

人工智能在经内镜逆行胰胆管造影术中的应用进展

张贯军, 孟科, 李明阳

解放军总医院第一医学中心消化内科医学部, 北京 100853

摘要:以深度学习、计算机视觉等技术为核心的人工智能正在渗透经内镜逆行胰胆管造影术(endoscopic retrograde cholangiopancreatography, ERCP)的全流程:整合影像与实验室数据,精准把控手术必要性及风险分层;实时分析胆道镜或透视图像,准确识别恶性狭窄、定位壶腹、预警困难插管等,显著降低ERCP操作难度与辐射剂量;高效预测术后胰腺炎、胆管炎等并发症,实现个体化治疗。人工智能已显示出超越传统手段的诊断精度、优于经验的预测效能以及缩短学习曲线的培训优势。未来生成式对抗网络可能更为高效地合成高质量ERCP影像,为零风险训练与罕见病例数据扩增提供“数字胶片库”。

关键词:人工智能;深度学习;经内镜逆行胰胆管造影术;胆管疾病;术后并发症

中图分类号:R657.4

文献标志码:A

文章编号:2095-5227(2025)11-1095-08

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25102903

引用本文:张贯军,孟科,李明阳.人工智能在经内镜逆行胰胆管造影术中的应用进展[J].解放军医学院学报,2025,46(11):1095-1102.

Advances in artificial intelligence in endoscopic retrograde cholangiopancreatography

ZHANG Guanjun, MENG Ke, LI Mingyang

Department of Gastroenterology and Hepatology, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: LI Mingyang. Email: mingyangli_pla@163.com

Abstract: Artificial intelligence, centered on technologies such as deep learning and computer vision, is permeating every stage of endoscopic retrograde cholangiopancreatography (ERCP). It integrates imaging and laboratory data to precisely assess procedural necessity and stratify risk; analyzes real-time cholangioscopy or fluoroscopy images to accurately identify malignant strictures, locate the ampulla, and warn of difficult cannulation, thereby significantly reducing ERCP procedural difficulty and radiation dose; and efficiently predicts postoperative complications such as pancreatitis and cholangitis, enabling individualized treatment. AI has already demonstrated diagnostic accuracy surpassing that of traditional methods, predictive performance superior to experiential judgment, and training advantages in shortening the learning curve. In the future, generative adversarial networks may more efficiently synthesize high-quality ERCP images, providing a "digital film library" for zero-risk training and data augmentation of rare cases.

Keywords: artificial intelligence; deep learning; endoscopic retrograde cholangiopancreatography; biliary tract diseases; postoperative complications

Cited as: Zhang GJ, Meng K, Li MY. Advances in artificial intelligence in endoscopic retrograde cholangiopancreatography [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(11): 1095-1102.

经内镜逆行胰胆管造影术(endoscopic retrograde cholangiopancreatography, ERCP)自1968年首次报道以来,已从胰胆管疾病的单纯诊断技术发展为集诊断与治疗于一体的核心干预手段,广泛应用于胰胆管结石、良恶性胰胆管狭窄和十二指肠乳头病变等疾病^[1-2]。尽管ERCP技术不断成熟,仍面临三大核心临床挑战:(1)诊断准确性受限,胆管狭窄诊断中20%性质未定,传统刷检细胞学和钳夹活检的敏感性较低,良恶性鉴别困

难直接影响治疗决策、患者预后;(2)操作技术难度高,十二指肠乳头识别偏差、选择性插管失败等问题导致约20%的胆总管结石患者无法一次性清除,尤其在解剖变异或肝胆胰外科手术后的患者中操作难度显著增加,甚至无法顺利完成ERCP;(3)术后并发症风险突出,其中术后胰腺炎发生率达3%~10%,尤其老年患者一旦发生术后胰腺炎,重症率、病死率较高,而现有风险评估体系难以实现精准预判。这些临床挑战在基层医疗机构尤为突出,是制约ERCP同质化发展的关键因素^[2-4]。

人工智能是模拟人类智能的技术体系,其在医学领域的应用以机器学习为核心支撑。机器学

收稿日期:2025-10-29

基金项目:省部级课题

第一作者:张贯军,硕士,主治医师。Email: zgjpopod@163.com

通信作者:李明阳,博士,主任医师。Email: mingyangli_pla@163.com

com

习依托特定算法对海量数据进行深度挖掘,从中识别潜在规律与关联模式,并基于这些发现持续优化预测模型的性能,使其能更精准地对未知数据做出判断。作为机器学习的重要分支,深度学习通过构建人工神经网络模拟人类大脑中神经元间的突触连接方式,形成具备多层结构的计算框架,该框架可直接对原始数据(如未经预处理的医学影像图片)进行分析,自主完成从基础特征到高阶抽象特征的多层级提取过程,无需人工干预,其中应用较多的模型包括卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、循环神经网络、Transformer模型和生成式对抗网络等^[5-6]。在ERCP领域,人工智能技术的发展可分为3个阶段:(1)早期以传统机器学习为主,聚焦单一临床数据指标的风险预测;(2)中期则是随着深度学习技术成熟,开始探索内镜影像图片的计算机辅助识别;(3)目前进入多模态融合早期阶段,整合影像、电子病历等多维数据实现精准决策支持,跨模态注意力、动态缺失值插补是ERCP领域未来方向。随着CNN等深度学习算法的迭代及算力提升,人工智能在ERCP中的应用场景不断拓展,并由单中心探索正迈向临床验证阶段,形成术前风险评估、术中实时辅助及术后并发症监控的全周期技术支撑体系^[7-9]。

