

计算机辅助诊断(CADx)系统培训非肠镜专家

程卓*, 罗涛*, 程勇#

重庆医科大学附属第一医院胃肠外科, 重庆

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年4月24日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

结直肠癌筛查在早期发现和切除癌前腺瘤方面发挥着重要作用, 能够显著降低结直肠癌的发病率和死亡率。在结肠镜检查中, 大多数发现的息肉为小息肉或微小息肉, 其恶性病变的可能性较低。因此, 提出了“保留并观察”和“切除后丢弃”的策略, 以减少不必要的干预, 从而显著节省成本并提高诊疗效率。然而, 准确地鉴别诊断性能很困难, 尤其是非结肠镜专家, 其诊断准确性往往难以达到实施上述策略所需的标准, 导致这些策略在临床实践中未能广泛推广。因此, 对经验不足的结肠镜医生进行有效培训显得至关重要。本文综述了人工智能通过计算机辅助诊断(CADx)系统提高息肉诊断准确性的潜力, 并探讨了其在培训经验不足的结肠镜医生中的应用前景。回顾的多项研究表明, 尽管人工智能在结直肠息肉诊断中的表现不一定优于专家内镜医师, 但始终优于非专家结肠镜医师。人工智能系统可作为有效的辅助工具, 帮助提高内镜医师的光学诊断准确性和信心。虽然目前CADx系统尚未广泛应用于对非专家结肠镜医师的光学诊断培训, 但其展现出的潜力令人期待。

关键词

人工智能, 计算机辅助诊断, 结肠镜检查, 光学诊断, 内镜医师培训, 非专家结肠镜医师

Computer-Aided Diagnostic (CADx) Systems Train Non-Colonoscopy Specialists

Zhuo Cheng*, Tao Luo*, Yong Cheng#

Department of Gastrointestinal Surgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: Apr. 24th, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Colorectal cancer screening plays a vital role in the early detection and resection of precancerous

*共一作者。

#通讯作者。

文章引用: 程卓, 罗涛, 程勇. 计算机辅助诊断(CADx)系统培训非肠镜专家[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 3410-3419.
DOI: 10.12677/acm.2025.1541313

adenoma, which can significantly reduce the morbidity and mortality of colorectal cancer. During colonoscopy, most polyps found are microscopic polyps with a low likelihood of malignant lesions. Therefore, “keep and observe” and “discard after excision” are proposed to reduce unnecessary interventions, thereby significantly saving costs and improving the efficiency of diagnosis and treatment. However, accurate differential diagnostic performance is difficult, especially for non-colonoscopists, whose diagnostic accuracy often struggles to meet the standards required to implement the above strategies, failing these strategies to be widely generalized in clinical practice. Therefore, effective training of inexperienced colonoscopists is essential. This article reviews the potential of artificial intelligence to improve the accuracy of polyp diagnosis through computer-aided diagnosis (CADx) systems and discusses its application prospects in colonoscopists with little training experience. Multiple studies reviewed have shown that AI consistently outperforms non-expert colonoscopists in colorectal polyp diagnosis, although it does not necessarily perform better than expert endoscopists. Artificial intelligence systems can be used as an effective adjunct to help endoscopists improve the accuracy and confidence of their optical diagnosis. Although CADx systems are not yet widely used to train non-expert colonoscopists in optical diagnostics, the potential of the system is promising.

Keywords

Artificial Intelligence, Computer-Aided Diagnosis, Colonoscopy, Optical Diagnosis, Endoscopist Training, Non-Expert Colonoscopist

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

结直肠癌(CRC)是全球范围内极为重要的公共卫生问题,位列癌症发病率的第三位,同时也是导致癌症相关死亡的主要原因之一[1][2]。在过去 50 年中,结肠镜筛查通过早期发现并切除癌前腺瘤,显著降低了 CRC 的死亡率(降低了 51%)和发病率(降低了 32%) [3][4]。随着结肠镜检查技术的不断发展,小息肉(直径 <5 mm)的检出率显著提高,目前已占结肠镜检查中检出息肉的 60%。然而,这些小息肉很少会进展为高级别腺瘤性组织学,其恶变潜力极低[5][6]。尽管如此,目前的临床常规做法仍然是切除所有检出的息肉并进行组织学分析,这不仅增加了医疗成本,还加重了临床工作负担。为了应对这一挑战,美国胃肠内镜学会(ASGE)于 2011 年发布了 PIVI 文件,提出了旨在提高小结直肠息肉光学诊断准确性的节省成本策略[7]。在满足 ASGE 定义的特定质量指标的前提下,可采用“切除并丢弃”(切除但不进行组织学评估)和“诊断并保留”(不切除)的策略。如果能够有效实施这些策略,将显著减少送检组织学分析的标本数量,从而大幅降低医疗成本,减少患者因不必要的息肉切除术而面临的风险,并极大减轻结肠镜医师和病理医师的工作负担,节约宝贵的医疗资源[8][9]。然而,在将光学诊断纳入日常临床实践之前,确保其诊断质量是至关重要的[10]。一项针对 330 名胃肠病学家的调查结果显示,仅有 41.9%的胃肠病学家认为内镜医师可以仅通过内镜外观可靠地将息肉分类为腺瘤性或增生性,而仅有 40.3%的胃肠病学家愿意采用“诊断后保留”策略来处理他们认为是增生性的息肉[11]。因此,目前的标准治疗仍然是切除所有息肉并送病理学评估。目前的研究表明,窄带成像技术(NBI)在专家操作下可用于低风险息肉的诊断[12]。因此,对非专家结肠镜医师进行有效的光学诊断培训至关重要。然而,传统的培训方式依赖于大量经验丰富的导师,而这类专家往往数量有限,且专家指导的互动课程耗时且成本高昂。在非学术中心或

