[41] Lee K, Maeng K J, Kim J Y, et al. Diagnostic ability of vessel density measured by spectral-domain optical coherence tomography angiography for glaucoma in patients with high myopia[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 3027.
[42] Kim J H, Yoon J, Na K I, et al. Association of peripapillary arterial circle of zinn-haller with glaucoma in highly myopic eyes[J]. J Glaucoma, 2025, 34(3): 205-215.
[43] Hwang H S, Lee E J, Kim J A, et al. Influence of choroidal microvasculature dropout on progressive retinal nerve fibre layer thinning in primary open-angle glaucoma: Comparison of parapapillary β-zones and γ-zones[J]. Br J Ophthalmol, 2024, 108(3): 357-365.

收稿日期：2025-09-06
（本文编辑：方能）

人工智能辅助结直肠镜技术研究现状与展望

罗佳燕，宋皓军，於愉皓，王布江

【摘要】 人工智能（AI）辅助结直肠镜技术是基于深度卷积神经网络的新兴技术，随着相关研究发展，AI辅助系统在提高结直肠腺瘤检出率、改善诊断准确性和优化检查质量方面的临床价值被逐步发现。本综述旨在系统总结AI辅助结直肠镜技术的最新研究进展，探讨当前技术面临的关键问题，为临床应用推广和结直肠镜技术优化提升提供科学依据。

【关键词】 人工智能；结直肠镜；计算机辅助肠镜；腺瘤检出率；息肉检测
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.04.028
【中图分类号】 R44　**【文献标志码】** C　**【文章编号】** 1671-0800(2026)04-0456-05

结直肠癌（colorectal cancer，CRC）是全球最常见的恶性肿瘤之一，具有高发病率和死亡率，对人类健康构成严重威胁[1]。CRC 早期通常缺乏明显的临床症状，导致多数患者确诊时已进展至晚期，此时治疗的选择受限且预后较差[2]。结直肠镜检查是 CRC 筛查和诊断的“金标准”，但仍存在漏诊率高、依赖内镜医师经验等问题 [3]。人工智能（artificial intelligence，AI）在胃肠内镜领域的发展为解决上述问题带来了新的机遇。本文旨在系统回顾 AI 辅助系统在肠息肉检测与切除中的应用现状，分析其在提高检出率、预测组织学类型及评估恶变风险等方面的临床价值，为相关研究和临床实践提供参考依据。

1　AI 辅助结直肠镜技术的研究现状

1.1　AI辅助系统在结直肠镜检查中的应用　AI辅助系统与结直肠镜光学图像相结合，通过机器学习和深度学习算法将结直肠镜图像与检测和诊断标准进行关联，从而训练系统识别肠黏膜变化。目前主要有以下几种类型：计算机辅助检测（computer-aided detection，CADe）、计算机辅助诊断（computer-aided diagnosis，CADx）和计算机辅助质量评估（computer-aided quality assessment，CAQ）。

1.2　CADe　CADe 可对结直肠镜检查中的视频流进行实时分析，通过 AI 辅助，有效降低结直肠病变的漏诊率，尤其是形态学特征不典型的微小息肉、扁平病变以及锯齿状腺瘤等容易被忽视的病变类型[4]。

Shaukat 等[5]在随机对照试验中发现，CADe 能将＜ 5 mm 的微小息肉的检出率相对提高 20%，5 ～ 9 mm 病变检出率相对提高 29%。2024 年，Norwood 团队在通过倾向评分匹配分析发现，CADe 可使腺瘤检出率（adenoma detection rate，ADR）提升 1.26 倍，无蒂锯齿状息肉检出率提升 1.79 倍，总体息肉检出率相对提升了 49%（61.3% *vs* 41.2%，P ＜ 0.05），并观察到 CADe 组检测到息肉的平均大小更小（3.9 mm *vs* 4.4 mm，P ＜ 0.05）[6]。Kamba 等[7]首次证实了 CADe 将腺瘤漏检率（adenoma miss rate，AMR）从 36.7%显著降低至 13.8%，无蒂锯齿状病变的漏检率也观察到类似趋势。