1 人工智能辅助ERCP诊断

胆管狭窄的性质判定是ERCP诊断的核心任务之一,直接决定治疗策略选择,但传统ERCP+刷检/活检敏感性不足50%,一直是临床难题。数字单操作者胆道镜(digital single-operator cholangioscopy, DSOC)可实现胆管病变的直视观察,提高了可视化诊断能力,但仍存在观察者间差异大、特异性不高等问题,且其引导活检的敏感性不足80%^[3-4]。AI通过深度学习算法分析胆道镜影像特征,实现了狭窄性质的客观量化评估。

Saraiva等^[10]率先用近8.5万张DSOC静态图训练CNN,用于诊断恶性胆管狭窄(malignant biliary stricture, MBS),受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUROC)为0.92。Mascarenhas等^[11]将样本扩大至来自多中心的9.6万帧视频,ResNet-CNN以365fps实时运行,敏感性91.7%、特异性94.4%,AUROC升至0.95。Robles-Medranda团队^[12]利用CNN模型对90例完整胆道镜录像进行分析,诊断

敏感性97.7%、准确性96.7%,近端病变AUROC达0.99,显著优于共聚焦显微内镜和直视印象。Pereira等^[13]聚焦于“肿瘤血管”这一关键恶性征象,仅用6475帧即训练出AUROC=1.00的专用CNN,但该研究为单中心小样本,且无外部验证。4项研究共同证实:基于DSOC的深度学习模型无论静态帧或动态视频,均把MBS诊断准确率从传统刷检的50%左右提升至90%以上,并能在像素级定位肉眼易漏的微小血管异常。但这些模型均沿用“静态帧+单中心标注”模式,缺乏视频时序、动态造影及临床变量融合。

Zhang等^[14]回顾性纳入2012—2021年3家中心的9380张DSOC图像,并前瞻性收集2021—2022年29例实时视频,构建一套可解释人工智能系统MBSDeiT。该系统先以DeiT视觉Transformer自动筛选并验证低质量帧,再用同架构病灶识别模型对MBS进行帧级与视频级诊断。内部验证、外部验证及前瞻性验证帧级AUROC分别为0.971、0.978与0.976,视频级敏感性和特异性达92.3%与87.5%。MBSDeiT诊断准确性高93.0%,高于资深专家(88.6%, $P < 0.001$)。该研究率先实现“先质控-后诊断”的端到端可解释工作流,为DSOC提供高于传统ERCP取样技术的精准、稳定且通用的人工智能解决方案。

Marya等^[15-18]在MBS的人工智能辅助诊断上进行深入研究,先是回顾性收集两家医疗中心236例胆道镜图像/视频,由资深专家逐帧标注“高质量-恶性/良性/可疑、低质量、无信息”5类标签,用于训练CNN模型。将模型前瞻性地应用于32例预留胆道镜视频进行帧间900帧滑动窗口分析,CNN视频级诊断MBS的敏感性为0.933(95% CI: 0.681 ~ 0.998)、特异性为0.882(95% CI: 0.636 ~ 0.985)、准确性为0.906(95% CI: 0.750 ~ 0.980)。随后该团队将该CNN模型直接应用于美国3家学术中心未经剪辑112例完整胆道镜视频(约482万张静态帧,其中61例为胆道狭窄),进行多中心外部验证。模型的敏感性为0.800,特异性为0.903,准确性为0.852及AUROC为0.945,均高于刷检细胞学、钳夹活检以及两者联合。该胆道镜智能系统模型无需再训练即可在3家中心、不同术者、含支架相关黏膜改变的真实场景中维持高性能,且平均每例分析仅需约18 min视频,故智能模型具有较高的临床可行性和应用价值。该研究团队又利用胆道刷检全切片图像(共487张)训练开发病理切

片“双模块”智能系统：检测模块先筛选并高亮标记25个最可疑的256×256细胞图像块，后由专家判读；诊断模块则整个切片直接进行“阳性/阴性”二元判读。较传统专家盲读，检测模块辅助专家、诊断模块完全自主判读均提高了诊断敏感性，但诊断特异性、准确性无显著差异。人工智能模型优先关注的恶性特征与病理专家一致，能在3~5 min完成全片筛查，在不损失准确性的前提下提升敏感性，显著提高初筛效率。人工智能模型已将DSOC诊断MBS的准确率提升至90%以上，并在多中心、完整视频与病理切片等实际临床场景中保持高敏感性与特异性。先质控后诊断、帧-视频-病理多模态融合的可解释工作流程，已具备直接嵌入临床路径、实时指导治疗决策的可行性与通用性。

2 人工智能在ERCP操作环节的技术辅助

2.1 十二指肠壶腹识别与定位

十二指肠壶腹(ampulla of Vater, AOV)是胆总管与胰管在十二指肠内侧壁汇合后形成的共同通道结构，是ERCP插管必须准确进入壶腹，故AOV的精准识别是ERCP成功的前提，尤其在解剖变异、肝胆胰外科手术或肠道准备不佳的情况下，AOV定位难度增大，易出现偏差^[19]。人工智能基于深度学习的目标检测算法，可实现AOV的自动识别、定位及插管难度预测。

