

编者按

在全球范围内,消化道疾病构成重大公共卫生挑战。2019 年全球消化系统疾病的新发病例达到 73.2 亿人次。中国消化系统疾病新发病例为 8.36 亿人次,在全球病例中占比高。消化内镜技术作为消化道疾病诊疗的核心手段,近年来在微创化、精准化和智能化领域取得突破性进展。值此“十四五”临床专科能力建设规划收官之年,我国消化内镜领域呈现技术迭代加速、多学科融合深化的鲜明特征。本期专题立足学科前沿,聚焦消化内镜领域的热点与难点,由四川大学华西医院消化内科杨锦林教授主持,特邀国内知名专家撰稿,旨在为临床实践和科研创新提供参考。

高光谱成像在消化道疾病中的应用

刘与之¹,刘新冰²,邓 凯¹,杨锦林¹

1. 四川大学华西医院消化内科,四川 成都 610041;2. 四川省肿瘤医院(研究所)·四川省癌症防治中心·

电子科技大学附属肿瘤医院内镜科,四川 成都 610041

【摘要】 高光谱成像(HSI)通过捕获组织在多个窄波段的光谱信息,为消化道疾病诊疗提供丰富的生化与空间特征。本文综述了 HSI 技术原理、系统构成及数据处理方法,重点分析了其在消化道的应用:在食管、胃、结直肠病变中,HSI 可无创检测早癌及癌前病变,提升诊断精度;在小肠缺血及手术中,能定量评估组织氧合与灌注。尽管面临设备集成、实时成像及算法解释性等挑战,但随着硬件小型化和多模态融合,HSI 有望成为内镜下“光学活检”及精准诊疗的关键工具。

【关键词】 高光谱成像;消化道疾病;人工智能;无创诊断

【中图分类号】 R443;R57

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2025)05-0001-06

Application of hyperspectral imaging in digestive tract diseases LIU Yu-zhi¹, LIU Xin-bing², DENG Kai¹, YANG Jin-lin¹ 1. Department of Gastroenterology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Department of Endoscopy, Sichuan Cancer Hospital and Institute, Sichuan Cancer Prevention and Control Center, Affiliated Cancer Hospital of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China

【Abstract】 Hyperspectral imaging (HSI) captures the spectral information of tissues in multiple narrow bands to provide the rich biochemical and spatial characteristics for the diagnosis and treatment of gastrointestinal diseases. This review summarizes the technical principles, system components, and data processing methods of HIS. The focus of the article is on its applications in the digestive tract. In esophageal, gastric, and colorectal lesions, HSI can non-invasively detect early cancer and precancerous lesions to improve the diagnostic accuracy. In small intestinal ischemia and intraoperative settings, it can quantitatively assess the tissue oxygenation and perfusion. There are the challenges of device integration, real-time imaging, and algorithm interpretability. However, HSI is expected to become a key tool for endoscopic "optical biopsy" and precision diagnosis and treatment with the miniaturization of hardware and multimodal integration.

【Key words】 Hyperspectral imaging; Gastrointestinal diseases; Artificial intelligence; Non-invasive diagnosis

消化道疾病是全球范围内发病率和死亡率均较高的一类疾病,涵盖从食管、胃、小肠、结肠到直肠的多种良恶性病变。其中,消化道癌症(如食管癌、胃癌、结直肠癌)在我国尤为常见,是严重威胁人民健康的主要肿瘤类型之一^[1]。据 GLOBOCAN 2020 年全球癌症统计数据显示,胃癌和结直肠癌分

别位列全球发病率前五位,死亡率亦居高不下^[2]。然而,由于早期病变症状隐匿,确诊时常已处于进展期,导致患者的五年生存率较低。因此,及时、精准地发现消化道早期病变是提高治愈率的关键所在。

目前,临床上诊断消化道疾病的主要手段包括白光内镜(white light endoscopy, WLE)、色素内镜、窄带成像(narrow band imaging, NBI)、放大内镜以及超声内镜等。这些方法已广泛用于消化道黏膜病变的筛查和活检引导,尤其在早期食管、胃和结直肠病变识别中取得了一定成果。然而,这些成像手段仍存在诸多局限:首先,白光内镜对微小或浅表病变的组织学改变识别力有限,易导致早期癌漏