CADe 在非理想检查条件下还发挥了关键的

作者单位： 315211 宁波，宁波大学医学部（罗佳燕，於愉皓）；宁波大学附属第一医院（宋皓军，王布江）
通信作者： 王布江，Email：wangbujiang@126.com

“安全网”和质量保障作用。在肠道准备不充分的情况下，CADe 可将息肉检出率（polyp detection rate，PDR）及 ADR 分别提升 4.34 倍和 2.9 倍[6]。当退镜时间不足 6 min 时，CADe 能够显著提升 ADR（36.1% *vs* 26.6%）、晚期腺瘤检出率（9.8% *vs* 4.4%）以及无蒂锯齿状病变检出率（3.3% *vs* 1.9%），弥补因操作时间仓促导致的质量缺陷[8]。此外，传统结直肠镜 ADR 操作者经验水平的影响，CADe 弥补了这方面的缺陷，尤其在经验较少的医师中更为显著，有助于缩小操作者技术差异，并提升结肠镜检查质量[9]。

CADe 不仅在操作层面有效弥补了因检查条件不佳或医师经验差异所导致的诊断质量波动，而且在疾病防控层面，通过提升微小、扁平及锯齿状病变等检出率，增强对 CRC 的早期防控能力。从长远来看，CADe 的发展不应止步于“看见更多”，更应与其他技术如 CADx、CAQ 等相结合，联系病理预测和个体化风险模型，为医师提供是否干预以及如何干预的科学依据。

1.2.2　CADx　CADx 的目标是通过“光学活检”帮助医师在结直肠镜检查中即时区分腺瘤性与非腺瘤性病变[10]。该系统利用大量经病理确认的息肉图像和视频进行训练，使其能够识别息肉表面结构、血管模式及色彩等特征[11]。CADx 可实时处理内镜视频流，在 0.5 s 内完成图像分析与特征提取，并将病变分类结果及预测置信度直观显示于监视器上[12]。Mori 团队[13]研究表明，基于窄带成像（narrow band imaging，NBI）的 CADx 对增生性和腺瘤性息肉实时鉴别敏感性达 96.4%，特异性达 93.2%，总体准确率达 94.8%，完全符合美国胃肠内镜学会提出“诊断并离开”策略准确率（≥90%）的要求。Kim 等[11]研究表明，CADx 的诊断准确率为 93%，与资深内镜专家 94%的水平无明显差异，这显示出 CADx 具备专家级诊断能力。Li 等[14]研究发现，CADx 在不同经验水平医师间具有较高诊断一致性，初学者在 CADx 系统辅助下的准确率与资深医师相当，均高于 92%。有研究对 2 695 个≤5 mm 息肉进行分析，发现 CADx 在保持高敏感性（90.8%）的同时，显著提升了诊断特异性（64.7% *vs* 59.5%，$P < 0.05$）。该优势具有明确的临床应用价值：其显著提高了“切除与丢弃”（88.2% *vs* 86.1%）及“原位保留”（49.5% *vs* 47.9%）管理策略的息肉占比（均 $P < 0.05$），为简化诊疗路径提供了客观依据[15]。传统结肠镜检查对息肉的判断依赖于医师主观经验及肉眼观察，易受个人经验、疲劳等影响，导致诊断一致性不足[16]。而 CADx 的应用有助于弥补这些局限，为术中决策提供客观、快速的参考依据。

CADx 系统通过实时客观的组织学预测，降低了医师对经验的依赖，减少不必要的息肉切除与病理检查，降低患者风险、节省医疗资源。该系统不仅能显著提升肠息肉良恶性判断的准确率，未来还可能通过精准评估病变分化程度与预测浸润深度，为内镜治疗方案的制定提供科学指导，从而推动结直肠病变诊疗向更加精准化、个体化发展。