Kim等^[20]回顾性利用2016—2018年两家中心531例ERCP视频，开发和验证一套基于CNN的人工智能辅助框架，实现像素级软掩膜定位AOV和术前预测插管难易度。该框架前瞻性应用于451幅十二指肠胃镜图像，并与4位有5—20年ERCP操作经验的内镜医师的人工标注进行比较。AOV定位性能：平均交并比(即目标检测中衡量预测框与真实框重叠程度的指标)为0.641，精确率为0.762，召回率(即衡量模型找出所有真实目标的能力的指标)为0.784，质心距离(即目标检测任务中用于衡量预测框与真实框中心点之间距离的一种误差指标)为0.021，均优于内镜专家。插管难易度分类性能ResNet最优：插管难易度二分类(简单插管/困难插管)：“简单”类召回率为0.719、F1值(即精确率和召回率的调和平均数，用来综合评估模型的性能)为0.757，“困难”类召回率为0.611、F1值为0.553，宏观F1值为0.665、准确率为0.695；四分类(简单/插管时间>5 min/需附加技术/失败)：宏

观F1值为0.429，准确率为0.667；对“需附加技术”类的召回率为0.564，提示模型可提前预警复杂插管。热力图显示模型聚焦于壶腹周围皱襞、膨出形态及上缘皱褶等内镜下与插管难度密切相关的解剖特征。该人工智能系统在不依赖昂贵像素级标注的情况下，实现与内镜专家相当的壶腹定位精度，并可提前识别高难插管病例，有望减少插管时间、降低并发症。但这项研究仅是概念验证，仅证明了人工智能辅助壶腹定位的可行性，在数据规模、模型鲁棒性、动态信息利用(即ERCP动态视频信息)等方面仍有明显短板，真正落地临床应用还需更大规模、前瞻性、多中心的研究支持。

此外，十二指肠乳头病变作为一种消化系统罕见疾病，疾病早期特异性症状或体征不明显，晚期患者治愈率和生存率较低，现有内镜检查与活检手段难以满足精准且便捷的诊断需求，是当前消化内科研究热点^[19,21]。高光谱成像技术能够捕捉组织特有的生化特征生成光谱信息，可精准区分病灶情况，相关技术已在肺癌、结直肠癌等疾病的诊断中得到应用验证，开发CNN模型结合高光谱成像技术可能推动十二指肠乳头病变识别规范化评估，降低十二指肠乳头腺瘤与腺癌病变漏诊率，但目前仍处在初期探索阶段^[22-23]。

2.2 插管难度预测与实时引导

困难插管是指在ERCP过程中，无法在规定时间内(通常为5 min)或需多次尝试、更换器械或采用救援技术(如预切开、胰管导丝辅助等)才能成功进入胆管或胰管的情况。一次性胆管插管的成功率直接影响ERCP疗效，而插管难度受乳头形态、胆管解剖、操作者经验等多重因素影响^[24-25]。困难插管是术后胰腺炎(post-ERCP pancreatitis, PEP)等并发症的重要独立危险因素。人工智能通过整合术前影像与术中实时数据，可实现插管难度的精准预测与操作引导。

Huang等^[25]基于深度学习技术开发了一套智能胆总管结石ERCP取出术难度评分与辅助系统(difficulty scoring and assistance system, DSAS)，并在多中心回顾性研究中验证其性能。DSAS通过D-LinkNet34与U-Net级联网络，对一帧静态胆道造影X线图像进行像素级分割，自动识别并测量结石大小、数量、远端胆总管直径、成角及长度等关键参数，为内镜医师提供术中实时信息，进而依据专家共识构建的评分标准预测ERCP技术难

度。DSAS的平均交并比分别为结石68.35%、胆总管86.42%、十二指肠镜95.85%；DSAS系统在结石与胆总管直径估算上的平均相对误差显著低于非专家内镜医师；系统给出的难度评分与专家一致性高(Kappa值=0.740)，优于非专家医师(0.315~0.429)；DSAS评分 ≥ 2 者，结石清除率显著降低，需要更多机械碎石与EPLBD干预。该团队之后又开展了一项多中心、前瞻性观察研究，验证DSAS计算机辅助系统在ERCP术中评估胆总管结石取出技术难度的有效性，纳入173例患者，结果显示，智能系统判断为“困难”的病例，其结石取出尝试次数更多(7.20 vs 4.20, $P < 0.001$)，机械碎石使用率更高(30.4% vs 7.1%, $P < 0.001$)，单次清除率低(73.9% vs 94.5%, $P < 0.001$)，总清除率低(89.1% vs 97.6%, $P = 0.019$)，且取石时间和总手术时间均显著延长。系统预测与临床实际高度一致，且不良事件发生率仅为1.7%^[26]。DSAS系统可实时、客观地量化评估ERCP取石难度，辅助术者制定个性化治疗策略，为术者选择合适的操作策略和器械提供可靠依据，有助于提升手术效率、降低风险，尤其对经验不足者具有重要指导价值。

2.3 优化造影成像区域

传统透视的入射束与散射辐射随操作时间和剂量递增，是皮肤损伤甚至职业性癌症的重要隐患。现行防护措施(铅衣、脉冲透视、缩短时间等)依赖术者主观意识和经验，执行率差异大，且无法动态优化剂量分布^[27]。将人工智能技术整合于内镜透视系统，可在不降低图像质量的前提下，使患者剂量面积乘积降低和术者散射剂量减少。Bang等^[28]开展了一项前瞻性单中心对照研究，比较传统透视与集成智能透视系统在ERCP等内镜诊疗中的辐射剂量。人工智能系统通过CNN实时识别兴趣区(region of interest, ROI)，并以超快次级准直器将X线束限定于ROI，背景区域仅周期性(1s/帧)低剂量刷新以维持解剖参照。共100例患者交替进入传统组与人工智能组，两组患者在一般情况、术式及透视时间上无差异。患者的剂量面积乘积中位数由5 708 mGy·cm²降至2 178 mGy·cm² ($P < 0.001$)，术者散射剂量(深部当量)由0.69 mSv降至0.28 mSv，降幅59.4%。多元线性回归表明，人工智能系统与透视时长是剂量面积乘积的独立影响因子；且ROI自动识别成功率为96%，图像质量无差异，无相关不良事件。该研究首次证实，人工智能引导的ROI准直透视可在不损失图像质