【基金项目】四川省科技计划资助项目(编号:2024YFFK0218)

【通讯作者简介】杨锦林,女,主任医师,教授,博士生导师。中国抗癌协会肿瘤内镜委员会副主任委员,四川省抗癌协会肿瘤内镜专委会主任委员,四川省医师协会消化医师分会候任会长,四川省医学会消化内镜专委会常委,四川省肿瘤学会食管癌专委会副主任委员。主要研究方向:消化道早癌精准诊断、多学科治疗、规范随访及危重消化道出血的临床救治。

诊;其次,染色或 NBI 增强成像对医生经验依赖较大,主观性强;再次,活检虽然是确诊金标准,但具有侵入性、时间延迟、取样区域局限等问题,并不能全面反映病变分布情况。随着对“无创、全面、实时”检测技术的临床需求日益增长,现有内镜手段难以完全满足精细化、智能化诊疗的趋势。

高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)是一种将成像技术与光谱分析相结合的新兴光学成像手段。与传统可见光成像只能获得三个波段的信息不同,HSI 在光谱维度上具有高分辨率,可提供每个像素点在数十甚至上百个连续窄波段上的反射或吸收光谱,被称为“光谱指纹”^[3,4]。组织的生化组成和结构差异会体现在光谱指纹上,因此 HSI 能够在无染色、无接触的情况下捕捉组织的细微差异,实现对病变组织的识别与定量分析^[5,6]。这一特性使 HSI 在医学领域引起关注,特别是在消化道肿瘤诊断和术中组织评估等方面显示出巨大潜力。

1 HSI 技术原理与系统构成

HSI 技术原理建立在不同物质对光在各波长上的反射/吸收特性不同这一基础上。生物组织中血红蛋白、水、脂肪等成分都有各自特有的光谱吸收峰和形状。HSI 通过光学成像获取组织的二维空间分布,同时每个像素采集完整的光谱信息,从而形成“高光谱数据立方”(spatial-spectral datacube)。这种数据立方的两个维度是图像的 x、y 位置,第三维度是光谱波长。每个像素都包含一条光谱曲线,即组织在该位置上对不同波长光的反射率/透射率。由于疾病组织(如肿瘤、炎症)往往伴随生化成分改变,其光谱曲线相对于正常组织会出现显著差异^[3]。例如,肿瘤血供增加可能导致可见光和近红外波段的反射率变化;黏膜结构异常也会改变光散射特性^[7]。这些差异为 HSI 提供了辨别病变的依据。

HSI 系统主要由光源、成像光谱仪和探测器组成:①光源:通常采用宽光谱连续光源(卤素灯、氙灯或 LED 阵列),覆盖可见光到近红外波段,以照明组织获取反射光谱;也有利用内窥镜自带光源的情况。②成像光谱仪:这是 HSI 系统的核心部件,它将光学图像按波长进行分解。目前常用的分光机制包括:扫描型,利用机械扫描逐线获取不同波长图像;滤光型,通过可调谐滤光片(液晶可调滤光器 LCTF 或声光可调滤光器等)逐波段成像;快拍型,使用光谱编码阵列传感器可一次获取完整数据立方扫描型和滤光型 HSI 具有光谱分辨率高的优点,但获取完整数据立方需要时间,难以实时成像;快

拍型能够即时获取 3D 数据,但空间或光谱分辨率相对较低^[6]。③探测器:常采用高灵敏度的 CCD 或 CMOS 相机。在近红外波段则需 InGaAs 等红外探测器。为了减少热噪声,摄像头通常配备制冷装置。

近年来,为适应内镜应用,研究者开发了体积更小的 HSI 系统,如将微型光谱相机集成在常规内镜前端。Yoon 等开发的高光谱内镜 HySE 采用同步图像采集与配准机制,在体外动物模型中验证了其实用性,通过同步记录常规白光图像和高光谱数据,并校正内镜运动失真,实现了在移动内镜过程中重建准确的高光谱数据立方^[8,9]。

