

基于人工智能的超声内镜在胃肠道间质瘤中的应用

曹泽余, 宁波*

重庆医科大学附属第二医院消化内科, 重庆

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月20日

摘要

随着消化内镜的普遍应用胃肠黏膜下隆起时常被发现, 病变类型多种多样。由于疾病特点、检查手段本身的局限性及医师间的差异性, 诊断及鉴别诊断难度较大。特别对于胃肠道间质瘤, 这是一种具有恶性潜能的肿瘤, 正确预测其生物学行为和危险度, 且以此为依据, 为患者制定具有针对性的个体化治疗方案。而超声内镜及人工智能的发展使得准确诊断成为可能, 故本综述阐述了超声内镜及其与人工智能的结合在评估胃肠道间质瘤中发展和应用, 最后提出未来展望和挑战。

关键词

胃肠间质瘤, 危险分层, 超声内镜, 人工智能

Application of AI-Based Endoscopic Ultrasound in Gastrointestinal Stromal Tumors

Zeyu Cao, Bo Ning*

Department of Gastroenterology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 20th, 2025

Abstract

With the widespread application of digestive endoscopy, submucosal elevations in the gastrointestinal tract are frequently detected. These lesions vary widely in type, and due to the characteristics

*通讯作者。

文章引用: 曹泽余, 宁波. 基于人工智能的超声内镜在胃肠道间质瘤中的应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 987-996.
DOI: 10.12677/acm.2025.1551459

of the diseases, the inherent limitations of the examination techniques, and differences among physicians, the identification and differentiation present significant challenges. Especially for gastrointestinal stromal tumors (GISTs), which are neoplasms with malignant potential, clinical practice necessitates accurate prediction of their biological behavior and risk stratification. This serves as the foundation for formulating individualized treatment plans tailored to each patient. The advancements in endoscopic ultrasound (EUS) and artificial intelligence (AI) have enabled accurate diagnosis. This review systematically examines the evolution and clinical utilization of EUS, particularly its synergistic integration with AI in the diagnostic evaluation of GISTs, and critically explores both emerging opportunities and persistent challenges in advancing this interdisciplinary approach.

Keywords

GIST, Risk Stratification, Endoscopic Ultrasound, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胃肠粘膜下隆起在消化内镜检查中被常规发现, 根据研究数据表明, 随着近年来消化内镜技术的广泛应用及 EUS 检查技术的发展与成熟, SMT 的检出率呈显著增长趋势, 统计显示在日常检查中平均每 300 例内镜检查即可发现 1 例 SMT [1]-[3]。胃肠黏膜下或上皮内病变涵盖类型多样, 既包括胃肠间质瘤、平滑肌瘤、神经鞘瘤、脂肪瘤、神经内分泌肿瘤等肿瘤性病变, 也包括异位胰腺等非肿瘤性病变; 其中最常见的是胃肠道间质瘤, 它是源于胃肠道 Cajal 间质细胞、具备恶性潜能且主要在消化道固有肌层生长的肿瘤[4], 全球范围内其发生频率为每年每百万人 6.8 至 14.5 例, 胃部发病最为频繁(51%), 其次为小肠(36%)、结肠(7%)、直肠(5%)和食管(1%), 极个别病例会出现在胃肠道外的网膜或肠系膜, 研究表明, 估计术后 5 年无复发生存率为 59.9% [5]。随着肿瘤体积增大, 往往具有更高的危险度, 如更高的核分裂像、转移率及复发率, 它们通常在 EUS 上表现为体积大、边界不规则、回声不均匀、强回声区及囊变等特征。然而并不是所有都会表现出这些特征, 部分研究表明即使没有表现出高危险特征的小间质瘤也可能出现快速进展及转移, 高达 11% 的患者在初步诊断时显示区域或远处转移, 当前治疗上首选切除, 特别是直径 $> 2\text{ cm}$; 而在直径 $\leq 2\text{ cm}$ 的无症状 GIST, 常通过超声内镜评估风险等级。研究表明, 超声内镜诊断胃肠道间质瘤的灵敏度、特异度、准确度均高于 CT 增强扫描[6]。相比 CT 和 MRI, 尽管超声内镜凭借其精准定位和分层诊断能力成为胃肠道间质瘤首选检查方式, 但其图像的解释和分析仍高度依赖医师经验, 存在主观性差异, 可能导致诊断结果缺乏统一标准, 这种客观存在的差异性使得不同医师在临床实践中难以形成高度一致的判断共识[7]-[11], 因此准确诊断并制定合适治疗方案对患者至关重要。而人工智能技术的引入, 通过算法优化和自动化分析, 显著提升了病变评估的客观性、效率及安全性, 近年来越来越多的研究探讨了基于人工智能的超声内镜在胃肠道间质瘤的应用, 故本综述就超声内镜及人工智能在评估胃肠道间质瘤中的发展及应用进行阐述并提出期望及挑战。

2. 超声内镜及其衍生技术的优劣及应用

近年来, 超声内镜被认为是评估胃肠道粘膜下肿瘤的常用检查方法, 它能评估病变的大小、形状、边界、内部回声、病变起源及周围淋巴结情况, 因此, EUS 在可及性、可检测性和无创性等方面是一种