量的前提下显著降低患者及医护人员的电离辐射暴露，为“尽可能低”原则提供了自动化、零学习曲线的技术路径。

3 人工智能在ERCP围手术期管理中的应用

3.1 术前风险分层与个体化方案制定

ERCP兼有胆管疾病诊断和治疗价值，但约10%的患者会出现术后并发症，且ERCP费用较高，在超声内镜时代应仅用于“高概率获益”患者。相关指南虽提出ERCP风险分层，却缺乏精准量化工具，在无超声内镜时代可导致约30%的ERCP为非必要操作，或遗漏需治疗的患者，目前仍可导致约15%的ERCP非必要操作^[29]。既往预测模型几乎均采用Logistic回归，假定变量-结局为线性关系，而胆总管结石等疾病的发生涉及多因素交互(炎症、解剖变异等)，传统方法难以捕捉非线性及高阶交互效应，机器学习或深度学习模型可更准确地进行风险分层，制定是否进一步ERCP治疗的个体化方案^[30-31]。

Steinway等^[32]回顾性分析两家医学中心的1 378例拟诊胆总管结石患者数据，采用梯度提升机(gradient boosting machine, GBM)开发并10折交叉验证一款机器学习预测模型。该GBM模型前瞻性对比了2019版美国胃肠内镜学会及欧洲胃肠内镜学会指南的推荐策略，结果显示，该模型仅依赖实验室与影像学8项常规变量(总胆红素、碱性磷酸酶、超声胆总管直径 > 6 mm、超声胆总管内高回声伴声影、急性胰腺炎、年龄、丙氨酸转氨酶、天冬氨酸转氨酶)，其敏感性为70.3%、特异性为72.3%、准确性为71.5%、AUROC为0.79，均显著优于指南；在避免22%的非必要ERCP的同时，补救了48%被指南错误拒绝的ERCP需求。Jovanovic等^[33]前瞻性纳入291例拟诊胆总管结石患者，以ERCP结石取出为“金标准”，比较人工神经网络与多变量Logistic回归模型对“需治疗性ERCP”的预测效能。人工神经网络仅利用腹部超声与生化常规指标进行训练与验证，其敏感性为92.7%、特异性为68.4%、AUROC为0.884(95% CI: 0.831~0.938)，优于传统模型。智能模型在前瞻性验证中将92%的结石患者准确划入高概率组，同时将70%的ERCP阴性患者正确排除，减少不必要的ERCP。仅基于常规临床数据构建的机器学习模型，对胆总管结石的风险分层显著优于传统指南规则和经典回归模型，与内镜专家决策逻辑高

度一致但精度更高,尤其能捕捉细微实验室与影像联合特征,为实时、个体化ERCP决策提供了可解释的人工智能工具。

3.2 术后并发症预测与早期干预

目前临床上采用ERCP手术治疗最常见的疾病是胆总管结石和恶性胆总管狭窄,术后并发症是导致ERCP手术失败的最主要原因,早期预测与干预可显著改善预后。传统预测模型多依赖单一临床指标,准确性有限,而人工智能通过整合多模态数据可实现术后并发症的精准预测。

Fu、Jin、Zhu等^[34-36]3个研究团队分别聚焦恶性胆道梗阻患者ERCP支架后的“PEP”“术后胆管炎”两大并发症和“30天死亡”风险,均采用回顾性大样本建模、前瞻性(或随机预留)外部验证的设计,以常规临床和实验室数据为核心,开发出可解释、可床旁即时调用的机器学习模型,其中PEP模型的核心指标为急性胰腺炎病史、无胰管扩张、非胰腺来源肿瘤、困难插管、胰管注射,术后胆管炎模型的核心指标为射频消融、白细胞数 $>7.46\times 10^9/L$ 、中度黄疸、血淀粉酶 $>405 U/L$,30天死亡风险模型的核心指标为远处转移、总胆红素、术后并发症、成功引流。3个模型的AUROC分别为0.810、0.727和0.919,诊断性能全面优于传统单指标判断或临床经验。

Wang等^[37]回顾性纳入2 247例胆总管结石完全清除病例,利用25项临床常规参数构建并外部验证针对PEP的机器学习模型。随机森林算法在内部测试集AUROC达0.947,显著优于极端梯度提升树等5种算法;在12家外部中心(674例)平均AUROC仍超过0.75。模型识别的4个关键变量包括插管困难、胰腺炎病史、女性、胆总管直径较小,均与PEP发生显著相关。Park和Rodrigues-Pinto等^[38-39]则分别利用大样本数据对既有PEP预测模型进行改进,前者增加了低-中-高危风险分组,后者在原模型基础上增加了术中变量(即插管和操作变量)并开发了网页小程序。机器学习模型给出的个体化概率估计在敏感性、特异性及临床可解释性上全面超越现行相关指南和术者经验,尤其能识别主观评估易遗漏的高危细节(如既往PEP、术中出血等)。仅基于常规临床信息的人工智能模型即可显著降低风险分层误差,为术前分配高年资内镜医师、强化预防策略或延长留观时间提供量化依据。