基层医疗机构, 获取高质量的导师资源非常困难, 教学效果也高度依赖于导师的经验和教学水平。基于计算机的培训方式可以通过静态图像或视频资料展示不同类型的息肉和病变, 并结合讲解帮助年轻医师学习光学诊断的要点, 适合自主学习, 但这种方式无法提供即时反馈, 年轻医师可能难以将理论与实际操作相结合, 且静态图像或视频无法完全模拟实际操作中的动态变化。因此, 迫切需要一种新的培训方法, 以有效提升年轻结肠镜医师的光学诊断能力。

计算机辅助诊断(CADx)是指使用图像分析算法对结直肠息肉进行光学诊断, 将其分类为肿瘤性或非肿瘤性病变。如果能够准确实现这种光学分类则可以在结肠镜检查中采用“切除并出院”和“诊断并保留”的策略[13]-[15]。根据最近发表的研究结果, CADx 系统可将息肉切除术和病理成本降低 80%以上[8] [16] [17]。目前已有大量研究证实, CADx 系统的光学诊断能力优于非专家结肠镜医师[15] [18]-[23], 且有研究表明, 在 CADx 系统的辅助下, 非专家结肠镜医师的光学诊断能力能够得到显著提升[24]。虽然 CADx 系统在临床应用中仍面临一些挑战, 如对训练数据的依赖性、算法的泛化能力以及临床应用的伦理问题等[25] [26], 但这些研究为利用 CADx 系统培训年轻结肠镜医师提供了可能性。

2. 现状

2.1. 结直肠息肉光学诊断

胃肠内镜检查是诊断和管理结直肠息肉的关键手段[27] [28]。随着技术的进步, 结肠镜医生如今可以借助高清内镜、放大内镜以及电子虚拟染色内镜等先进工具, 通过光学诊断准确预测结直肠病变的组织学特征。准确的光学诊断能够使小结直肠息肉(<5 mm)免于不必要的切除或活检, 不仅能避免手术风险, 还能显著降低医疗成本[29]。美国胃肠内镜学会(ASGE)和欧洲胃肠内镜学会(ESGE)的指南均认可了小息肉光学诊断的应用价值。ASGE 在其“保存和纳入有价值的内窥镜创新(PIVI)”建议中, 提出了实施光学诊断策略的具体标准: 当光学诊断与基于病理的监测间隔达到 90%一致性时, 可实施“切除并丢弃”策略; 而在对腺瘤进行诊断过程中, 达到 90%的阴性预测值(NPV)即可实施“诊断并观察”策略[7]。为了进一步提高对肿瘤性病变的识别能力, 多种增强成像技术应运而生, 例如窄带成像(NBI)、i-SCAN 和灵活光谱成像彩色增强(FICE)。这些增强成像技术通过不同的成像原理, 能够更清晰地展示息肉的微血管结构和表面特征, 从而帮助内镜医师更准确地进行光学诊断。例如, NBI 技术通过特定波长的光照射, 增强血管和黏膜表面的对比度, 使腺瘤性息肉的特征更加明显; i-SCAN 技术则通过电子染色的方式, 突出息肉的表面结构和血管模式; FICE 技术则可以根据不同的光谱特征, 对息肉进行实时的彩色增强, 从而提高诊断的准确性。一项最近研究表明, 这些技术, 尤其是 NBI 技术在预测腺瘤组织学的阴性预测值(NPV)方面表现优异, 其 NPV 超过了 90% [29] [30]。而, 尽管这些增强成像技术在专家手中表现出色, 但其应用范围仍受到限制。例如窄带成像(NBI)技术, 目前仅在专家操作下才达到对低风险息肉的进行光学诊断的要求。对于非专家结肠镜医师和基层结肠镜医生而言, 达到这一标准仍面临挑战。这一现状凸显了对新手结肠镜医生进行光学诊断培训的迫切需求。近年来的研究也逐渐开始探索将增强成像技术与 CADx 系统相结合的应用, 这种结合不仅能够充分利用增强成像技术的优势, 还能借助 CADx 系统的自动化分析能力, 为非专家内镜医师提供更有力的支持[15] [20]。

2.2. 非专家内镜医生的培训

光学诊断技术在结直肠息肉的管理中发挥着至关重要的作用, 然而, 非专家结肠镜医生在应用这些技术时却面临着诸多挑战。近年来, 窄带成像(NBI)、i-SCAN 和灵活光谱成像彩色增强(FICE)等增强成像技术不断涌现, 为结直肠息肉的光学诊断提供了有力支持。然而, 这些技术往往需要较高的操作经验和对图像特征的敏锐感知能力, 而非专家结肠镜医生往往在这两方面存在明显不足。因此, 非专家内镜医