总体而言,HSI 系统构成和参数需要在光谱分辨率、空间清晰度和成像速度之间平衡,以满足消化道临床应用需求^[10]。

2 HSI 数据处理与人工智能方法

HSI 获取的数据量极其庞大,一个典型的高光谱图像立方可能包含数百万像素、每像素上百维光谱,直接分析计算量巨大。因此,数据处理是 HSI 应用的关键环节,包括光谱预处理、特征提取/降维和模式识别等步骤。首先是光谱预处理:考虑到生物组织光谱易受系统响应和环境光等影响,常对原始光谱进行校正和归一化,如白板/黑板校正以得到真实反射率,并可采用平滑滤波、一阶导数等方法降低噪声和基线漂移。例如,杜剑等将 SG 滤波和平滑一阶导数应用于胃癌显微高光谱数据预处理,提高了信噪比^[11]。其次是特征提取与降维:为降低数据维度、提取对分类有用的信息,可采用多种方法:①光谱特征分析:通过比较病变与正常组织平均光谱,选取差异显著的波段或比值作为特征。例如 Liu 等在近红外 HSI 分析中发现癌组织相对于正常组织在 975、1215 和 1450 nm 附近存在明显吸收差异,据此选择了 6 个最具判别力的波长作为特征输入模型^[7]。②降维算法:主成分分析(PCA)是常用方法,通过线性变换将高维光谱数据映射到少数主成分空间,同时保留主要方差信息。③光谱波段选择:基于遗传算法、熵值等挑选少数关键波段,简化模型实时性。例如有研究利用 27 个波段中的 5 个即可实时识别结直肠肿瘤区域。④空间光谱融合:利用光谱-空间联合特征提高分类,例如三维卷积神经网络可直接从 HSI 立方提取空间光谱联合特征。最后是模式识别与人工智能算法:早期常用无监督聚类(如 k 均值)在高光谱图上初步分割疑似病灶区域,再由经验判读。更普遍的是监督学习分类:①传统机器学习:如支持向量机(SVM)、随机森

林等,需先由专家提取特征(平均光谱、主成分得分等)输入分类器。②深度学习:近年兴起的卷积神经网络(CNN)等深度学习模型可自动学习光谱和空间特征,在医学 HSI 分析中表现优异。深度学习也被用于组织类型分割,例如 Maktabi 等收集 95 例患者的食管腺癌病理 HSI 数据,训练多层感知机分类上皮、腺癌和间质细胞,分类准确率达到 78%~80%^[12]。

相较浅层方法,深度学习能充分挖掘 HSI 的高维信息,大幅提高诊断性能。需要注意的是,深度模型对大样本量要求高,且结果缺乏可解释性,因此有研究结合深度特征和传统方法以兼顾性能与可解释度。总体而言,随着算法进步和计算能力提升,HSI 与人工智能结合正不断推动消化道疾病无创诊断的发展。

3 HSI 在消化道疾病中的应用

3.1 HSI 在食管病变中的应用 食管癌高发且预后不良,但早期食管肿瘤(如 Barrett 食管相关的异型增生和早期食管鳞癌)肉眼下往往难以察觉。传统内镜下需要借助放大内镜、NBI 或色素染色等增强手段发现可疑灶。HSI 有望提供无需造影剂的光谱增强手段,提高早癌检出率。早在 2013 年,英国研究者开展了针对 Barrett 食管的光谱内镜研究,Waterhouse 等开发了内镜光谱成像技术以提取 Barrett 食管血管参数,提高异型增生对比度^[13]。Bohndiek 团队进一步在 2019 年报道了一种临床可用的高光谱内镜(HySE)系统,该系统可在常规内镜检查同步获取白光和高光谱图像,并通过软件校正内镜运动伪影,在离体猪食管和患者样本测试中,HySE 成功量化了组织血氧饱和度差异,实现了食管病变的光谱区分^[9]。2020 年,Grigoriou 等将深度学习应用于高光谱食管内镜,证明 CNN 能够实时处理内镜 HSI 数据,实现像素级组织分类,为术中实时诊断铺平道路。最近的研究更关注 HSI 与现有内镜成像的融合^[8]。Yang 等^[14]比较了白光、NBI、CycleGAN 生成的虚拟 NBI(CNBI)和 HSI 模拟的 NBI(HNBI)在早期食管癌中的效果。他们收集了 500 例白光和 500 例 NBI 图像,通过 GAN 将白光转换为“虚拟 NBI”,并利用 HSI 数据生成“HSI-NBI”图像,采用色差 CIEDE2000、熵值和结构相似度(SSIM)评价早癌对比度。结果显示,与传统白光和真实 NBI 相比,HSI 生成的假彩 NBI 图像具有更大的色差、更高熵值和更佳结构相似度,提示 HSI 可在无需特殊内镜的情况下提供类似 NBI 的黏膜对比增强。