针对ERCP罕见并发症-低氧血症的风险预测,

Kang等^[40]回顾性提取6 114例ERCP麻醉与临床数据,开发并验证可解释逻辑回归与GBM两套模型;研究直接对比“传统经验评估”与“模型量化评分”的判别效能,逻辑回归模型测试AUROC为0.723,GBM模型达0.734,均显著优于临床单指标判断。基于16项术前常规指标(年龄 >74 岁、美国麻醉医师协会体格状况分级、超重、习惯性打鼾、胆总管结石、术前同日内镜、肌酐清除率、血管活性药使用等)的GBM模型,可将低氧风险从3%连续分层至13%,判别精度显著高于主观评估,尤其能捕捉肥胖、睡眠呼吸障碍、潜在肾功能减退等易被忽视的隐匿高危信号。

为每个ERCP术后并发症都开发一种机器学习预测模型,并不利于临床推广。本团队尝试研发一种针对全部ERCP术后并发症的风险模型,回顾性整合两家中心胆总管结石患者临床数据,在最终模型中纳入5项指标(Charlson合并症指数、天冬氨酸转氨酶、内镜下乳头大球囊扩张术、插管、多发巨大结石),建模组与验证组模型的AUROC分别达0.791(95% CI: 0.742 ~ 0.794)和0.876(95% CI: 0.793 ~ 0.879),敏感性分别为0.755和0.901,特异性分别为0.826和0.854^[41]。尽管该模型性能较好,需承认部分并发症病例数过少,导致其危险指标权重被弱化,泛化能力有限。但本研究证明该设想是可以实现的,未来需要纳入更多中心的更多病例。机器学习模型的发展可提早识别患者术后并发症风险,提醒尽早升级抗生素、预防性胰管支架、延迟手术或加强监护,低危患者避免过度干预,节约医疗资源;且机器学习模型仅依赖常规指标,无需额外设备或费用,利于推广^[42]。

人工智能模型凭常规指标即可在术前精准筛出“高获益”人群、术后提前锁定PEP等术后并发症高危患者,性能全面优于指南与经验。简易可操作的“床旁”的通用风险计算器正让ERCP决策从“经验驱动”迈入“量化-个体化”阶段。

4 未来展望

尽管人工智能在ERCP各环节应用初显锋芒,但数据异质性、标注标准化不统一、黑箱算法三大共性瓶颈制约其发展。多模态数据融合将成为人工智能在ERCP领域的核心发展方向,相较于胃肠镜,整个ERCP领域无公开基准数据集,标准化数据库共同建设是推动人工智能在ERCP领域发展

的关键因素，可解决数据异质性、标注无法统一问题。未来的人工智能系统将整合内镜影像、CT/MRI影像、电子病历、基因组数据及分子生物学指标，构建更全面的疾病预测模型。例如，对于恶性胆管狭窄患者，通过结合胆管影像特征、基因突变信息、肿瘤标志物等指标，进一步实现恶性风险的精准分层。对于容易漏诊的十二指肠乳头病变，可通过人工智能结合内镜下图像、高光光谱图像、实验室指标等，显著提高诊断准确性。目前的人工智能模型可解释性仍不够，仅停留在热力图、特征重要性条形图等初级可视化手段，难以转化为可操作的床旁指令，无法辅助医师快速据此调整治疗策略或评估风险，未来应加强可解释模型开发，既给出预测结果，又同时提供临床医生易懂证据的算法体系，如将模型热力图、SHAP值等抽象信号翻译成“该患者插管前需行乳头预切开、该患者胆总管成角小、结石直径大建议留置胆管支架预防术后胰腺炎”等可直接干预的明确指令。

作为“内镜上的皇冠”，ERCP技术复杂，操作难度大，年轻内镜医师的培训周期较长，传统“观摩—实践”模式受限于病例资源与师资力量，难以满足同质化培训需求。人工智能结合虚拟现实、增强现实等技术，可构建沉浸式、可重复的培训体系，显著缩短学习曲线。目前人工智能辅助技术已经成功应用于超声内镜培训中，人工智能辅助系统可在20 ms内给出镜位与解剖提示，将标准胰腺超声内镜流程划分为6个标准站次，并同步完成胰腺/腹主动脉/门脉汇合部的实时分割与站次识别，为高风险人群胰腺筛查和规范化培训提供了零患者风险的人工智能辅助导航平台^[43-45]。未来可进一步发展人工智能辅助ERCP操作系统，VR模拟训练系统通过高精度建模还原ERCP操作场景，包括十二指肠镜置入、乳头识别、插管造影等全流程操作，人工智能算法可实时捕捉操作者的手部动作、器械角度等参数，通过对比专家操作数据给出量化评分，并针对导丝位置或错误操作(如插管角度过大、造影剂注射过快)提供即时反馈。

ERCP视频为长程时序数据，但目前众多研究，仅利用静态图片信息，“实时智能识别”只能算“逐帧图像分类”，未用3D-CNN、Timesformer等时序建模。时序建模可进一步提升AUROC。生成对抗网络是一种由“生成器”和“判别器”双