1.2.3　CAQ　CAQ 通过自动分析内窥镜图像和运动轨迹，最大限度降低检查质量的个体差异，提高结直肠镜检查的标准化程度，从而提升 ADR，并增强医师操作技能[17]。

CADe 对息肉的检出效果受黏膜暴露质量的影响，在退镜仓促的肠段常出现漏检[18]。CAQ 系统可实现缓慢匀速退镜，提升对近端幽门皱襞、结肠弯曲部及直肠瓣观察的完整性，促进肠腔扩张和黏膜暴露，发现隐匿病灶[19]。Su 等[20]开发的自动结直肠镜质量控制系统作为 CAQ 的典型应用，在检测到不稳定或模糊帧时提供提示，指导操作者减速并重新检查相关区域。并在随机对照试验中发现，实验组的 ADR、PDR 等指标均显著高于对照组。Yao 等[21]研究发现，单独使用 CADe 时 ADR 从 14.76%升至 21.27%，单独使用 CAQ 时达到 24.54%，两者联合应用时 ADR 达 30.60%，且不延长退镜时间。此外，还发现 CADe 擅长检测微小腺瘤，而 CAQ 对识别发展期较晚且体积较大的腺瘤有独特作用；因此，CAQ 的独立或联合应用有望降低受检者未来发生 CRC 风险。

高质量肠道准备是结直肠镜检查成功的首要前提。临床上常用波士顿肠道准备量表（Boston bowel preparation scale，BBPS）评估，但其具有主观、回顾偏倚，对单个肠段局部区域内部清洁度异质性缺乏考量等局限。研究显示，BBPS 评分≥2 分时，直径＞5 mm AMR 为 5%；而 BBPS 评分=1 分时，AMR 升至 16%[22]。2024 年开发了一种 AI 手机应用程序，用于 CAQ 在检查前辅助优化肠道准备。该软件通过粪

便图像训练，将粪便分为三类（固体/泥状、浑浊水样、清澈液体），识别准确率分别为 90.2%、65.0%和89.3%。在前瞻性验证中，在该应用指导下 99%参与者 BBPS 评分≥6 分，为结直肠镜检查的顺利展开提供基础条件[23]。

AI 在结直肠镜领域的角色，正从单一的“辅助诊断工具”演进为全流程的“质量控制核心”。CAQ 系统的核心价值，不在于发现息肉，而在于对检查的源头和操作过程两大变量实现标准化，从而最大程度减少因人为因素导致的检查质量波动。未来研究可着重于验证基于 AI 的质控指标（如黏膜暴露时间、稳定帧比率）与肠癌长期结局的关联，并探索其在医师技能培训中的应用价值，最终推动 CRC 的防治水平。

2 AI 辅助结直肠镜技术面临的关键问题

2.1 技术层面 当前 AI 模型的开发主要依赖欧美地区大型医疗中心的数据集，这直接导致其在病变识别上存在明显偏倚。对于欧美人群中常见的隆起型病变，模型能保持较高的敏感性和特异性，但对于亚洲人群中更为普遍的平坦型、凹陷型病变，其识别效率显著降低[24]。而这种性能局限不仅体现在人群差异上，还会因设备不同而加剧。当模型在特定品牌内镜的图像数据集上训练后，切换到其他品牌的内镜系统，其识别能力往往会大幅下降，这一现象被称为领域漂移或泛化能力不足。究其原因：不同品牌内镜在成像原理、光学设计、图像传感器、图像处理算法及光源上存在差异，让模型难以适配新设备的图像特征，最终导致跨品牌识别时性能滑坡[25]。

2.2 临床应用层面 面对一些非典型病变和微小病变，AI 辅助结直肠镜检查仍具有明显局限性。由于训练数据集中无蒂锯齿状腺瘤/息肉图像数量不足，现有多数 CADx 仅支持腺瘤和非腺瘤的基本分类，对无蒂锯齿状息肉和癌症的识别准确率未达预期[26]。且 CADx 技术对直径＜ 3 mm 息肉的诊断准确性明显降低，限制了其在早期病变筛查中的应用价值[16]。

值得一提的是，CADx 系统主要依赖静态图像分析，在动态内窥镜检查环境中则需要借助虚拟染色内镜或细胞内镜等辅助技术才能有效运行，对图像质量和操作条件都有严格要求[27]。为确保诊断准确性，临床操作需严格遵循缓慢移动内镜、将病变置于图像中央、清除黏液覆盖并保持最佳聚焦的标准化流程[28]。这使得在实际操作中，为了确保 AI 判读的准确性，内镜操作者需克服因轻微震动、视野变化及照明波动等带来的影响，这可能会分散内镜医师注意力，反而增加息肉漏诊或误判的临床风险。