金标准成像方式。针对胃间质瘤, 马等人纳入 2018 年 10 月~2020 年 10 月该院收治的 188 例胃间质瘤疑似患者作为研究对象开展回顾性分析。分析超声内镜与病理检查诊断胃间质瘤的一致性, 并探讨超声内镜诊断胃间质瘤准确率的影响因素。超声内镜诊断胃间质瘤的灵敏度为 88.27%, 特异度为 65.38%, 准确率为 85.11%, 阳性预测值为 94.08%, 阴性预测值为 47.22%, Kappa 值为 0.462。符合诊断的患者 160 例, 不符合诊断的患者 28 例。符合诊断的患者中, 病变直径 ≥ 2 cm、回声不均匀、存在钙化的患者占比明显高于不符合诊断的患者($P < 0.05$)。多因素 Logistic 回归分析显示, 病变直径、回声均匀、钙化是超声内镜诊断胃间质瘤准确率的独立影响因素($P < 0.05$) [12]。但其也存在一定程度的局限性, 朱及其团队开展了一项回顾性临床研究, 纳入了 2008 年 9 月至 2016 年 12 月期间接受超声内镜(EUS)评估后行内镜黏膜下剥离术(ESD)治疗的 614 例胃黏膜下肿瘤(SMTs)患者。研究数据显示在肿瘤起源层次判断方面, EUS 与术中观察结果的总体一致性达 91.25%, 其中对黏膜肌层、黏膜下层及固有肌层起源的准确率分别为 66.67%、80.85%和 94.50%; 在病理类型鉴别方面, EUS 与术后病理的总体诊断符合率为 65.99%, 具体表现为对胃肠间质瘤(GIST)和脂肪瘤的鉴别准确率较高(分别为 91.85%和 90.70%), 但对平滑肌瘤的鉴别能力相对局限(18.56%), 而对异位胰腺的识别准确率则达 79.76% [13], 由此可见不同医院、不同病变结果存在较大差异, 干扰因素较多。

超声弹性成像可以将组织弹性系数量化和可视化, 并对目标组织结构受压后内部应力的变化进行定性及定量分析, 因此能通过无创检测肿瘤组织硬度有助于胃 SMT 的鉴别诊断, 尤其是 GIST 与其他 SMT 的鉴别诊断; 另外, 超声对比增强谐波造影技术不仅可精准评估肿瘤的部位、大小、形态、边界及内部回声特征, 还能动态分析其血流灌注模式, 从而显著提升传统超声内镜(EUS)对黏膜下肿瘤(SMT)的鉴别效能, 并为肿瘤良恶性程度提供更可靠的评估依据[14]-[17]。陆等人针对 49 例普通胃镜初筛提示胃间质瘤的患者开展多模态诊断评估, 采用超声内镜联合弹性成像技术, 通过 Giovannini 弹性评分系统量化病灶特性, 对超声内镜疑诊为间质瘤患者行内镜下粘膜剥离术(ESD)或手术治疗, 最终以组织病理学结果为诊断标准进行验证。数据显示常规超声内镜诊断的敏感性 76.9%、特异性 75.0%; 而弹性成像技术的诊断效能显著提升, 敏感性与特异性分别达到 89.7%和 87.5%, 低危与高危组肿瘤大小、肿瘤形态、内部回声、血流信号、弹性分值比较, 差异均有统计学意义($P < 0.05$), 证实该技术对胃间质瘤的鉴别诊断具有重要临床价值。根据 Logistic 回归分析结果, 弹性分值被证实为评估胃间质瘤危险程度的独立风险因素。相关 ROC 曲线分析显示, 该指标的曲线下面积(AUC)达到 0.971, 具有极高的鉴别效能。当采用 3 分作为区分低危组与高危组的临界阈值时, 其检测敏感性和特异性分别达到 86.67%和 100%, 展现出优异的诊断性能[18]。在治疗领域, EUS 引导下的射频消融术在胰腺病变治疗中应用广泛, 然而关于其在原发性胃肠间质瘤(GIST)治疗中的应用, 相关研究报道却十分有限。有研究聚焦于术中超声引导下射频消融联合手术治疗胃肠道间质瘤肝转移的情况, 纳入 24 例患者, 其中 3 例(占比 12.5%)在术中超声引导下射频消融术(IORFA)后分别于 16、51 和 95 个月时, 在完全缓解的情况下出现了新的转移。研究还统计了累计 1 年、3 年和 5 年的总生存率分别达到 100%、94.4%和 87.7%; 与 GIST 相关的 1 年、3 年和 5 年生存率分别为 100%、94.4%和 94.4%。此外, 治疗过程中观察到 2 例严重并发症, 分别为胆道狭窄和肝脓肿, 但在采取合适的治疗措施后, 这些并发症均得到了较好的改善。基于上述研究结果, 作者认为超声引导下的射频消融术对于原发性 GIST 患者出现肝转移的情况而言, 似乎是一种可行且安全的治疗选择。并且, 射频消融术与手术切除可能存在互补关系, 这有助于在因 GIST 引发的其他无法进行手术的肝转移病例中, 实现完全缓解的治疗效果[19]。因此对于发生或未发生转移的, 外科或内镜手术不能切除的 GIST, 或许可以采取 EUS 引导的射频消融术进行替代、联合治疗。

目前临床上诊断 SMT 的金标准仍是病理组织学, 与上皮肿瘤不同, SMT 由于表面正常黏膜的屏障作用, 可能出现病理活检结果误差, 即使是 boring biopsy or bite-on-bite biopsy [20]; 而 EUS-FNA、EUS-