此外,日本学者也探索了 HSI 检测食管下段

Barrett 黏膜病变的潜力。例如,有工作将近红外 HSI 用于区分 Barrett 食管的肠化和异型增生区域,并尝试定量分析血红蛋白吸收峰的差异来判别病变组织^[12]。总的来说,HSI 在食管早期肿瘤中的应用尚处于初步阶段,样本量相对有限。但已有结果证明 HSI 可获取丰富的血液和组织信息,提高病变-背景对比。结合 AI 辅助判读,未来 HSI 有望用于 Barrett 食管的广泛监测,帮助内镜医师发现隐匿的早癌病灶,实现“早发现、早切除”。

3.2 HSI 在胃病变中的应用 胃癌是我国常见恶性肿瘤,内镜筛查对早期发现至关重要。然而,早期胃黏膜细微病变在白光下不易识别,提高内镜诊断敏感度一直是挑战。HSI 在胃肿瘤检测中较早开展了探索。Kiyotoki 等于 2013 年报道了一项先驱研究,将 HSI 应用于胃癌内镜切除标本的检测。他们收集了 14 例患者共 16 个胃肿瘤及对应正常黏膜样本,利用可见光 HSI 摄像系统记录 400~800 nm 的光谱反射率,并以 8 例样本训练算法、8 例测试算法。通过对比肿瘤与正常黏膜的光谱曲线,研究者发现肿瘤在约 726 nm 附近的反射率显著降低,据此选定 726 nm 及其反射率 1/4 处作为判别阈值。基于该单波长阈值法,在测试集上达到 79% 敏感度和 92.5% 特异度,平均诊断准确率 85.6%。影像后处理显示,在 726 nm 波段进行 pseudo-color 增强,可清晰突出肿瘤区域^[15]。这项开创性研究证明了 HSI 区别胃癌组织的可行性,但当时仅限于离体样本、算法也相对简单。随后 2015 年,Goto 等进一步扩大了样本量。他们对 96 例患者的 104 个胃早癌标本进行了 400~800 nm HSI 采集,采用马氏距离等方法分析确定了最佳判别波长 770 nm 及其归一化反射率的 1/4 为阈值。该优化算法在独立测试中取得了敏感度 71%、特异度 98%、准确率 85% 的性能^[16]。值得注意的是,尽管 770 nm 阈值法特异度极高,但敏感度有所下降,提示单一波段法在复杂临床中可能漏诊部分肿瘤。近红外 HSI 的应用也有报道。Akbari 等利用 1000~2500 nm 的中红外 HSI 分析胃癌,对比发现肿瘤组织在 1200~1300 nm 和 1300~1400 nm 波段存在特征性吸收差异,提出可根据 1226~1251 nm 和 1288~1370 nm 波段光谱判别肿瘤。他们甚至指出,利用这些红外指纹可检测直径 0.5 mm、深度仅 2~3 mm 的极早期癌灶^[17]。不过,该研究同样基于离体样本。

近年来,研究重心转向结合可见和近红外信息以及智能算法。Liu 等开展了近红外 HSI 鉴别胃癌的工作。他们在 900~1700 nm 范围获取新鲜手术

标本的高光谱数据,通过比较发现肿瘤在 975 nm(水吸收峰)、1215 nm、1450 nm(OH 基团吸收)附近有明显吸收峰变化。以 PCA 降维并选取 6 个最有判别力波长,结合光谱角映射分类,得到约 90% 的分类准确率^[7]。这些近红外特征波段与组织中水和脂质的吸收特征有关,表明 HSI 可通过生化成分差异识别癌变。除了癌灶的检测,HSI 也用于胃黏膜癌前病变的研究,如鉴别幽门螺杆菌相关胃炎、不典型增生等,但相关报道较少且多停留在原理验证阶段。