近期随机对照试验显示，使用 CADe 时，每例结肠镜的假阳性数量（26 ～ 27 次）远高于最初报告的数据（0.07 ～ 0.2 次）。深入分析其原因：假阳性主要源于残留结肠液、结肠皱襞阴影等内镜检查中常见的影像伪影 [29]。值得注意的是，CADe 的高假阳性率，叠加其对 ADR 的提升多依赖于微小息肉和增生性息肉的检出，而这类不必要息肉的切除，会增加肠穿孔、消化道出血等并发症的发生风险[30-31]。

2.3 社会伦理层面 AI 模型训练和优化需依托海量医疗数据，其中包括患者的内镜图像、临床诊断、病理结果等敏感信息。尽管研究者对数据进行匿名化处理，但完全去除可识别信息和防止逆向识别仍是个技术难题。此外，AI 模型可能会放大训练数据中隐含的性别、种族、经济等偏倚。若用于训练的数据无法充分代表所有目标人群，模型在临床应用中便难以普遍适配，从而导致表现不佳，甚至加剧医疗的不公平性[32]。随着 AI 辅助技术的成熟，其在临床决策中的角色正从辅助工具演变成自主性更高的决策支持系统，这可能增加医生对 AI 辅助系统的依赖。当 AI 模型带来不良后果时，导致医生、技术研发方、医疗机构间的责任界定边界模糊。而当下监管远滞后于技术，相关的法律法规、行业规矩都尚不健全，存在空白。尤其是 AI 辅助系统参与诊疗决策，既没有明确的准入门槛，也没有具体的风险管控办法，更没有清晰的责任划分标准，AI 辅助系统从研发到临床应用全流程难以起到有效的约束作用。

2.4 其他 AI 辅助结直肠镜技术的开展、部署及维护需投入高昂成本，还需持续保障技术更新与人员培训的资金支持。这使得该技术可能因经济条件限制，在基层医疗机构难以普及，进而加剧区域间的医疗差距。尽管，相关技术的展开需要大量成本支出，但 Areia 等[33]通过大规模微观模拟研究发现，CADe 的广泛应用在下降美国 CRC 发病率和病死率的同时，为美国医疗支出节省 2.9 亿美元。并且 CADe 技

术显著降低中晚期癌症发生率，可有效减少后续外科手术、化学治疗及姑息治疗等高成本医疗干预需求，优化医疗资源配置，实现医疗体系经济效益的可持续发展。

3　展望

未来 AI 在结直肠镜领域的发展，应围绕“技术突破-临床落地-规范保障”三维协同推进。在技术层面：首先，加强国际协作以打破地域、种族壁垒，推动构建覆盖大区域乃至全球范围的内镜图像数据集。该数据集需具备高度包容性与多样性，通过多中心联合采集、标准化标注，实现高质量医疗数据的共建共享，尤其需补充亚洲人群高发的平坦型、凹陷型病变样本，解决数据代表性不足的问题。其次，在模型开发初期，研究者需采用更先进的算法架构与训练策略，通过数据增强、对抗性学习等手段模拟不同人群、设备的图像特征差异，减少因数据偏倚导致的性能波动。深度学习算法的决策过程因难以被人类逻辑所理解被称之为“黑箱”问题。这种不透明性不仅降低了医师对其诊断结果的信任度，更关键的是，当 AI 给出错误诊断时，医师难以追溯问题根源，也无法从中开展有效的经验性学习。未来可重点探索可视化模型，并构建深度学习与传统医学知识相融合的混合模型，让模型的决策逻辑更贴合临床医师的实际诊疗思维。

在 AI 的推动下，结直肠镜技术正朝着机器人化操作与分子级 AI 辅助的方向快速发展。下一代融入智能机器人技术的内镜系统有望实现实时分析画面，自动找到回盲瓣，完成无人为干预的盲肠插管。同时，集成的微力传感器可在毫秒级感知组织硬度，有效区分正常粘膜和息肉基底，把穿孔风险降到临床可忽略的水平。AI 辅助系统也正通过多模态信息融合，即虚拟染色与放大、基因特征预测及数字病理整合一体化，使 5 mm 以下的扁平腺瘤也能被即时标记，并直接给出是否需要切除或靶向治疗的建议。