网络组成的深度学习框架，作为影像合成引擎，将应用于ERCP领域，从真实ERCP影像中学习解剖与器械特征，进而合成高分辨率、解剖合理且肉眼难辨真假的模拟图像，可无限地生成带标注数据，不仅可用于教学培训和模型训练，同时实现零患者风险的“数字ERCP胶片库”，解决罕见病例数据稀缺问题^[46-47]。此外，生成式人工智能可模拟不同操作方案的治疗效果，如预测插管方式或取石方案对患者的术后影响，为个体化治疗提供参考。未来的人工智能系统不再是独立的辅助工具，而是与内镜医师深度协同的“智能伙伴”，人工智能系统实时提供患者手术相关信息，医师则聚焦于复杂决策与人文关怀，最大化保证疗效^[48]。

5 结语

人工智能通过深度学习、计算机视觉等核心技术，推动ERCP的诊断优化、围手术期管理、操作辅助、并发症防控等领域实现了跨越式进展，使得诊断敏感性和特异性突破传统取样瓶颈、ERCP困难插管难度降级，也让术后并发症风险在数秒内被量化。面对数据异质性与算法黑箱等挑战，需各医疗机构共建高质量数据库、制定可解释性标准，并开展前瞻性随机对照试验。人工智能已逐步成为贯穿“评估-操作-管理-培训”全链条的智能伙伴，未来将全方位重塑ERCP的临床实践模式。

作者贡献 张贯军：文章构思、撰写；孟科：审读和修订；李明阳：对文章内容作批判性审阅，并提供课题支持。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- 1 Cotton PB. ERCP [J]. *Gut*, 1977, 18 (4): 316-341.
- 2 陈德鑫, 翟亚奇, 李明阳, 等. 超高龄胆胰疾病患者应用ERCP诊治的策略综述 [J]. *解放军医学院学报*, 2024, 45 (2): 183-188.
- 3 Facciorusso A, Crinò SF, Gkolfakis P, et al. Correction: Diagnostic work-up of bile duct strictures: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Guideline [J]. *Endoscopy*, 2025, 57 (10): C17.
- 4 McCarty TR, Shah R, Allencherril RP, et al. The role of artificial intelligence combined with digital cholangioscopy for indeterminate and malignant biliary strictures: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. <https://doi.org/10.1097/mcg.0000000000002148>.
- 5 Wang HC, Fu TF, Du YQ, et al. Publisher Correction: Scientific discovery in the age of artificial intelligence [J]. *Nature*, 2023, 621 (7978): E33.