在更广义的胃部肿瘤,Sato 等尝试利用 HSI 区分黏膜下肿瘤胃间质瘤(GIST)^[18]。他们对 12 例手术切除的 GIST 标本进行近红外 HSI 成像,用 SVM 分类正常黏膜和肿瘤区域,即使有 0.4~2.5 mm 正常黏膜覆盖,算法仍可正确标示深部 GIST 位置。在像素级评价中,GIST 识别的敏感度达 91.3%、特异度 73.0%、总体准确率 86.1%。这一结果提示 HSI 结合机器学习有望辅助判断黏膜下肿瘤的边界范围。总的来说,HSI 在胃部病变检测上已经证明了可行性,离体研究取得较高诊断准确率。但目前多数为体外或手术后标本研究,下一步需要开展内镜下在体应用试验,验证 HSI 对早期微小癌的发现能力,以及算法在复杂胃黏膜环境下的稳健性。未来,随着高光谱内镜硬件的发展和智能算法的成熟,HSI 有望与放大内镜、NBI 等形成互补,提高胃癌的内镜早诊率。

3.3 HSI 在结直肠病变中的应用 结直肠肿瘤经内镜切除可以显著降低癌变和死亡风险,因此高精度的内镜“光学活检”技术备受关注。“切除后丢弃”(resect and discard)策略要求内镜医生基于实时影像准确辨别小息肉的性质,从而决定是否免送病理。这方面 HSI 展示了巨大潜力。一项最新的前瞻研究由中国山东大学齐鲁医院团队完成,Peng 等对 161 枚结直肠息肉新鲜切除标本进行了高光谱拍摄,获得 144900 张 2D 图像并构建了包含非肿瘤息肉、低级别腺瘤、高级别腺瘤/癌三类的光谱数据集。研究者使用迁移学习预训练 ResNet 残差网络进行分类模型训练,并将模型诊断结果与 3 位内镜医师(新手和有经验者)的判断进行对比。结果显示,HSI-AI 模型对非肿瘤息肉、非进展性腺瘤和进展期肿瘤的判别敏感度分别达到 96.0%、94.0%、99.0%,特异度分别为 99.0%、99.0%、96.5%。模型辅助下,新手内镜医师对肿瘤性息肉的阴性预测值从 50.0% 提高到 88.2%^[19]。这一成果表明 HSI 结合深度学习已可在离体标本上实现接近病理的

诊断准确性,有望极大减轻病理工作量。

另一项由英国剑桥大学开展的研究则是全球首次人体内镜 HSI 试验,Yoon 等将开发的 Hyper-spectral Endoscopy 系统应用于临床结肠镜检查。他们在患者检查过程中使用 HSI 内镜获取了数例结直肠息肉的高光谱图像,并在内镜下不同阶段记录了正常黏膜、息肉切除前和切除后残端的 HSI 数据^[20]。初步结果证明 HSI 内镜可在活体中获得稳定的高光谱数据,并可通过分析光谱变化辅助评估病变切除是否彻底等。有趣的是,该团队还构建了结直肠息肉的高光谱公开数据集供研究者评估算法。除了直接判别肿瘤性质,HSI 还用于辅助结肠镜质量控制。结肠息肉的光谱特征可用于开发内镜光谱增强模式,提高平坦病变的显影。Wang 等提出的“光谱增强视觉算法(SAVE)”通过将胶囊内镜拍摄的白光图像转换为 HSI 增强图像,实现了胶囊内镜中类似 NBI 的效果^[21]。在对比奥林巴斯临床 NBI 图像时,SAVE 增强图像与真实 NBI 的结构相似度(SSIM)达 90% 以上,显示了将 HSI 用于一次性胶囊内镜光谱增强的可行性。

此外,HSI 在结直肠癌组织学分析中也有应用。例如 Beaulieu 等利用 HSI 结合机器学习自动诊断结肠癌组织切片,取得良好效果^[22]。Collins 等通过 HSI 自动识别全结肠切除标本中的癌组织、正常黏膜和肌层,在一些情况下可辅助评估肿瘤浸润范围和切缘^[23]。总体上,HSI 在结直肠肿瘤的研究正快速发展,从离体实验走向在体应用。随着实时 HSI 内镜和 AI 的结合,未来可能实现结肠镜检查过程中对可疑息肉的实时自动诊断,提高内镜切除决策的准确性,实现“即摘即弃”的安全应用。