FNB 则解决了这个问题, 其被认为是一线标准手段, 可以通过被覆黏膜直接获取组织及其周围淋巴结, 且术后不良事件风险较低, 具有高效、准确、方便、安全的特点[21]-[23]。康等人通过纳入 54 例经临床及影像学检查疑似胃肠道间质瘤的患者, 采用超声内镜引导下细针穿刺(EUS-FNA)结合组织病理学与免疫组化染色技术进行诊断分析。数据显示细胞学检查的术前诊断准确率为 85.19%, 表明其在明确肿瘤性质方面具有较高敏感性。然而, 针对肿瘤危险度分级(如极低危、低危、中危及高危)及预后评估, 仍需依赖组织病理学核分裂象计数、免疫组化标志物(如 CD117、DOG1)检测, 并结合患者临床病史、肿瘤最大径、是否存在坏死或囊变等影像学特征进行多维度综合判断[24]。可上述技术手段仍属于创伤性操作范畴, 同时样本采集的充分性也面临显著挑战, 研究表明 EUS-FNA、FNB 在 SEL 中的准确率范围广泛, 从 62.0% 到 93.4% 不等, 超声内镜引导下细针穿刺(EUS-FNA)对 SMTs 的总诊断率为 59.9%, 超声引导下细针穿刺活检(EUS-FNB)并不优于 EUS-FNA 的上限诊断率[25]-[27]。因此这些技术的诊断价值是有局限性的; 此外以上超声内镜技术均受内镜医师及病理医师技术、经验、仪器设备等因素的影响, 观察者间一致性较差, 故在鉴别不同种类粘膜下肿瘤并制定相应合适的治疗方案存在一定难度。

3. 胃肠道间质瘤危险度的评估

胃肠道间质瘤因其潜在的恶性生物学特性, 有文献表明术后仍可能发生肝脏、腹膜等转移, 因此临床上需要正确评估其危险度并预测生物学行为, 从而制定个体化治疗方案[28], 目前的指南建议对 > 2 cm 的胃 GIST 进行手术切除, 并对 ≤ 2 cm 的无症状、没有高风险 EUS 特征的胃 GIST 患者进行 6~12 月随访, 具体方案的实行对临床医生是一种挑战[29]; 目前临床广泛应用的胃肠道间质瘤危险度评估体系包括美国国立卫生研究院(NIH)分级系统、NIH 修订版标准及武装部队病理研究所(AFIP)风险分层模型, 见表 1 [30]-[33], 这些标准通过综合肿瘤直径、原发部位、核分裂象计数以及是否存在破裂等高危因素进行风险分层, 其评估依据主要来源于影像学检查及病理组织学分析, 需要说明的是上述标准仅限于原发 GIST 切除术后复发风险及预后, 我们仍需要从临床获取术前评估危险度的直接证据。目前一些研究尝试寻找间质瘤的危险因素或特征, 但未达成一致。

Table 1. Risk classification of primary gastrointestinal stromal tumors after resection (NIH 2008 modified)
表 1. 原发性 GIST 切除术后危险度分级(NIH 2008 改良版)

危险度分级	肿瘤大小(cm)	核分裂象(/50 HPF)	肿瘤部位	是否破裂
极低危	≤2	≤5	胃	否
低危	≤2	≤5	非胃	否
	2.1~5	≤5	胃	否
	≤5	6~10	胃	否
中危	5.1~10	≤5	胃	否
	≤5	≤5	非胃	否
	≤5	≤5	非胃	否
高危	>10	任何	任何	是
	任何	>10	任何	否
	>5	>5	非胃	否

李等人回顾性分析经超声检查及手术病理证实的胃间质瘤患者 90 例, 根据 NIH 2008 版将患者分为低危组 37 例和高危组 53 例, 发现肿瘤大小、内部回声是否均匀、肿瘤形态、边界、内部血流信号与肿瘤恶性潜能存在相关性, 而肿瘤大小是胃间质瘤侵袭危险性的独立预测因素。根据肿瘤最大径判断胃间

质瘤侵袭危险性的 ROC 曲线下面积为 0.901 [34]; 卢等人收集温州市 3 大医院 286 例经病理及免疫组化确诊为 GSTs 患者, 根据肿瘤大小、核分裂象将其分为极低危组、低危组、中危组以及高危组, 回顾分析不同侵袭危险性 GSTs 组间临床资料及 EUS 图像特征, 寻找差异并进行相关危险因素分析。单因素分析显示侵袭危险性越高, 溃疡越好发, 内部回声不均匀、钙化及囊性变现象越常见; 而进一步多因素分析显示溃疡的发生是唯一预测 GSTs 侵袭危险性分级的独立因素[35]。陈等人借助 Photoshop 软件对超声内镜图像进行量化处理。他们用灰度平均值来衡量回声强度, 用灰度标准偏差来衡量回声均匀度。研究结果显示胃肠道间质瘤(GIST)组的灰度平均值与灰度标准偏差明显高于对照组。进一步分析发现, 这两个指标与患者的肿瘤直径、核分裂数以及危险度分级存在关联。在诊断效能方面, 灰度平均值和灰度标准偏差在 GIST 诊断及危险性分级中的曲线下面积(AUC)分别达到 0.841、0.743 和 0.822、0.746。这一结果表明, 灰度平均值和灰度标准偏差能够有效反映超声内镜的检查结果, 并且在 GIST 的诊断和分级中具有较好的应用价值[36]。陶等人研究发现在胃间质瘤的恶性潜能评估中, 肿瘤体积较大(尤其胃体、胃角或胃窦区域病灶)、表面存在溃疡、形态不规则、回声强度差异显著且不均匀、外生型生长模式等特征, 往往提示更高的恶性风险。通过多因素分析进一步证实, 镜下测量的肿瘤大小、溃疡存在与否、病灶区域回声灰度差异以及内生面积与总面积的比值, 均是判断高恶性潜能的关键独立危险因素, 肿瘤体积和溃疡状态在风险预测中具有更显著的统计学意义, 并构建胃间质瘤恶性潜能的列线图预测模型, 预测模型区分开发队列中不同恶性潜能胃间质瘤的 AUC 为 0.877。通过 Hosmer-Lemeshow 检验进行拟合优度检验, 得到 $P=0.539$, 表明模型整体拟合效果良好[37]。尽管目前国内外已经有不少研究在该领域探索, 但仍未达成一致共识。