- 6 Liu SD, Russo C, Suero Molina E, et al. Artificial intelligence methods [M] //Computational Neurosurgery. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 21-38.
- 7 Araújo CC, Frias J, Mendes F, et al. Unlocking the potential of AI in EUS and ERCP: a narrative review for pancreaticobiliary disease [J]. *Cancers*, 2025, 17 (7): 1132.
- 8 Kuwahara T, Hara K, Mizuno N, et al. Current status of artificial intelligence analysis for the treatment of pancreaticobiliary diseases using endoscopic ultrasonography and endoscopic retrograde cholangiopancreatography [J]. *DEN Open*, 2024, 4 (1): e267.
- 9 Agudo Castillo B, Mascarenhas M, Martins M, et al. Advancements in biliopancreatic endoscopy: a comprehensive review of artificial intelligence in eus and ercp [J]. *Rev Esp Enferm Dig*, 2024, 116 (11): 613-622.
- 10 Saraiva MM, Ribeiro T, González-Haba M, et al. Deep learning for automatic diagnosis and morphologic characterization of malignant biliary strictures using digital cholangioscopy: a multicentric study [J]. *Cancers*, 2023, 15 (19): 4827.
- 11 Mascarenhas M, Almeida MJ, González-Haba M, et al. Artificial intelligence for automatic diagnosis and pleomorphic morphological characterization of malignant biliary strictures using digital cholangioscopy [J]. *Sci Rep*, 2025, 15 (1): 5447.
- 12 Robles-Medrandá C, Baquerizo-Burgos J, Puga-Tejada M, et al. Cholangioscopy-based convoluted neuronal network vs. confocal laser endomicroscopy in identification of neoplastic biliary strictures [J]. *Endosc Int Open*, 2024, 12 (10): E1118-E1126.
- 13 Pereira P, Mascarenhas M, Ribeiro T, et al. Automatic detection of tumor vessels in indeterminate biliary strictures in digital single-operator cholangioscopy [J]. *Endosc Int Open*, 2022, 10 (3): E262-E268.
- 14 Zhang X, Tang DH, Zhou JD, et al. A real-time interpretable artificial intelligence model for the cholangioscopic diagnosis of malignant biliary stricture (with videos) [J]. *Gastrointest Endosc*, 2023, 98 (2): 199-210.
- 15 Marya NB, Powers PD, Petersen BT, et al. Identification of patients with malignant biliary strictures using a cholangioscopy-based deep learning artificial intelligence (with video) [J]. *Gastrointest Endosc*, 2023, 97 (2): 268-278.
- 16 Marya NB, Hartley C, Powers PD, et al. Development of a computer-aided prediction tool for evaluating brushing samples of biliary strictures [J]. *Clin Gastroenterol Hepatol*, 2024, 22 (1): 185-187.
- 17 Marya NB, Powers PD, AbiMansour JP, et al. Multicenter validation of a cholangioscopy artificial intelligence system for the evaluation of biliary tract disease [J]. *Endoscopy*, 2026, 58 (1): 47-55.
- 18 Marya NB, Powers PD, Bois MC, et al. Utilization of an artificial intelligence-enhanced, web-based application to review bile duct brushing cytologic specimens: A pilot study [J]. *Cancer Cytopathol*, 2024, 132 (12): 779-787.
- 19 Chadalavada P, Shah TU. Updates in endoscopic management of ampullary and duodenal adenomas [J]. *Curr Opin Gastroenterol*, 2023, 39 (6): 496-502.
- 20 Kim T, Kim J, Choi HS, et al. Artificial intelligence-assisted analysis of endoscopic retrograde cholangiopancreatography image for identifying Ampulla and difficulty of selective cannulation [J]. *Sci Rep*, 2021, 11: 8381.
- 21 Vanbiervliet G, Strijker M, Arvanitakis M, et al. Endoscopic management of ampullary tumors: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Guideline [J]. *Endoscopy*, 2021, 53 (4): 429-448.
- 22 Oswald W, Browning C, Yasmin R, et al. Fluorescence excitation-scanning hyperspectral imaging with scalable 2D-3D deep learning framework for colorectal cancer detection [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 14790.
- 23 Ellebrecht DB. Hyperspectral imaging enables the differentiation of differentially inflated and perfused pulmonary tissue: a proof-of-concept study in pulmonary lobectomies for intersegmental plane mapping [J]. *Biomed Tech*, 2023, 68 (4): 421-426.
- 24 Keswani RN, Duloy A, Nieto JM, et al. Interventions to improve the performance of ERCP and EUS quality indicators [J]. *Gastrointest Endosc*, 2023, 97 (5): 825-838.
- 25 Huang L, Lu XY, Huang X, et al. Intelligent difficulty scoring and assistance system for endoscopic extraction of common bile duct stones based on deep learning: multicenter study [J]. *Endoscopy*, 2021, 53 (5): 491-498.
- 26 Huang L, Xu YM, Chen J, et al. An artificial intelligence difficulty scoring system for stone removal during ERCP: a prospective validation [J]. *Endoscopy*, 2023, 55 (1): 4-11.
- 27 Oh CH, Son BK. Minimizing radiation exposure in endoscopic retrograde cholangiopancreatography: a review for medical personnel [J]. *Korean J Intern Med*, 2022, 37 (6): 1111-1119.
- 28 Bang JY, Hough M, Hawes RH, et al. Use of artificial intelligence to reduce radiation exposure at fluoroscopy-guided endoscopic procedures [J]. *Am J Gastroenterol*, 2020, 115 (4): 555-561.
- 29 Mena-Camilo E, Salazar-Colores S, Aceves-Fernández MA, et al. Non-invasive prediction of choledocholithiasis using 1D convolutional neural networks and clinical data [J]. *Diagnostics*, 2024, 14 (12): 1278.
- 30 Bush N, Khashab M, Akshintala VS. Current and emerging applications of artificial intelligence (AI) in the management of pancreatobiliary (PB) disorders [J]. *Curr Gastroenterol Rep*, 2024, 26 (11): 304-309.
- 31 Doukas PG, Doukas SG, Broder A. The role of AI models in enhancing choledocholithiasis diagnosis: A systematic review and meta-analysis [J]. *Exp Ther Med*, 2025, 30 (6): 221.
- 32 Steinway SN, Tang BH, Telezing J, et al. A machine learning-based choledocholithiasis prediction tool to improve ERCP decision making: a proof-of-concept study [J]. *Endoscopy*, 2024, 56 (3): 165-171.
- 33 Jovanovic P, Salkic NN, Zerem E. Artificial neural network predicts the need for therapeutic ERCP in patients with suspected choledocholithiasis [J]. *Gastrointest Endosc*, 2014, 80 (2): 260-268.
- 34 Jin HW, Sun X, Fu C, et al. Machine learning-based prediction model for post-ERCP cholangitis in patients with malignant biliary obstruction: a retrospective multicenter study [J]. *Surg Endosc*, 2025, 39 (8): 5107-5126.
- 35 Fu ZF, Song JT, Pi YL, et al. A risk prediction model for post-endoscopic retrograde cholangiopancreatography pancreatitis after stent insertion for malignant biliary obstruction: development and validation [J]. *Dig Dis Sci*, 2023, 68 (4): 1574-1584.
- 36 Zhu ZD, Hu KX, Zhao FQ, et al. Machine learning-based nomogram for 30-day mortality prediction for patients with unresectable malignant biliary obstruction after ERCP with metal stent: a retrospective observational cohort study [J]. *BMC Surg*, 2023, 23 (1): 260.
- 37 Wang G, Sun QK, Zhu H, et al. Development and external validation of a model for post-endoscopic retrograde cholangiopancreatography pancreatitis [J]. *iScience*, 2025, 28 (6): 112570.

