16(9):095602.
- [37] CHADEBECQ F, LOVAT L B, STOYANOV D. Artificial intelligence and automation in endoscopy and surgery[J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2023, 20(3):171-182.
- [38] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553):436-444.
- [39] GAN M, WANG C. Dual-stage U-shape convolutional network for esophageal tissue segmentation in OCT images[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:215020-215032.
- [40] WANG C, GAN M. Tissue self-attention network for the segmentation of optical coherence tomography images on the esophagus[J]. *Biomed Opt Express*, 2021, 12(5):2631-2646.
- [41] YANG Z, SOLTANIAN-ZADEH S, CHU K K, et al. Connectivity-based deep learning approach for segmentation of the epithelium in in vivo human esophageal OCT images[J]. *Biomed Opt Express*, 2021, 12(10):6326-6340.
- [42] GAN M, WANG C. Esophageal optical coherence tomography image synthesis using an adversarially learned variational autoencoder[J]. *Biomed Opt Express*, 2022, 13(3):1188-1201.
- [43] ZENG Y, XU S, CHAPMAN W C, et al. Real-time colorectal cancer diagnosis using PR-OCT with deep learning[J]. *Theranostics*, 2020, 10(6):2587-2596.
- [44] LUO S, RAN Y, LIU L, et al. Classification of gastric cancerous tissues by a residual network based on optical coherence tomography images[J]. *Lasers Med Sci*, 2022, 37(6):2727-2735.
- [45] LEE C S, BAUGHMAN D M, LEE A Y. Deep learning is effective for the classification of OCT images of normal versus age-related macular degeneration[J]. *Ophthalmol Retina*, 2017, 1(4):322-327.
- [46] ABDOLMANAFI A, DUONG L, DAHDAH N, et al. Characterization of coronary artery pathological formations from OCT imaging using deep learning[J]. *Biomed Opt Express*, 2018, 9(10):4936-4960.
- [47] URBAN G, TRIPATHI P, ALKAYALI T, et al. Deep learning localizes and identifies polyps in real time with 96% accuracy in screening colonoscopy[J]. *Gastroenterology*, 2018, 155(4):1069-1078.
- [48] ZHANG R, ZHENG Y, MAK T W, et al. Automatic detection and classification of colorectal polyps by transferring low-level CNN features from nonmedical domain[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2017, 21(1):41-47.
- [49] QI X, SIVAK M V, ISENBERG G, et al. Computer-aided diagnosis of dysplasia in Barrett's esophagus using endoscopic optical coherence tomography[J]. *J Biomed Opt*, 2006, 11(4):044010.