生,尤其是基层结肠镜医生,往往难以达到与专家相当的诊断准确性。目前已经有许多关于非专家内窥镜医师的培训的研究[10][30]-[43]。

目前,已有多项研究致力于提升结肠镜医生的光学诊断水平。例如,Higashi 等人[32]采用传统的互动式教学方法,对肠镜医生进行关于白光肠镜、NBI 和染色肠镜的理论知识培训,以及 NBI 分类的实际操作指导。结果显示,经验不足的肠镜医生在培训后使用高倍 NBI (NBI-H)的诊断准确性显著提高,达到 90%,但仍低于经验丰富的结肠镜医生。此外,Ignjatovic 等人[10]基于 PowerPoint 开发了一种基于计算机的窄带成像(NBI)培训模块。该模块由五个部分组成,涵盖小结直肠息肉的临床意义、NBI 的基本原理、NBI 下的微血管可视化、腺瘤与增生性息肉的区分以及示例(含反馈机制)。培训中使用的图像均来自自己已有数据库,为 ≤ 10 毫米的息肉的非放大 NBI 图像。参与者在对图像进行光学分类后,经过 15 分钟的培训,再次完成光学分类。培训前,非专家肠镜医生的诊断准确率为 75%,新手为 62%;培训后,新手肠镜医生的诊断准确率提高至 84%,非专家肠镜医生提高至 90%,接近肠镜专家的水平。

传统的培训方式在很大程度上依赖于经验丰富的导师,而这类专家数量有限,难以满足广大非专家肠镜医生的培训需求。此外,专家指导的互动课程不仅耗时且成本高昂,其教学效果也高度依赖于导师的经验和教学水平。基于计算机的培训方式则通过静态图像或视频资料展示不同类型的息肉和病变,并结合讲解帮助年轻医师学习光学诊断的要点。但这种方式也存在明显不足,它无法提供即时反馈,难以帮助年轻医师将理论与实际操作相结合。

综上所述,现有的培训方式在提升非专家肠镜医生光学诊断能力方面虽有一定效果,但仍存在诸多局限性。因此,急需探索一种新的培训方法,以有效提升年轻结肠镜医师的光学诊断能力,满足临床实践的需求。

3. 计算机辅助诊断(CADx)系统

在结直肠息肉的光学诊断领域,计算机辅助诊断(CADx)系统作为一种新兴的技术手段,正逐渐展现出其独特的优势。CADx 系统主要基于内镜图像,通过图像处理、特征提取以及机器学习等先进技术,对息肉的性质进行精准识别与判断。因此,CADx 系统的准确性和可靠性高度依赖于训练数据的质量和数量。目前的研究多基于特定的图像数据库进行训练,这些数据可能无法完全覆盖临床实践中遇到的各种息肉类型和病变特征[25][26]。随着内镜技术的不断进步,CADx 系统日益完善。它通过分析息肉的形态、大小、颜色以及血管分布等多种关键特征,对内镜图像进行快速且准确地分析,为医生的光学诊断提供有力的参考依据。

在实际的临床诊断过程中,结肠镜医生在对息肉进行光学诊断时,往往会受到自身经验、情绪、疲劳等多种主观因素的影响,这在一定程度上可能会影响诊断的准确性。然而,CADx 系统则完全基于客观的图像数据和先进的算法进行分析,有效避免了主观因素的干扰,从而能够更加稳定地输出诊断结果。目前,一些先进的 CADx 系统在识别息肉的准确率上已经可以达到 90%以上[12][29][30]。随着临床数据量的不断增加以及算法的持续优化,CADx 的诊断准确性仍有很大的提升空间,未来有望为结直肠息肉的光学诊断提供更为精准、高效的支持。

3.1. 与非专家结肠镜医师对比

目前的研究表明,在息肉的光学诊断方面,CADx 系统相较于非专家内窥镜医师展现出显著优势。例如,Chen 等人[15]开发并测试了一种基于深度神经网络的计算机辅助诊断系统(DNN-CAD),用于分析窄带成像(NBI)下的微小结直肠息肉图像。研究结果显示,DNN-CAD 系统在诊断微小结直肠息肉时表现卓越,其准确率高达 90.1%,敏感性为 96.3%,特异性为 78.1%,阳性预测值(PPV)为 89.6%,阴性预测值

(NPV)为 91.5%。相比之下,新手内窥镜医生的诊断性能则明显低于 DNN-CAD 系统。新手医生的敏感性范围为 65.6%至 97.3%,特异性范围为 65.6%至 88.5%,准确率范围为 80.3%至 88.0%,NPV 范围为 68.5%至 84.0%。尽管部分新手医生在敏感性方面表现较好,但在特异性和准确率上仍与 DNN-CAD 系统存在显著差距。此外,DNN-CAD 系统的诊断时间仅为 0.45 秒,显著短于专家(1.54 秒)和新手(1.77 秒)所需的诊断时间。