4. 当今现状及 AI 的发展

人工智能技术的快速进步与广泛应用为相关难题的突破提供了新路径。该技术本质上是依托计算机系统构建的智能分析模型, 通过对海量数据的深度挖掘实现规律识别与趋势预判。在医疗影像分析领域, 当前主流的算法体系可划分为两大方向: (1) 基于神经网络的深度学习架构, 例如在超声内镜(EUS)图像处理中广泛应用的卷积神经网络(CNN), 其通过模拟人脑神经元的多层连接结构, 构建起能自主解析复杂医学影像的智能系统。这类网络特有的层级化特征提取机制, 不仅能高效处理高维图像数据, 还能通过自动识别和提取关键病理特征, 实现精准的图像分类与病灶分割; (2) 依托传统算法的机器学习系统, 这类技术通过构建数据驱动的学习模型, 在持续迭代过程中不断提升对医学影像特征的识别能力, 最终形成可靠的诊断预测体系。两类技术虽实现路径不同, 但都展现了从数据中自主进化诊断能力的核心特征。在超声内镜成像领域, 人工智能技术不仅可用于图像解读, 还可深度优化图像采集, 核心功能包括自动分割和图像质量改进, 自动分割涉及使用人工智能算法来识别和分离 EUS 图像中的器官、病变区域及血管结构等不同结构, 显著提升目标区域的解剖可视化精度; 图像质量的改善涉及使用人工智能算法来有效改善 EUS 图像清晰度、对比度与分辨率, 提供更高质量的影像基础, 这有助于提高图像解释和诊断的准确性, 这些技术突破在临床中具有双重价值: 术中应用可实时优化影像引导穿刺路径、精确穿刺靶点; 日常检查通过优化图像质量提升检出率、诊断率。部分研究已经在探索基于人工智能的超声内镜在肝、胆、胰腺、食管、胃肠等系统中的应用, 多项研究证实, 基于人工智能的超声内镜模型在区分 GIST 和其他黏膜下肿瘤方面表现出显著优势, 其敏感性与特异性均优于传统内镜医师的诊断能力。一项涵盖 7 项研究的荟萃分析显示, CNN 支持的超声内镜 AI 系统在 GIST 诊断中展现出 92% 的综合敏感性和 82% 的特异性, 这两项关键指标均超过内镜医师的常规诊断水平[38]-[40]。例如, 在针对胃肠道间质瘤与非胃肠道间质瘤的术前鉴别研究中, 王等人采用机器学习方法对比了五种特征筛选策略的性能差异。结果显示: 基于 PCA (主成分分析)单一方法建立的预测模型 AUC 为 0.581, 而结合 LASSO (最小绝对收缩选择算