AI 辅助结直肠镜技术在投入临床前，需要经过多重严格的临床验证，以确保其安全性和有效性。目前，大规模、多中心、前瞻性对照实验的数据仍较有限。建议加大相关项目资金支持，推动更多高质量、多中心实验开展，并鼓励专家制定标准化评估体系与指南，提升研究结果的有效性和可靠性。

AI 在推动结直肠镜医疗领域高效发展的同时，也引发了医师过度依赖的担忧。医者需理性看待这一问题，AI 辅助虽能提升检测精度、效率并优化医疗流程，但过度依赖其标记，易削弱医师独立观察、思考与鉴别诊断能力，导致专业技能退化。这警示医者：可通过实行“AI 初筛+医师复核”流程、建立常态化培训考核机制、保留医师修正标注权限等措施，明确以医师为诊疗决策主体、AI 仅作辅助参考的责任划分，进而构建科学的人机协作模式。AI 绝非可独立运作的“超人”，而是深度融入医师工作流程、提供决策支持的“额外大脑”，实现人机优势互补，才能更好地保障诊疗质量。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参　考　文　献

[1] Song J H, Kim E R. Strategies to improve screening colonoscopy quality for the prevention of colorectal cancer[J]. Korean J Intern Med, 2024, 39(4): 547-554.

[2] Hu R Y, Qiu Y T, Liu D A, et al. Advances in intestinal flora for the development, diagnosis and treatment of CRC[J]. Front Microbiol, 2025, 16: 1495274.

[3] Labaki C, Uche-Anya E N, Berzin T M. Artificial intelligence in gastrointestinal endoscopy[J]. Gastroenterol Clin North Am, 2024, 53(4): 773-786.

[4] Soons E, Rath T, Hazewinkel Y, et al. Real-time colorectal polyp detection using a novel computer-aided detection system (CADe): A feasibility study[J]. Int J Colorectal Dis, 2022, 37(10): 2219-2228.

[5] Shaukat A, Lichtenstein D R, Somers S C, et al. Computer-aided detection improves adenomas per colonoscopy for screening and surveillance colonoscopy: A randomized trial[J]. Gastroenterology, 2022, 163(3): 732-741.

[6] Norwood D A, Thakkar S, Cartee A, et al. Performance of computer-aided detection and quality of bowel preparation: A comprehensive analysis of colonoscopy outcomes[J]. Dig Dis Sci, 2024, 69(10): 3681-3689.

[7] Kamba S, Tamai N, Saitoh I, et al. Reducing adenoma miss rate of colonoscopy assisted by artificial intelligence: A multicenter randomized controlled trial[J]. J Gastroenterol, 2021, 56(8): 746-757.

[8] Djinbachian R, Taghiakbari M, Calce S I, et al. Withdrawal time, CADe and adenoma detection: A prospective study[J]. Gut, 2025: gutjnl-gu2025-335380.

[9] Sinonquel P, Eelbode T, Pech O, et al. Clinical consequences of computer-aided colorectal polyp detection[J]. Gut, 2024, 73(12): 1974-1983.

[10] Kato S, Kudo S E, Minegishi Y, et al. Impact of computer-aided characterization for diagnosis of colorectal lesions, including sessile

serrated lesions: Multireader, multicase study[J]. Dig Endosc, 2024, 36(3): 341-350.

[11] Kim J H, Park S C, Kim H S. Role of artificial intelligence in improving quality of colonoscopy[J]. Taehan Sohwagi Hakhoe Chi, 2025, 85(2): 137-145.

[12] Hassan C, Balsamo G, Lorenzetti R, et al. Artificial intelligence allows leaving-In-situ colorectal polyps[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2022, 20(11): 2505-2513.e4.

[13] Mori Y, Kudo S E, Misawa M, et al. Real-time use of artificial intelligence in identification of diminutive polyps during colonoscopy: A prospective study[J]. Ann Intern Med, 2018, 169(6): 357-366.