Kudo 等人[20]通过多中心研究验证了一种名为 EndoBRAIN 的 AI 辅助系统在肠镜下识别结直肠肿瘤性病变的诊断准确性。研究中,EndoBRAIN 在染色内窥镜图像分析中,对肿瘤性病变的诊断敏感性高达 96.9%,特异性为 100%,准确性达 98%,阳性预测值(PPV)为 100%,阴性预测值(NPV)为 94.6%。这些指标均显著优于新手内窥镜医生的表现,甚至在某些方面超过了专家内窥镜医生。在 NBI 模式下,EndoBRAIN 系统的敏感性为 96.9%,特异性为 94.3%,准确性为 96.0%,PPV 为 96.9%,NPV 为 94.3%,显著高于新手医生,且与专家医生的表现相当。

此外,Gross 等人[23]通过前瞻性研究设计,纳入了 214 例接受窄带成像(NBI)放大肠镜检查的患者,共检测到 434 个直径 ≤ 10 mm 的结直肠息肉,并对其进行了组织学分析,同时评估了 CADx 系统、人类专家及新手医师在息肉分类中的诊断性能。研究结果显示,CADx 系统在诊断结直肠息肉时表现出色,其敏感性为 95.0%,特异性为 90.3%,准确性为 93.1%,与经验丰富的专家医师(敏感性 93.4%,特异性 91.8%,准确性 92.7%)相当,而显著优于新手医师(敏感性 86.0%,特异性 87.8%,准确性 86.8%)。此外,研究还对直径 ≤ 5 mm 的息肉进行了亚组分析,结果显示 CADx 系统在这一亚组中的诊断性能与整体分析结果相似。

3.2. 对非专家结肠镜医师的帮助

在结直肠息肉光学诊断领域,CADx (计算机辅助诊断)系统正逐渐成为提升诊断准确性的重要工具,尤其在辅助非专家内窥镜医师方面,展现出广阔的应用前景。Cheng 等[24]研究者开发了一种基于白光成像(WLI)技术的 CADx 系统,专注于通过光学手段区分结直肠息肉的良恶性。研究结果显示,该 CADx 系统在区分新生物性与非新生物性息肉时,光学诊断准确率高达 84.49%,显著优于非专家内窥镜医师。更为关键的是,CADx 系统在提升内窥镜医师诊断能力方面表现出色。在 CADx 辅助下,内窥镜医师的诊断准确率从 68.84%显著提升至 77.49%,其中新手内窥镜医师的诊断能力提升最为显著。值得注意的是,在 CADx 辅助下,新手内窥镜医师的诊断准确率甚至超过了未接受辅助的初级和专家级内窥镜医师。这一结果表明,CADx 系统不仅在结直肠息肉的光学诊断中表现卓越,更能够显著提升新手内窥镜医师的诊断能力,使其诊断准确性接近甚至达到专家水平。

因此,这一研究能为 CADx 系统在非专家内窥镜医师培训中的应用提供了有力支持。通过 CADx 系统的辅助,新手内窥镜医师能够在短时间内获得显著的诊断能力提升,从而为结直肠息肉诊断技术的规范化和普及化提供了新的思路和方法。

3.3. CADx 系统提高非专家内镜医生光学诊断能力的原因分析

本综述对 CADx 系统相较于非专家内窥镜医师在息肉的光学诊断方面表现出显著优势,并能提高结肠镜医生诊断效果的原因进行了如下分析。

3.3.1. 增强内镜医生诊断信心

非专家内窥镜医师在面对息肉诊断时往往缺乏信心,尤其是在决定是否采用“留置原位”或“切除并丢弃”策略时。CADx 系统通过提供高置信度的诊断结果,显著增强了内窥镜医师的信心。例如,Barua 等人[44]的研究显示,使用 CADx 后,非专家内窥镜医师对息肉的高置信度诊断比例从 74.2%提升至

92.6%，这表明 CADx 能够帮助非专家更自信地进行光学诊断。

3.3.2. 标准化诊断

CADx 系统基于大量高质量的图像数据进行训练，能够提供标准化的诊断参考。这种标准化的诊断流程有助于减少因个人经验差异而导致的诊断偏差，尤其是在非专家内窥镜医师中。通过 CADx 的辅助，即使是经验不足的医师也能按照统一的标准进行诊断，从而提高整体诊断的准确性和一致性。

3.3.3. 减少主观因素干扰

非专家内窥镜医师在诊断过程中可能受到主观因素的影响，例如疲劳、经验不足或对复杂病变的误判。CADx 系统通过提供客观的诊断建议，减少了这些人为因素的干扰，从而提高了诊断的准确性和可靠性。例如，Hassan 等人[45]的研究显示，AI 辅助的光学诊断在非专家中的 NPV (阴性预测值)显著高于单独使用 AI 或非专家单独诊断的结果。

3.3.4. 高性能

CADx 系统通过高灵敏度和特异性检测，能够有效降低误诊风险。对于非专家内窥镜医师而言，误诊可能导致不必要的息肉切除或漏诊高风险病变。CADx 系统通过提供高置信度的诊断结果，帮助非专家减少误诊，从而提高整体诊断的安全性和有效性。例如，Barua 等人[46]的研究显示，CADx 系统的高特异性能够显著减少非专家的误诊率。