子)、XGBoost(极端梯度提升)、随机森林等算法的复合特征筛选方案显著提升了模型效能,其 AUC 分别达到 0.870、0.874 和 0.860,其中 XGBoost 组合方案表现最优。该研究通过多维度特征筛选方法的对比,凸显了机器学习在复杂医学数据特征学习与模式识别中的显著优势[41]。Yang 等人使用来自 752 名 GIST 或 GIL 参与者的 10439 张 EUS 图像开发 AI 模型,通过前瞻性测试得出通过联合诊断内镜超声医师诊断 132 例经组织学证实的参与者的总准确率从 69.7%增加到 78.8% [42]。Kim 主导研究开发了基于卷积神经网络的 EUS-AI 模型,该模型区分 GIST 和非 GIST 肿瘤的灵敏度为 83.0%,特异性为 75.5%,准确性为 79.2 [4];相比之下 Dong 等人也基于卷积神经网络技术搭建了一套 AI 模型来区分 SEL 和平滑肌瘤,他们回顾性收集 1101 名参与者的数据进行 AI 系统开发,招募了一组 241 名 SEL 参与者对其系统进行外部验证,并前瞻性招募了另一组 59 名 SEL 参与者,以评估 AI 系统的实时临床应用。该研究比 Kim 等人的研究涉及更多的患者,灵敏度、特异性和准确性分别为 90.3%、93.0%和 91.7%,展现出更好的性能[43]。Hirai 等人研究表明 AI 系统基于 EUS 图片对五种不同类型的 SELS 进行分类的准确性为 86.1%,这明显优于所有内镜医生,特别是检测 GIST 的 AI 系统的敏感性和准确性高于所有内镜医生的灵敏度和准确性 [26]。而 Zhu 等人更是开发了一项多模式多通道的 AI 系统,该系统不仅可用于白光内镜图像识别,而且可用于内镜超声图像分析,该 MMP-AI 分别获得了 0.896、0.890 和 0.999 的最高 AUC,分别用于分类 GIST, GIL 和 GEP,与内镜医生相比 MMP-AI 对 SMT 的识别精度提高了[44]。Minoda 等人研究表明,与经验丰富的内镜医师相比他们的 AI 具有更好的准确性、灵敏度和特异性,而与病变大小无关。他们根据直径将病变分为两组, AI 对小于 20 mm 的 SEL 的准确性、灵敏度和特异性分别为 86.3%、86.3%和 62.5%。相比之下人类专家组的这些指标分别为 73.3%、68.2%和 87.5%。对于大于 20 mm 的 SEL, AI 组的准确性、灵敏度和特异性分别为 90.0%、91.7%和 83.3%。而 EUS 专家分别达到 53.3%、50.0%和 83.3%。AI 组诊断率的曲线下面积显著高于($P=0.007$)专家组,分别为 0.965 和 0.684 [45]。以上研究主要利用卷积神经网络将 EUS-AI 模型用于包括胃肠间质瘤在内的 SMT 诊断及鉴别诊断,展现出过人的能力。而 Lu 等人更是分别在鉴别诊断的基础上[46],将 AI 应用于 GIST 的危险因素识别, Lu 等人得出四类风险 EUS-AI 模型的总体准确性、灵敏度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为 74.50%、55.00%、79.05%、53.49%和 81.63%。两类风险 EUS-AI 模型预测肿瘤外部验证集中极低风险 GIST 的准确性、灵敏度、特异性、PPV 和 NPV 分别为 86.25%、94.44%、79.55%、79.07%和 94.59% [47]。类似地,Seven 等人也将模型分为二分类和四分类,前者分为低危和高危,分别包括极低危与低危,中危与高危,在验证队列中, AI 预测 AFIP 标准的灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确性分别为 75%、73%、68%、79%和 66%,当患者被分为低危组和高危组时,敏感性增加到 99%,特异性增加到 99%,阳性预测值增加到 89%,阴性预测值增加到 89%,准确性增加到 99%。预测有丝分裂指数的灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确性分别为 96%、96%、93%、93%和 96% [48]。总体来看,在胃肠间质瘤评估方面, EUS-AI 模型表现不逊色于内镜医师。然而,在针对个别危险度的精细评估与预警上,目前的研究成果尚不理想。也许跟仪器设备、图像选择及诠释、样本量、算法均有关系。选择合适的算法至关重要,例如根据数据规模,小数据优先选择 SVM、决策树等,而大数据则选择神经网络、集成方法(如 XGBoost)。另外,同一模型在不同医院的不同数据下也可能表现出较大差异,因此需利用 benchmark dataset 对模型性能及算法进行评估。不同算法模型优劣见表 2。

5. 展望及总结

人工智能赋能的超声内镜技术在胃肠道间质瘤的诊疗领域展现出显著优势。它能够提升胃肠道间质瘤诊断的准确性,精准评估其危险程度,进而为临床治疗提供更具针对性的指导,改善患者的治疗结局。在经济、安全、效率和准确性等多个维度,该技术都能让多方从中受益。对于医师而言,它有助于优化

Table 2. The characteristics of artificial intelligence models
表 2. 人工智能模型特点

方法	优势	劣势	适用场景
线性回归	简单、可解释性强	仅限线性关系	简单回归任务
决策树	直观、处理非线性数据	容易过拟合	需要解释性的分类任务
随机森林	高精度、鲁棒性强	计算成本高	结构化数据竞赛、金融风控
SVM	高维数据表现好、核技巧灵活	计算复杂度高、调参复杂	小样本高维分类
XGBoost	结构化数据最优解之一	可解释性低于单棵树	表格数据竞赛、商业预测
神经网络	拟合复杂函数、自动特征学习	需大数据、计算资源	图像、语音、自然语言处理
K-Means	简单高效、扩展性强	需预设簇数、仅凸形簇	客户分群、图像压缩
GAN	生成高质量数据	训练不稳定、评估困难	图像生成、数据增强

决策过程；对于患者来说，则能够支持制定个性化的治疗方案。不仅如此，AI 模型可以在低成本的前提下持续扩充数据并及时更新，相较于传统诊疗模式，具备更强的时效性和经济性；从人才培养角度看，人工智能的引入能有效缩短新手医生的学习周期。以往，新手医生需要经验丰富的内窥镜医生进行大量培训，才能规范掌握超声内镜(EUS)操作技能。

然而，基于超声的人工智能技术在临床实践中的应用也存在一定的局限性。一方面，超声图像的采集和解读过程存在较大的可变性，这严重影响了诊断的一致性和准确性。因此，统一超声检查过程中的图像采集流程以及数据测量标准迫在眉睫。另一方面，当前部分人工智能超声研究存在潜在的数据选择偏倚问题，训练集的数据量不足、分配不平衡。为保证 AI 模型的有效性和稳定性，开展丰富的多中心前瞻性研究十分必要。

人工智能特别是深度学习对图像数据量有极高的要求，所以需要各方共同协作，构建一个丰富的数据库，并搭建云平台。这不仅能够提升地区医院的整体医疗水平，还能让更多患者从中受益。不过在这一过程中，必须高度重视数据的机密性，切实保护患者的隐私安全。同时，为确保 AI 技术合理合法地应用，减少或避免因 AI 错误导致的伤害，还需要制定明确的问责政策，加强对 AI 技术的有效监管。