3.4 高光谱成像在小肠缺血检测与术中灌注评估中的应用 与上消化道相比,小肠的 HSI 应用研究主要集中在术中组织活力评估和缺血检测方面。小肠急性缺血(肠系膜缺血)是一种高病死率的危急症,及时准确判断肠管的存活程度对决定手术切除范围至关重要。传统上,外科医生多凭肉眼观察肠管颜色、蠕动和血流搏动等主观判断,可能出现误判^[24]。HSI 通过定量测量组织含氧情况,可为此提供客观依据。德国莱比锡大学的 Mehdorn 等首次将 HSI 用于术中急性肠缺血评估^[24]。他们在 11 例疑似肠系膜缺血患者的剖腹手术中,对肠管不同区域进行 HSI 拍摄,计算组织血氧饱和度(StO)、近红外血流灌注指数(NIR-PI)、组织水分指数等参数。结果发现,缺血重度怀疑区的平均组织血氧仅为 0.45,相比良好灌注区的 0.70 显著降低($P =$

0.002), 近红外灌注指数 0.23 也远低于正常值 0.58 ($P < 0.001$)。另外, 缺血组织在 630 nm 波长处反射峰增强, 被解释为高铁血红蛋白累积所致, 与组织氧合降低一致。术后病理证实, HSI 低灌注区对应的肠段均为坏死需切除段。这项研究表明 HSI 定量参数能可靠区分缺血与存活肠管, 为手术切除范围决策提供了有力支持。

除急性缺血外, HSI 也用于评估慢性低灌注以及手术重建中的血供。例如在结肠代食管手术中, 需选择血供最佳的结肠段制作食管替代物。Zimmermann 等报道了 8 例结肠代食管术中使用 HSI 评估结肠管远端和近端灌注的经验, 术后仅 1 例发生轻微吻合口瘘, 其余均愈合良好, 证明 HSI 有助于术中选择最佳吻合肠段。另外, 在低位直肠癌保肛手术中, 术中使用 HSI 评估肠管远端残端血供也有初步研究, 可辅助决定安全的切缘长度。值得一提的是, HSI 还能与荧光造影技术结合, 提高灌注评估的准确性^[25]。Pfahl 等将 ICG 荧光成像与 HSI 定量氧饱和度测量相结合, 发现二者优势互补: HSI 提供了组织静息状态下的定量氧供水平, 而 ICG 荧光反映瞬时灌注流向, 两者联合可更全面地评估肠管微循环。这种多模态成像有望提高术中判断的准确率, 避免漏诊潜在缺血区^[26]。

总的来说, HSI 在小肠和肠系膜血流监测中展现了独特优势, 通过提供客观定量指标弥补了人眼判断的不足。在移植肠管、肠绞窄复位等情况下, HSI 也可用于术后监测组织灌注变化。一篇系统综述汇总了十余项 HSI 术中研究, 认为 HSI 能够可靠反映肠道微循环状态, 在缺血性肠病、手术吻合口评价等领域具有重要临床价值^[27]。未来, 随着更多临床数据积累, HSI 有望成为普外科手术中判断组织存活和优化手术决策的常规辅助工具。

4 挑战与展望

尽管 HSI 在消化道疾病诊疗中展现出巨大前景, 但要实现临床常规应用仍面临诸多挑战: ①设备集成与成像速度: 目前高光谱相机多为科研原型, 体积笨重且昂贵, 将其集成到临床内镜需要解决尺寸和消毒兼容问题。同时, 传统 HSI 获取完整数据立方需数秒至数十秒, 在呼吸蠕动不断的内镜环境下容易产生运动伪影。实时 HSI 内镜的实现需要更快速的快拍型传感器和高效的光谱数据重建算法。Lim 等开发的快照式高光谱视频内镜取得了每秒 17 帧、光谱范围 400 ~ 700 nm 的性能, 是朝实时诊断迈出的重要一步^[10]。今后应进一步提高光谱采集速度和同步校正内镜运动伪影算法, 如