3.4. 应用场景

计算机辅助诊断(CADx)技术的快速发展为内窥镜医学领域带来了革命性的变革，尤其在培训年轻肠镜医生进行光学诊断方面展现出巨大的应用潜力。CADx 系统通过深度学习算法对大量内镜图像进行分析，能够实时识别并标记出潜在的病变区域，为医生提供辅助诊断建议。这一技术不仅能够提高诊断的准确性，还能为年轻医生提供直观的学习工具，加速其专业技能的提升。以下是对未来 CADx 系统在非专家结肠镜医生的培训模式的展望。

3.4.1. 实时图像分析与反馈

在肠镜检查过程中，CADx 系统能够实时处理内镜图像，快速识别息肉的形态、大小和位置，并通过高亮显示或标记的方式提醒年轻医生来避免因经验不足导致的漏诊或误诊。例如，当系统检测到一个微小息肉时，会立即提示其位置和可能的病理类型，帮助年轻医生在实际操作中更好地识别病变。

3.4.2. 模拟训练与案例学习

CADx 技术还可与虚拟内镜模拟器结合，为年轻医生提供模拟训练环境。通过模拟真实的肠镜检查场景，系统生成各种类型的息肉图像，并根据年轻医生的操作表现提供即时反馈和评分。这种模拟训练不仅能够帮助年轻医生熟悉肠镜操作流程，还能使其在无风险的环境中积累经验，提高对息肉的识别能力和诊断准确性。此外，CADx 系统还可以提供丰富的临床案例库，供年轻医生学习和参考，帮助其更好地理解不同息肉的光学特征和病理学意义。

3.4.3. 诊断结果对比与学习

在实际的肠镜检查中，CADx 系统能够将自身识别的息肉与年轻医生的诊断结果进行对比，并通过系统提供的详细解释和建议，促进其对光学诊断知识的深入理解。例如，当系统识别出一个早期腺瘤性息肉而年轻医生未能识别时，系统可以展示该息肉的光学特征、诊断依据以及相关的病理学知识，帮助年轻医生在实践中不断学习和进步。

3.4.4. 远程教学与专家指导

借助互联网技术, CADx 系统能够实现远程教学和专家指导功能。年轻医生可以通过网络将肠镜检查图像实时传输给经验丰富的专家, 同时 CADx 系统也会提供初步诊断建议。专家可以结合 CADx 的分析结果, 对年轻医生的操作进行点评和指导, 帮助其快速提升专业水平。这种远程教学模式不仅打破了地域限制, 还能充分利用专家资源, 为年轻医生提供更高效的学习机会。

4. 结论

随着人工智能技术的飞速发展, 计算机辅助诊断(CADx)系统在医学领域的应用逐渐受到关注, 尤其是在内镜医学中, 其对新手内窥镜医生在肠镜下进行息肉光学诊断的培训展现出巨大的潜力。本综述通过对现有研究的分析, 探讨了人工智能在这一领域的应用现状、优势以及未来发展方向。

人工智能在结直肠息肉光学诊断中的表现已显示出显著优于非专家内窥镜医生的诊断能力。例如, Chen 等人[15]的研究显示, 基于深度神经网络的 CADx 系统在诊断微小结直肠息肉时, 其准确率、敏感性和特异性均显著高于新手内窥镜医生。CADx 系统不仅能够为经验不足的医生提供可靠的诊断支持, 还能显著提升其诊断准确性, 减少误诊和漏诊的风险。

CADx 系统在培训新手内窥镜医生方面具有独特的优势。通过实时图像分析和反馈, 新手医生能够在实际操作中即时学习和调整诊断策略, 从而快速提升其光学诊断能力。AI 辅助的光学诊断能够显著提高非专家内窥镜医生的诊断准确率。此外, CADx 系统还能增强新手医生的诊断信心, 减少因经验不足而导致的主观误判。这种实时辅助功能极大提高了诊断的准确性和可靠性。

然而, 尽管 CADx 系统在光学诊断和培训方面展现出巨大的潜力, 其在临床应用中仍面临一些挑战。首先, CADx 系统的准确性和可靠性高度依赖于训练数据的质量和数量。目前的研究多基于特定的图像数据库进行训练, 这些数据可能无法完全覆盖临床实践中遇到的各种息肉类型和病变特征。因此, 未来需要进一步扩大训练数据集, 以提高系统的泛化能力和适应性。其次, CADx 系统的临床应用需要获得更广泛的验证和认可。尽管已有研究表明其在诊断性能上优于新手内窥镜医生, 但在实际临床环境中, 系统的稳定性和安全性仍需进一步评估。此外, CADx 系统的推广还需要解决技术成本、设备兼容性以及医生对新技术的接受度等问题。

综上所述, 人工智能通过 CADx 系统在培训新手内窥镜医生进行结直肠息肉光学诊断方面具有广阔的应用前景。其不仅能够显著提高新手医生的诊断准确性, 还能增强其诊断信心, 减少误诊风险。然而, 要实现 CADx 系统的广泛应用, 仍需进一步解决数据质量、技术成本和临床验证等问题。未来, 随着技术的不断进步和临床应用的逐步推广, CADx 系统有望成为内镜医学教育和临床实践中的重要工具, 为培养更多优秀的内镜医生提供有力保障。