EUS-AI 技术在医疗领域的应用前景广阔，但其核心价值并非取代内窥镜医生，而是通过人机互补协作实现诊疗决策的优化。这种协同模式不仅能够提升疾病诊断的准确性，还将为个体化精准医疗的深化提供技术支撑。未来需推动多中心联合研究，推动多中心协作建立标准化 EUS 图像数据库结合临床实践需求开发更完善的评估体系，开发轻量化 AI 模型适配基层医疗场景，并探索 AI 与超声弹性成像、增强造影的多模态融合从而释放 AI 在消化道肿瘤精准诊疗中的潜力。

致 谢

谨向我的导师致以最诚挚的谢意。您以渊博的医学专业知识为我奠定了深厚的学术根基，以严谨的治学态度塑造了我的科学思维，更以全程指导实验设计、论文撰写等环节的宝贵经验，为我的研究注入了学术灵魂。在研究遭遇瓶颈时，您逐条批注的修改意见、深入的学术讨论以及富有洞见的指导，让我在学术智慧与专业成长中获益匪浅。

参考文献

[1] Sharzehi, K., Sethi, A. and Savides, T. (2022) AGA Clinical Practice Update on Management of Subepithelial Lesions Encountered during Routine Endoscopy: Expert Review. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **20**, 2435-2443.

- <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2022.05.054>
- [2] 周平红, 钟芸诗, 李全林, 等. 中国消化道黏膜下肿瘤内镜诊治专家共识(2018 版) [J]. 中国实用外科杂志, 2018, 38(8): 840-850.
- [3] 周平红, 钟芸诗, 李全林. 中国消化道黏膜下肿瘤内镜诊治专家共识(2023 版) [J]. 中国实用外科杂志, 2023, 43(3): 241-251.
- [4] Kim, Y.H., Kim, G.H., Kim, K.B., Lee, M.W., Lee, B.E., Baek, D.H., *et al.* (2020) Application of a Convolutional Neural Network in the Diagnosis of Gastric Mesenchymal Tumors on Endoscopic Ultrasonography Images. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 3162. <https://doi.org/10.3390/jcm9103162>
- [5] Akahoshi, K., Oya, M., Koga, T. and Shiratsuchi, Y. (2018) Current Clinical Management of Gastrointestinal Stromal Tumor. *World Journal of Gastroenterology*, **24**, 2806-2817. <https://doi.org/10.3748/wjg.v24.i26.2806>
- [6] 张艳, 季新荣. 超声内镜和多层螺旋 CT 多期增强扫描在胃肠道间质瘤诊断中的价值[J]. 医疗装备, 2024, 37(4): 99-102.
- [7] Joensuu, H., Vehtari, A., Riihimäki, J., Nishida, T., Steigen, S.E., Brabec, P., *et al.* (2012) Risk of Recurrence of Gastrointestinal Stromal Tumour after Surgery: An Analysis of Pooled Population-Based Cohorts. *The Lancet Oncology*, **13**, 265-274. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(11\)70299-6](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(11)70299-6)
- [8] Coe, T.M., Fero, K.E., Fanta, P.T., Mallory, R.J., Tang, C., Murphy, J.D., *et al.* (2016) Population-Based Epidemiology and Mortality of Small Malignant Gastrointestinal Stromal Tumors in the USA. *Journal of Gastrointestinal Surgery*, **20**, 1132-1140. <https://doi.org/10.1007/s11605-016-3134-y>
- [9] Aso, A., Ihara, E., Kubo, H., Osoegawa, T., Oono, T., Nakamura, K., *et al.* (2013) Gastric Gastrointestinal Stromal Tumor Smaller than 20 mm with Liver Metastasis. *Clinical Journal of Gastroenterology*, **6**, 29-32. <https://doi.org/10.1007/s12328-012-0351-0>
- [10] Nishida, T., Kawai, N., Yamaguchi, S. and Nishida, Y. (2013) Submucosal Tumors: Comprehensive Guide for the Diagnosis and Therapy of Gastrointestinal Submucosal Tumors. *Digestive Endoscopy*, **25**, 479-489. <https://doi.org/10.1111/den.12149>
- [11] Palazzo, L. (2000) Endosonographic Features Predictive of Benign and Malignant Gastrointestinal Stromal Cell Tumours. *Gut*, **46**, 88-92. <https://doi.org/10.1136/gut.46.1.88>
- [12] 马栋, 汪红红, 周永宁. 超声内镜诊断胃间质瘤与术后病理的一致性观察及其诊断准确率的影响因素分析[J]. 中国内镜杂志, 2021, 27(10): 40-45.
- [13] 朱兰平, 王泽葵, 马双, 等. 超声内镜在胃黏膜下肿瘤诊断中的局限性[J]. 中国内镜杂志, 2018, 24(1): 29-33.
- [14] Yang, Y., Shen, N., Ao, F. and Chen, W. (2020) Diagnostic Value of Contrast-Enhanced Harmonic Endoscopic Ultrasonography in Predicting the Malignancy Potential of Submucosal Tumors: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Surgical Endoscopy*, **34**, 3754-3765. <https://doi.org/10.1007/s00464-020-07585-6>
- [15] Chak, A. (2002) EUS in Submucosal Tumors. *Gastrointestinal Endoscopy*, **56**, S43-S48. <https://doi.org/10.1067/mge.2002.127700>
- [16] Tsuji, Y., Kusano, C., Gotoda, T., Itokawa, F., Fukuzawa, M., Sofuni, A., *et al.* (2015) Diagnostic Potential of Endoscopic Ultrasonography-Elastography for Gastric Submucosal Tumors: A Pilot Study. *Digestive Endoscopy*, **28**, 173-178. <https://doi.org/10.1111/den.12569>
- [17] He, H., Tang, T., Wang, X., Zhou, L. and Wang, L. (2023) Comparing Endoscopic Ultrasonography and Double Contrast-Enhanced Ultrasonography in the Preoperative Diagnosis of Gastric Stromal Tumor. *Cancer Imaging*, **23**, Article No. 122. <https://doi.org/10.1186/s40644-023-00646-8>
- [18] 陆芬英, 成翠娥, 王伟, 等. 超声内镜弹性成像技术在胃间质瘤危险度评估中的价值[J]. 交通医学, 2022, 36(2): 176-179.
- [19] Yoon, I.S., Shin, J.H., Han, K., Kim, P.N., Kim, K.H., Kang, Y., *et al.* (2018) Ultrasound-Guided Intraoperative Radiofrequency Ablation and Surgical Resection for Liver Metastasis from Malignant Gastrointestinal Stromal Tumors. *Korean Journal of Radiology*, **19**, 54-62. <https://doi.org/10.3348/kjr.2018.19.1.54>
- [20] Hunt, G., Smith, P. and Faigel, D. (2003) Yield of Tissue Sampling for Submucosal Lesions Evaluated by EUS. *Gastrointestinal Endoscopy*, **57**, 54-57. [https://doi.org/10.1016/s0016-5107\(03\)70117-5](https://doi.org/10.1016/s0016-5107(03)70117-5)
- [21] Goto, O., Kaise, M. and Iwakiri, K. (2022) Advancements in the Diagnosis of Gastric Subepithelial Tumors. *Gut and Liver*, **16**, 321-330. <https://doi.org/10.5009/gnl210242>
- [22] Okasha, H., Naguib, M., El Nady, M., Ezzat, R., Al-Gemeie, E., Al-Nabawy, W., *et al.* (2017) Role of Endoscopic Ultrasound and Endoscopic-Ultrasound-Guided Fine-Needle Aspiration in Endoscopic Biopsy Negative Gastrointestinal Lesions. *Endoscopic Ultrasound*, **6**, 156-161. <https://doi.org/10.4103/2303-9027.201086>
- [23] Philipper, M., Hollerbach, S., Gabbert, H.E., *et al.* (2010) Prospective Comparison of Endoscopic Ultrasound-Guided