Bohndiek 团队通过白光共参考图像进行失真校正的方法。②光谱数据标准化: 不同设备获取的 HSI 数据在光谱响应上存在差异, 且受现场光照、相机噪声等影响。如何在临床上实现跨设备、跨中心的光谱数据标准化是个困难。需要建立标准的光谱校准流程和共享的光谱数据库, 使得 AI 模型具有广泛适用性。③人工智能算法的可靠性: 深度学习模型虽然在现有数据集上表现出色, 但其“黑箱”性质令临床医师对结果欠缺直观理解。此外, 小数据集训练的模型在遇到未知类型病变时可能失效, 存在一定误判风险。因此, 未来应探索可解释 AI, 如通过关注光谱波长贡献、可视化重要波段等提高模型透明度, 并采用更多样本特别是多中心数据训练, 提高模型鲁棒性。

尽管如此, 这些挑战正逐步被克服, HSI 融合其他技术的方向引人瞩目。其一是与现有内镜成像融合: HSI 可与 NBI、荧光成像互为补充。例如 HSI 可提供持续的定量氧供信息, 而荧光 ICG 可瞬时反映灌注动态。两者结合有望提高术中灌注评估的可靠性。其二是多模态 AI 决策支持: 将 HSI 与内镜视频、超声内镜等多源信息融合输入 AI, 可望提升诊断准确率和健壮性。例如有研究正在尝试结合白光内镜图像与 HSI 光谱数据进行联合深度学习, 以同时利用形态和光谱特征。其三是定量分析与个体化医疗: HSI 获取的血氧、血容积、含水量等参数可以量化组织生理状态, 从而用于风险评估和术后管理。例如吻合口 HSI 参数可能预测愈合不良的风险, 用于术后早期干预决策。此外, HSI 或可用于指导新型治疗, 如光动力疗法中实时监测肿瘤血氧变化, 优化光敏剂剂量。长远来看, 随着计算性能提高和成本降低, “光谱内镜”有潜力成为未来智慧内镜的重要组成部分, 与病理诊断实现更紧密的衔接。在人工智能加持下, 医生可在内镜检查时即时获得 HSI 的诊断建议, 真正实现“所见即所得”的光学活检, 提高消化道早癌筛查和微创治疗的效果。

HSI 作为将成像与光谱分析融合的一代内镜诊断技术, 在消化道肿瘤和缺血等疾病的研究中展现了独特优势。通过提供每个像素的完整光谱信息, HSI 能够发现传统影像难以察觉的组织生化和血流差异, 实现对早期病变的无创、高敏感度检测, 结合 AI 可实现内镜实时诊断的可能性。尽管目前 HSI 离临床常规应用仍有距离, 但技术瓶颈正逐步解决。从最初的概念验证到近期出现的临床原型, 高光谱内镜向实用化迈出了重要步伐。可以预见, 在不久的将来, 随着更多临床试验证明其有效性,

HSI 有望作为内镜检查的强大辅助,实现对消化道疾病更敏锐的“发现”和更智慧的“决策”。HSI 为我们“看见”传统白光下不可见的信息提供了可能,为消化道疾病的早期诊断和精准治疗开启了新的视野。