参考文献

- [1] Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R.L., Torre, L.A. and Jemal, A. (2018) Global Cancer Statistics 2018: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **68**, 394-424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>
- [2] El Zoghbi, M., Shaikat, A., Hassan, C., Anderson, J.C., Repici, A. and Gross, S.A. (2023) Artificial Intelligence-Assisted Optical Diagnosis: A Comprehensive Review of Its Role in Leave-in-Situ and Resect-and-Discard Strategies in Colonoscopy. *Clinical and Translational Gastroenterology*, **14**, e00640. <https://doi.org/10.14309/ctg.0000000000000640>
- [3] Winawer, S.J., Zauber, A.G., Ho, M.N., O'Brien, M.J., Gottlieb, L.S., Sternberg, S.S., et al. (1993) Prevention of Colorectal Cancer by Colonoscopic Polypectomy. *New England Journal of Medicine*, **329**, 1977-1981. <https://doi.org/10.1056/nejm199312303292701>
- [4] Burke, C., Kaul, V. and Pohl, H. (2017) Polyp Resection and Removal Procedures: Insights From the 2017 Digestive

- Disease Week. *Gastroenterology & Hepatology*, **13**, 1-24.
- [5] Mota, J., Almeida, M.J., Martins, M., Mendes, F., Cardoso, P., Afonso, J., *et al.* (2024) Artificial Intelligence in Coloproctology: A Review of Emerging Technologies and Clinical Applications. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article 5842. <https://doi.org/10.3390/jcm13195842>
 - [6] Butterly, L.F., Chase, M.P., Pohl, H. and Fiarman, G.S. (2006) Prevalence of Clinically Important Histology in Small Adenomas. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **4**, 343-348. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2005.12.021>
 - [7] Rex, D.K., Kahi, C., O'Brien, M., Levin, T.R., Pohl, H., Rastogi, A., *et al.* (2011) The American Society for Gastrointestinal Endoscopy PIVI (preservation and Incorporation of Valuable Endoscopic Innovations) on Real-Time Endoscopic Assessment of the Histology of Diminutive Colorectal Polyps. *Gastrointestinal Endoscopy*, **73**, 419-422. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2011.01.023>
 - [8] Hassan, C., Pickhardt, P.J. and Rex, D.K. (2010) A Resect and Discard Strategy Would Improve Cost-Effectiveness of Colorectal Cancer Screening. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **8**, 865-869.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2010.05.018>
 - [9] Rex, D.K. (2009) Reducing Costs of Colon Polyp Management. *The Lancet Oncology*, **10**, 1135-1136. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(09\)70342-0](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(09)70342-0)
 - [10] Ignjatovic, A., Thomas-Gibson, S., East, J.E., Haycock, A., Bassett, P., Bhandari, P., *et al.* (2011) Development and Validation of a Training Module on the Use of Narrow-Band Imaging in Differentiation of Small Adenomas from Hyperplastic Colorectal Polyps. *Gastrointestinal Endoscopy*, **73**, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2010.09.021>
 - [11] Wadhwa, V., Alagappan, M., Gonzalez, A., Gupta, K., Brown, J.R.G., Cohen, J., *et al.* (2020) Physician Sentiment toward Artificial Intelligence (AI) in Colonoscopic Practice: A Survey of US Gastroenterologists. *Endoscopy International Open*, **8**, E1379-E1384. <https://doi.org/10.1055/a-1223-1926>
 - [12] Glover, B., Teare, J. and Patel, N. (2019) A Review of New and Emerging Techniques for Optical Diagnosis of Colonic Polyps. *Journal of Clinical Gastroenterology*, **53**, 495-506. <https://doi.org/10.1097/mcg.0000000000001222>
 - [13] Hann, A., Troya, J. and Fitting, D. (2021) Current Status and Limitations of Artificial Intelligence in Colonoscopy. *United European Gastroenterology Journal*, **9**, 527-533. <https://doi.org/10.1002/ueg2.12108>
 - [14] Rasouli, P., Dooghaie Moghadam, A., Eslami, P., *et al.* (2020) The Role of Artificial Intelligence in Colon Polyps Detection. *Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench*, **13**, 191-199.
 - [15] Chen, P., Lin, M., Lai, M., Lin, J., Lu, H.H. and Tseng, V.S. (2018) Accurate Classification of Diminutive Colorectal Polyps Using Computer-Aided Analysis. *Gastroenterology*, **154**, 568-575. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2017.10.010>
 - [16] Kandel, P. and Wallace, M.B. (2019) Should We Resect and Discard Low Risk Diminutive Colon Polyps. *Clinical Endoscopy*, **52**, 239-246. <https://doi.org/10.5946/ce.2018.136>
 - [17] Kessler, W., Imperiale, T., Klein, R., Wielage, R. and Rex, D. (2011) A Quantitative Assessment of the Risks and Cost Savings of Forgoing Histologic Examination of Diminutive Polyps. *Endoscopy*, **43**, 683-691. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1256381>
 - [18] Biffi, C., Salvagnini, P., Dinh, N.N., Hassan, C., Sharma, P., Antonelli, G., *et al.* (2022) Author Correction: A Novel AI Device for Real-Time Optical Characterization of Colorectal Polyps. *npj Digital Medicine*, **5**, Article No. 114. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00669-8>
 - [19] Baumer, S., Streicher, K., Alqahtani, S.A., Brookman-Amissah, D., Brunner, M., Federle, C., *et al.* (2023) Accuracy of Polyp Characterization by Artificial Intelligence and Endoscopists: A Prospective, Non-Randomized Study in a Tertiary Endoscopy Center. *Endoscopy International Open*, **11**, E818-E828. <https://doi.org/10.1055/a-2096-2960>
 - [20] Kudo, S., Misawa, M., Mori, Y., Hotta, K., Ohtsuka, K., Ikematsu, H., *et al.* (2020) Artificial Intelligence-Assisted System Improves Endoscopic Identification of Colorectal Neoplasms. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **18**, 1874-1881.e2. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2019.09.009>
 - [21] Min, M., Su, S., He, W., Bi, Y., Ma, Z. and Liu, Y. (2019) Computer-Aided Diagnosis of Colorectal Polyps Using Linked Color Imaging Colonoscopy to Predict Histology. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 2881. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39416-7>
 - [22] Taunk, P., Atkinson, C.D., Lichtenstein, D., Rodriguez-Diaz, E. and Singh, S.K. (2019) Computer-assisted Assessment of Colonic Polyp Histopathology Using Probe-Based Confocal Laser Endomicroscopy. *International Journal of Colorectal Disease*, **34**, 2043-2051. <https://doi.org/10.1007/s00384-019-03406-y>
 - [23] Gross, S., Trautwein, C., Behrens, A., Winograd, R., Palm, S., Lutz, H.H., *et al.* (2011) Computer-Based Classification of Small Colorectal Polyps by Using Narrow-Band Imaging with Optical Magnification. *Gastrointestinal Endoscopy*, **74**, 1354-1359. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2011.08.001>
 - [24] Cheng, Y., Li, L., Bi, Y., Su, S., Zhang, B., Feng, X., *et al.* (2024) Computer-Aided Diagnosis System for Optical Diagnosis of Colorectal Polyps under White Light Imaging. *Digestive and Liver Disease*, **56**, 1738-1745.