- Fine-Needle Aspiration and Surgical Histology in Upper Gastrointestinal Submucosal Tumors. *Endoscopy*, **42**, 300-305.
- [24] 康劲松, 程斌, 马珩, 等. 超声内镜引导下细针穿刺细胞病理学检查对胃肠道间质瘤的诊断及鉴别诊断[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2022, 51(4): 526-530.
- [25] Zhang, X., Li, Q., Yu, Y., Yao, L., Xu, M., Zhang, Y., *et al.* (2015) Diagnostic Efficacy of Endoscopic Ultrasound-Guided Needle Sampling for Upper Gastrointestinal Subepithelial Lesions: A Meta-Analysis. *Surgical Endoscopy*, **30**, 2431-2441. <https://doi.org/10.1007/s00464-015-4494-1>
- [26] Hirai, K., Kuwahara, T., Furukawa, K., Kakushima, N., Furune, S., Yamamoto, H., *et al.* (2021) Artificial Intelligence-Based Diagnosis of Upper Gastrointestinal Subepithelial Lesions on Endoscopic Ultrasonography Images. *Gastric Cancer*, **25**, 382-391. <https://doi.org/10.1007/s10120-021-01261-x>
- [27] de Moura, D.T.H., McCarty, T.R., Jirapinyo, P., Ribeiro, I.B., Flumignan, V.K., Najdawai, F., *et al.* (2020) EUS-Guided Fine-Needle Biopsy Sampling versus FNA in the Diagnosis of Subepithelial Lesions: A Large Multicenter Study. *Gastrointestinal Endoscopy*, **92**, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2020.02.021>
- [28] Miettinen, M., Lasota, J. and Sobin, L.H. (2005) Gastrointestinal Stromal Tumors of the Stomach in Children and Young Adults. *American Journal of Surgical Pathology*, **29**, 1373-1381. <https://doi.org/10.1097/01.pas.0000172190.79552.8b>
- [29] von Mehren, M., Randall, R.L., Benjamin, R.S., Boles, S., Bui, M.M., Ganjoo, K.N., *et al.* (2018) Soft Tissue Sarcoma, Version 2.2018, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*, **16**, 536-563. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2018.0025>
- [30] Joensuu, H. (2008) Risk Stratification of Patients Diagnosed with Gastrointestinal Stromal Tumor. *Human Pathology*, **39**, 1411-1419. <https://doi.org/10.1016/j.humpath.2008.06.025>
- [31] Khoo, C.Y., Chai, X., QUEK, R., Teo, M.C.C. and Goh, B.K.P. (2018) Systematic Review of Current Prognostication Systems for Primary Gastrointestinal Stromal Tumors. *European Journal of Surgical Oncology*, **44**, 388-394. <https://doi.org/10.1016/j.ejso.2017.12.006>
- [32] Miettinen, M. and Lasota, J. (2006) Gastrointestinal Stromal Tumors: Pathology and Prognosis at Different Sites. *Seminars in Diagnostic Pathology*, **23**, 70-83. <https://doi.org/10.1053/j.semdp.2006.09.001>
- [33] Fletcher, C.D.M., Berman, J.J., Corless, C., Gorstein, F., Lasota, J., Longley, B.J., *et al.* (2002) Diagnosis of Gastrointestinal Stromal Tumors: A Consensus Approach. *Human Pathology*, **33**, 459-465. <https://doi.org/10.1053/hupa.2002.123545>
- [34] 李菡煦, 陈路增, 邵玉红, 等. 胃间质瘤超声影像学特征与侵袭危险性的相关性分析[J]. 中国超声医学杂志, 2019, 35(7): 612-615.
- [35] 卢光荣, 周羽翔, 钟金伟, 等. 不同侵袭危险性胃间质瘤的超声内镜图像特点比较及相关危险因素分析[J]. 中国内镜杂志, 2016, 22(1): 1-4.
- [36] 陈丽萍, 余志金, 陈惠新. 超声内镜联合 Ki-67、DOG1 表达对胃肠道间质瘤诊断、危险性分级的评估价值[J]. 湖南师范大学学报(医学版), 2021, 18(6): 232-236.
- [37] 陶怡, 王威东, 谢芳, 等. 胃间质瘤超声内镜特征与术前恶性潜能评估的相关性研究[J]. 中国社区医师, 2023, 39(22): 72-75.
- [38] Khalaf, K., Terrin, M., Jovani, M., Rizkala, T., Spadaccini, M., Pawlak, K.M., *et al.* (2023) A Comprehensive Guide to Artificial Intelligence in Endoscopic Ultrasound. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 3757. <https://doi.org/10.3390/jcm12113757>
- [39] Liu, J., Ren, J., Xu, X., Xiong, L., Peng, Y., Pan, X., *et al.* (2022) Ultrasound-Based Artificial Intelligence in Gastroenterology and Hepatology. *World Journal of Gastroenterology*, **28**, 5530-5546. <https://doi.org/10.3748/wjg.v28.i38.5530>
- [40] Huang, J., Fan, X. and Liu, W. (2023) Applications and Prospects of Artificial Intelligence-Assisted Endoscopic Ultrasound in Digestive System Diseases. *Diagnostics*, **13**, Article 2815. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172815>
- [41] 王卓然, 张贤达, 曹羽成, 等. 基于超声内镜影像组学和机器学习的胃肠道间质瘤与非胃肠道间质瘤鉴别方法[J]. 海军军医大学学报, 2024, 45(1): 21-28.
- [42] Yang, X., Wang, H., Dong, Q., Xu, Y., Liu, H., Ma, X., *et al.* (2021) An Artificial Intelligence System for Distinguishing between Gastrointestinal Stromal Tumors and Leiomyomas Using Endoscopic Ultrasonography. *Endoscopy*, **54**, 251-261. <https://doi.org/10.1055/a-1476-8931>
- [43] Dong, Z., Zhao, X., Zheng, H., Zheng, H., Chen, D., Cao, J., *et al.* (2024) Efficacy of Real-Time Artificial Intelligence-Aid Endoscopic Ultrasonography Diagnostic System in Discriminating Gastrointestinal Stromal Tumors and Leiomyomas: A Multicenter Diagnostic Study. *E Clinical Medicine*, **73**, Article 102656. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2024.102656>
- [44] Zhu, C., Hua, Y., Zhang, M., Wang, Y., Li, W., Ding, Y., *et al.* (2022) A Multimodal Multipath Artificial Intelligence System for Diagnosing Gastric Protruded Lesions on Endoscopy and Endoscopic Ultrasonography Images. *Clinical and*