[14] Li J W, Wu C C H, Lee J W J, et al. Real-world validation of a computer-aided diagnosis system for prediction of polyp histology in colonoscopy: A prospective multicenter study[J]. Am J Gastroenterol, 2023, 118(8): 1353-1364.

[15] Rex D K, Bhavsar-Burke I, Buckles D, et al. Artificial intelligence for real-time prediction of the histology of colorectal polyps by general endoscopists[J]. Ann Intern Med, 2024, 177(7): 911-918.

[16] El Zoghbi M, Shaukat A, Hassan C, et al. Artificial intelligence-assisted optical diagnosis: A comprehensive review of its role in leave-In-situ and resect-and-discard strategies in colonoscopy[J]. Clin Transl Gastroenterol, 2023, 14(10): e00640.

[17] Lwin W P, Ichimasa K, Kudo S E, et al. Clinical significance of computer-aided quality assessment systems in colonoscopy: A comprehensive review[J]. Clin Endosc, 2025, 58(5): 638-645.

[18] 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.e8.

[19] Rex D K, Schoenfeld P S, Cohen J, et al. Quality indicators for colonoscopy[J]. Gastrointest Endosc, 2015, 81(1): 31-53.

[20] Su J R, Li Z, Shao X J, et al. Impact of a real-time automatic quality control system on colorectal polyp and adenoma detection: A prospective randomized controlled study (with videos)[J]. Gastrointest Endosc, 2020, 91(2): 415-424.e4.

[21] Yao L W, Zhang L H, Liu J, et al. Effect of an artificial intelligence-based quality improvement system on efficacy of a computer-aided detection system in colonoscopy: A four-group parallel study[J]. Endoscopy, 2022, 54(8): 757-768.

[22] Calderwood A H, Jacobson B C. Comprehensive validation of the Boston bowel preparation scale[J]. Gastrointest Endosc, 2010, 72 (4): 686-692.

[23] Inaba A, Shinmura K, Matsuzaki H, et al. Smartphone application for artificial intelligence-based evaluation of stool state during bowel preparation before colonoscopy[J]. Dig Endosc, 2024, 36 (12): 1338-1346.

[24] Yamada M, Saito Y, Yamada S, et al. Detection of flat colorectal neoplasia by artificial intelligence: A systematic review[J]. Best Pract Res Clin Gastroenterol, 2021, 52/53: 101745.

[25] Park J, Hwang Y, Kim H G, et al. Reduced detection rate of artificial intelligence in images obtained from untrained endoscope models and improvement using domain adaptation algorithm[J]. Front Med, 2022, 9: 1036974.

[26] Misawa M, Kudo S E, Mori Y, et al. Characterization of colorectal lesions using a computer-aided diagnostic system for narrow-band imaging endocytoscopy[J]. Gastroenterology, 2016, 150(7): 1531-1532.e3.

[27] Cherubini A, Dinh N N. A review of the technology, training, and assessment methods for the first real-time AI-enhanced medical device for endoscopy[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10(4): 404.

[28] Nagula S, Parasa S, Laine L, et al. AGA clinical practice update on high-quality upper endoscopy: Expert review[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2024, 22(5): 933-943.

[29] Hsieh Y H, Tang C P, Tseng C W, et al. Computer-aided detection false positives in colonoscopy[J]. Diagnostics (Basel), 2021, 11(6): 1113.

[30] ASGE Standards of Practice Committee, Fisher D A, Maple J T, et al. Complications of colonoscopy[J]. Gastrointest Endosc, 2011, 74 (4): 745-752.

[31] Hassan C, Spadaccini M, Iannone A, et al. Performance of artificial intelligence in colonoscopy for adenoma and polyp detection: A systematic review and meta-analysis[J]. Gastrointest Endosc, 2021, 93(1): 77-85.e6.

[32] Parate A P, Iyer A A, Gupta K, et al. Review of data bias in healthcare applications[J]. Int J Onl Eng, 2024, 20(12): 124-136.

[33] Areia M, Mori Y, Correale L, et al. Cost-effectiveness of artificial intelligence for screening colonoscopy: A modelling study[J]. Lancet Digit Health, 2022, 4(6): e436-e444.

收稿日期：2025-09-04

（本文编辑：方能）