- <https://doi.org/10.1016/j.dld.2024.04.023>
- [25] Jaspers, T.J.M., Boers, T.G.W., Kusters, C.H.J., Jong, M.R., Jukema, J.B., de Groof, A.J., *et al.* (2024) Robustness Evaluation of Deep Neural Networks for Endoscopic Image Analysis: Insights and Strategies. *Medical Image Analysis*, **94**, Article ID: 103157. <https://doi.org/10.1016/j.media.2024.103157>
 - [26] Bian, H., Jiang, M. and Qian, J. (2023) The Investigation of Constraints in Implementing Robust AI Colorectal Polyp Detection for Sustainable Healthcare System. *PLOS ONE*, **18**, e0288376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288376>
 - [27] Siau, K., Cannatelli, R., Antonelli, G., Smith, S.C.L., Shivaji, U.N., Ghosh, S., *et al.* (2021) Training Methods in Optical Diagnosis and Characterization of Colorectal Polyps: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Endoscopy International Open*, **9**, E716-E726. <https://doi.org/10.1055/a-1381-7181>
 - [28] Bisschops, R., East, J.E., Hassan, C., Hazewinkel, Y., Kamiński, M.F., Neumann, H., *et al.* (2019) Correction: Advanced Imaging for Detection and Differentiation of Colorectal Neoplasia: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Guideline—Update 2019. *Endoscopy*, **51**, C6. <https://doi.org/10.1055/a-1074-5788>
 - [29] Abu Dayyeh, B.K., Thosani, N., Konda, V., Wallace, M.B., Rex, D.K., Chauhan, S.S., *et al.* (2015) ASGE Technology Committee Systematic Review and Meta-Analysis Assessing the ASGE PIVI Thresholds for Adopting Real-Time Endoscopic Assessment of the Histology of Diminutive Colorectal Polyps. *Gastrointestinal Endoscopy*, **81**, 502.e1-502.e16. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2014.12.022>
 - [30] Subramaniam, S., Hayee, B., Aepli, P., Schoon, E., Stefanovic, M., Kandiah, K., *et al.* (2019) Optical Diagnosis of Colorectal Polyps with Blue Light Imaging Using a New International Classification. *United European Gastroenterology Journal*, **7**, 316-325. <https://doi.org/10.1177/2050640618822402>
 - [31] Rogart, J.N., Jain, D., Siddiqui, U.D., Oren, T., Lim, J., Jamidar, P., *et al.* (2008) Narrow-Band Imaging without High Magnification to Differentiate Polyps during Real-Time Colonoscopy: Improvement with Experience. *Gastrointestinal Endoscopy*, **68**, 1136-1145. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2008.04.035>
 - [32] Higashi, R., Uraoka, T., Kato, J., Kuwaki, K., Ishikawa, S., Saito, Y., *et al.* (2010) Diagnostic Accuracy of Narrow-Band Imaging and Pit Pattern Analysis Significantly Improved for Less-Experienced Endoscopists after an Expanded Training Program. *Gastrointestinal Endoscopy*, **72**, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2010.01.054>
 - [33] Raghavendra, M., Hewett, D.G. and Rex, D.K. (2010) Differentiating Adenomas from Hyperplastic Colorectal Polyps: Narrow-Band Imaging Can Be Learned in 20 Minutes. *Gastrointestinal Endoscopy*, **72**, 572-576. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2010.03.1124>
 - [34] Coe, S.G., Thomas, C., Crook, J., Ussui, V., Diehl, N. and Wallace, M.B. (2012) Colorectal Surveillance Interval Assignment Based on *in Vivo* Prediction of Polyp Histology: Impact of Endoscopic Quality Improvement Program. *Gastrointestinal Endoscopy*, **76**, 118-125.e1. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2012.03.007>
 - [35] Rastogi, A., Rao, D.S., Gupta, N., Grisolano, S.W., Buckles, D.C., Sidorenko, E., *et al.* (2014) Impact of a Computer-Based Teaching Module on Characterization of Diminutive Colon Polyps by Using Narrow-Band Imaging by Non-Experts in Academic and Community Practice: A Video-Based Study. *Gastrointestinal Endoscopy*, **79**, 390-398. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2013.07.032>
 - [36] Sinh, P., Gupta, N., Rao, D.S., Wani, S., Sharma, P., Bansal, A., *et al.* (2014) Community Gastroenterologists Can Learn Diminutive Colon Polyp Histology Characterization with Narrow Band Imaging by a Computer-based Teaching Module. *Digestive Endoscopy*, **27**, 374-380. <https://doi.org/10.1111/den.12403>
 - [37] IJsspeert, J.E.G., Bastiaansen, B.A.J., van Leerdam, M.E., Meijer, G.A., van Eeden, S., Sanduleanu, S., *et al.* (2015) Development and Validation of the WASP Classification System for Optical Diagnosis of Adenomas, Hyperplastic Polyps and Sessile Serrated Adenomas/polyps. *Gut*, **65**, 963-970. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2014-308411>
 - [38] Sikong, Y., Lin, X., Liu, K., Wu, J., Lin, W., Wei, N., *et al.* (2016) Effectiveness of Systematic Training in the Application of Narrow-Band Imaging International Colorectal Endoscopic (NICE) Classification for Optical Diagnosis of Colorectal Polyps: Experience from a Single Center in China. *Digestive Endoscopy*, **28**, 583-591. <https://doi.org/10.1111/den.12600>
 - [39] Basford, P., Longcroft-Wheaton, G., Higashi, R., Uraoka, T. and Bhandari, P. (2016) Colonic Lesion Characterisation Skills among UK Endoscopists and the Impact of a Brief Training Intervention. *Frontline Gastroenterology*, **8**, 2-7. <https://doi.org/10.1136/flgastro-2016-100689>
 - [40] Aihara, H., Kumar, N. and Thompson, C.C. (2018) A Web-Based Education Program for Colorectal Lesion Diagnosis with Narrow Band Imaging Classification. *Digestion*, **98**, 11-18. <https://doi.org/10.1159/000486481>
 - [41] Bae, J.H., Lee, C., Kang, H.Y., Kwak, M., Doo, E.Y., Seo, J.Y., *et al.* (2019) Improved Real-Time Optical Diagnosis of Colorectal Polyps Following a Comprehensive Training Program. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **17**, 2479-2488.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2019.02.019>
 - [42] Basford, P., Brown, J., Cooper, S. and Bhandari, P. (2019) Endoscopic Characterization of Small Colonic Polyps: Baseline Performance of Experienced Endoscopists Is No Different to That of Medical Students. *Endoscopy International*