- Translational Gastroenterology*, **14**, e00551. <https://doi.org/10.14309/ctg.0000000000000551>
- [45] Minoda, Y., Ihara, E., Komori, K., Ogino, H., Otsuka, Y., Chinen, T., *et al.* (2020) Efficacy of Endoscopic Ultrasound with Artificial Intelligence for the Diagnosis of Gastrointestinal Stromal Tumors. *Journal of Gastroenterology*, **55**, 1119-1126. <https://doi.org/10.1007/s00535-020-01725-4>
 - [46] Lu, Y., Wu, J., Hu, M., Zhong, Q., Er, L., Shi, H., *et al.* (2023) Artificial Intelligence in the Prediction of Gastrointestinal Stromal Tumors on Endoscopic Ultrasonography Images: Development, Validation and Comparison with Endosonographers. *Gut and Liver*, **17**, 874-883. <https://doi.org/10.5009/gnl220347>
 - [47] Lu, Y., Chen, L., Wu, J., Er, L., Shi, H., Cheng, W., *et al.* (2023) Artificial Intelligence in Endoscopic Ultrasonography: Risk Stratification of Gastric Gastrointestinal Stromal Tumors. *Therapeutic Advances in Gastroenterology*, **16**, Article 17562848231177156. <https://doi.org/10.1177/17562848231177156>
 - [48] Seven, G., Silahtaroglu, G., Kochan, K., Ince, A.T., Arici, D.S. and Senturk, H. (2021) Use of Artificial Intelligence in the Prediction of Malignant Potential of Gastric Gastrointestinal Stromal Tumors. *Digestive Diseases and Sciences*, **67**, 273-281. <https://doi.org/10.1007/s10620-021-06830-9>