【参考文献】

- [1] 陈茹, 魏文强. 《2022 年中国癌症发病和死亡报告》解读[J]. 中国实用外科杂志, 2025, 45(2): 174-180.
- [2] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA, 2024, 74(3): 229-263.
- [3] Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review[J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(1): 010901.
- [4] Zhang Y, Wu X, He L, et al. Applications of hyperspectral imaging in the detection and diagnosis of solid tumors[J]. Translational Cancer Research, 2020, 9(2): 1265.
- [5] Cui R, Yu H, Xu T, et al. Deep learning in medical hyperspectral images: A review[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9790.
- [6] Ortega S, Fabelo H, Iakovidis DK, et al. Use of hyperspectral/multispectral imaging in gastroenterology. Shedding some - different - light into the dark[J]. Journal of Clinical Medicine, 2019, 8(1): 36.
- [7] Liu N, Guo Y, Jiang H, et al. Gastric cancer diagnosis using hyperspectral imaging with principal component analysis and spectral angle mapper[J]. Journal of Biomedical Optics, 2020, 25(6): 66005.
- [8] Grigoriu A, Yoon J, Bohndiek SE. Deep learning applied to hyperspectral endoscopy for online spectral classification[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3947.
- [9] Yoon J, Joseph J, Waterhouse DJ, et al. A clinically translatable hyperspectral endoscopy (HySE) system for imaging the gastrointestinal tract[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1902.
- [10] Lim HT, Murukeshan VM. A four-dimensional snapshot hyperspectral video-endoscope for bio-imaging applications[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 24044.
- [11] 杜剑. 基于医学高光谱影像分析的肿瘤组织分类方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
- [12] Maktabi M, Wichmann Y, Köhler H, et al. Tumor cell identification and classification in esophageal adenocarcinoma specimens by hyperspectral imaging[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 4508.
- [13] Waterhouse DJ, Januszewicz W, Ali S, et al. Spectral endoscopy enhances contrast for neoplasia in surveillance of Barrett's esophagus[J]. Cancer Research, 2021, 81(12): 3415-3425.
- [14] Yang KY, Mukundan A, Tsao YM, et al. Assessment of hyperspectral imaging and CycleGAN-simulated narrowband techniques to detect early esophageal cancer[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 20502.
- [15] Kiyotoki S, Nishikawa J, Okamoto T, et al. New method for detection of gastric cancer by hyperspectral imaging: a pilot study[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(2): 026010.
- [16] Goto A, Nishikawa J, Kiyotoki S, et al. Use of hyperspectral imaging technology to develop a diagnostic support system for gastric cancer[J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(1): 016017.
- [17] Akbari H, Uto K, Kosugi Y, et al. Cancer detection using infrared hyperspectral imaging[J]. Cancer Science, 2011, 102(4): 852-857.
- [18] Sato D, Takamatsu T, Umezawa M, et al. Distinction of surgically resected gastrointestinal stromal tumor by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21852.
- [19] Peng C, Tian CX, Mu Y, et al. Hyperspectral imaging facilitating resect - and - discard strategy through artificial intelligence - assisted diagnosis of colorectal polyps: A pilot study[J]. Cancer Medicine, 2024, 13(18): e70195.
- [20] Yoon J, Joseph J, Waterhouse DJ, et al. First experience in clinical application of hyperspectral endoscopy for evaluation of colonic polyps[J]. Journal of Biophotonics, 2021, 14(9): e202100078.
- [21] Wang YP, Karmakar R, Mukundan A, et al. Spectrum aided vision enhancer enhances mucosal visualization by hyperspectral imaging in capsule endoscopy[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 22243.
- [22] Beaulieu RJ, Goldstein SD, Singh J, et al. Automated diagnosis of colon cancer using hyperspectral sensing[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2018, 14(3): e1897.
- [23] Collins T, Maktabi M, Barberio M, et al. Automatic recognition of colon and esophagogastric cancer with machine learning and hyperspectral imaging[J]. Diagnostics, 2021, 11(10): 1810.
- [24] Mehdorn M, Köhler H, Rabe SM, et al. Hyperspectral imaging (HSI) in acute mesenteric ischemia to detect intestinal perfusion deficits[J]. Journal of Surgical Research, 2020, 254: 7-15.
- [25] Zimmermann A, Köhler H, Chalopin C, et al. The role of intraoperative hyperspectral imaging (HSI) in colon interposition after esophagectomy[J]. BMC Surgery, 2023, 23(1): 47.
- [26] Pfahl A, Radmacher GK, Köhler H, et al. Combined indocyanine green and quantitative perfusion assessment with hyperspectral imaging during colorectal resections[J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(5): 3145-3160.
- [27] Pimentel DV, Merten L, Gosemann JH, et al. Hyperspectral Imaging—A Novel Tool to Assess Tissue Perfusion and Oxygenation in Esophageal Anastomoses[J]. European Journal of Pediatric Surgery Reports, 2023, 11(1): e32-e35.

(收稿日期: 2025-07-01; 修回日期: 2025-07-20)

(本文编辑: 林 赞)