-
- Open*, **7**, E403-E411. <https://doi.org/10.1055/a-0751-2613>
- [43] Smith, S.C.L., Saltzman, J., Shivaji, U.N., Lethebe, B.C., Cannatelli, R., Ghosh, S., *et al.* (2019) Randomized Controlled Study of the Prediction of Diminutive/Small Colorectal Polyp Histology Using Didactic versus Computer-Based Self-learning Module in Gastroenterology Trainees. *Digestive Endoscopy*, **31**, 535-543. <https://doi.org/10.1111/den.13389>
- [44] Barua, I., Wieszczy, P., Kudo, S., Misawa, M., Holme, Ø., Gulati, S., *et al.* (2022) Real-Time Artificial Intelligence-Based Optical Diagnosis of Neoplastic Polyps during Colonoscopy. *NEJM Evidence*, **1**, 401-405. <https://doi.org/10.1056/evidoa2200003>
- [45] Hassan, C., Balsamo, G., Lorenzetti, R., Zullo, A. and Antonelli, G. (2022) Artificial Intelligence Allows Leaving-In-Situ Colorectal Polyps. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, **20**, 2505-2513.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2022.04.045>
- [46] Li, J.W., Wu, C.C.H., Lee, J.W.J., Liang, R., Soon, G.S.T., Wang, L.M., *et al.* (2023) Real-World Validation of a Computer-Aided Diagnosis System for Prediction of Polyp Histology in Colonoscopy: A Prospective Multicenter Study. *American Journal of Gastroenterology*, **118**, 1353-1364. <https://doi.org/10.14309/ajg.0000000000002282>