- 38 Park CH, Park SW, Lee KJ, et al. Prospective validation and revision of predictive models for post-ERCP pancreatitis: focus on procedure-related factors and a novel risk stratification approach [J]. *Surg Endosc*, 2025, 39 (2): 1207-1216.
- 39 Rodrigues-Pinto E, Morais R, Sousa-Pinto B, et al. Development of an online app to predict post-endoscopic retrograde cholangiopancreatography adverse events using a single-center retrospective cohort [J]. *Dig Dis*, 2021, 39 (3): 283-293.
- 40 Kang H, Lee B, Jo JH, et al. Machine-learning model for the prediction of hypoxaemia during endoscopic retrograde cholangiopancreatography under monitored anaesthesia care [J]. *Yonsei Med J*, 2023, 64 (1): 25-34.
- 41 Zhang GJ, Zhang GY, Meng K, et al. A risk score model for post-endoscopic retrograde cholangiopancreatography complications in elderly patients with choledocholithiasis [J]. *Saudi J Gastroenterol*, 2025, 31 (6): 347-355.
- 42 Akshintala VS, Khashab MA. Artificial intelligence in pancreaticobiliary endoscopy [J]. *J Gastroenterol Hepatol*, 2021, 36 (1): 25-30.
- 43 Wu HL, Yao LW, Shi HY, et al. Validation of a real-time biliopancreatic endoscopic ultrasonography analytical device in China: a prospective, single-centre, randomised, controlled trial [J]. *Lancet Digit Health*, 2023, 5 (11): e812-e820.
- 44 Zhang J, Zhu LR, Yao LW, et al. Deep learning - based pancreas segmentation and station recognition system in EUS: development and validation of a useful training tool (with video) [J]. *Gastrointest Endosc*, 2020, 92 (4): 874-885.
- 45 Yao LW, Zhang J, Liu J, et al. A deep learning-based system for bile duct annotation and station recognition in linear endoscopic ultrasound [J]. *EBioMedicine*, 2021, 65: 103238.
- 46 Ahmad OF, Stassen P, Webster GJ. Artificial intelligence in biliopancreatic endoscopy: Is there any role? [J]. *Best Pract Res Clin Gastroenterol*, 2021, 52/53: 101724.
- 47 孙磊, 汪安安, 张政波, 等. 大语言模型在临床医学领域的应用、挑战和展望 [J]. *解放军医学院学报*, 2025, 46 (1): 50-60.
- 48 Osagiede O, Wallace MB. The role of artificial intelligence for advanced endoscopy [J]. *Gastrointest Endosc Clin N Am*, 2025, 35 (2): 419-430.

(责任编辑: 孟晓彤)

(上接第1094页)

- 40 Xia C, Zeng ZY, Fang B, et al. Mesenchymal stem cell-derived exosomes ameliorate intervertebral disc degeneration via antioxidant and anti-inflammatory effects [J]. *Free Radic Biol Med*, 2019, 143: 1-15.
- 41 Yu YW, Li WT, Xian TH, et al. Human embryonic stem-cell-derived exosomes repress NLRP3 inflammasome to alleviate pyroptosis in nucleus pulposus cells by transmitting miR-302c [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24 (8): 7664.
- 42 Yuan XQ, Li TF, Shi L, et al. Human umbilical cord mesenchymal stem cells deliver exogenous miR-26a-5p via exosomes to inhibit nucleus pulposus cell pyroptosis through METTL14/NLRP3 [J]. *Mol Med*, 2021, 27 (1): 91.
- 43 Su KK, Yu DC, Cao XF, et al. Bone marrow mesenchymal stem cell-derived exosomes alleviate nuclear pulposus cells degeneration through the miR-145a-5p/USP31/HIF-1 α signaling pathway [J]. *Stem Cell Rev Rep*, 2024, 20 (8): 2268-2282.
- 44 Yuan QL, Wang XY, Liu L, et al. Exosomes derived from human placental mesenchymal stromal cells carrying AntagomiR-4450 alleviate intervertebral disc degeneration through upregulation of ZNF121 [J]. *Stem Cells Dev*, 2020, 29 (16): 1038-1058.
- 45 Hu YQ, Tao RY, Wang LF, et al. Exosomes derived from bone mesenchymal stem cells alleviate compression-induced nucleus pulposus cell apoptosis by inhibiting oxidative stress [J/OL]. <https://doi.org/10.1155/2021/2310025>.
- 46 Gao X, Jia S, Gao LF, et al. MSC-derived exosomes alleviate oxidative stress-induced lysosomal membrane permeabilization damage in degenerated nucleus pulposus cells via promoting m6A demethylation of Nrf2 [J]. *Free Radic Biol Med*, 2025, 235: 213-230.
- 47 Xu GY, Lu X, Liu SY, et al. MSC-derived exosomes ameliorate intervertebral disc degeneration by regulating the Keap1/Nrf2 axis [J]. *Stem Cell Rev Rep*, 2023, 19 (7): 2465-2480.
- 48 Li SX, Huang ZQ, Zhu YX, et al. Bromodomain-containing protein 7 regulates matrix metabolism and apoptosis in human nucleus pulposus cells through the BRD7-P13K-YAP1 signaling axis [J]. *Exp Cell Res*, 2021, 405 (2): 112658.
- 49 Lu K, Li HY, Yang K, et al. Exosomes as potential alternatives to stem cell therapy for intervertebral disc degeneration: in-vitro study on exosomes in interaction of nucleus pulposus cells and bone marrow mesenchymal stem cells [J]. *Stem Cell Res Ther*, 2017, 8 (1): 108.
- 50 周荣耀, 郭柱, 苏炜良, 等. 人尿源干细胞外泌体对退变髓核细胞生物学功能的影响 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020, 30 (5): 427-436.
- 51 Xing HY, Zhang ZJ, Mao QJ, et al. Injectable exosome-functionalized extracellular matrix hydrogel for metabolism balance and pyroptosis regulation in intervertebral disc degeneration [J]. *J Nanobiotechnology*, 2021, 19 (1): 264.
- 52 Li M, Li RY, Yang SD, et al. Exosomes derived from bone marrow mesenchymal stem cells prevent acidic pH-induced damage in human nucleus pulposus cells [J]. *Med Sci Monit*, 2020, 26: 922928.
- 53 Guo Z, Su WL, Zhou RY, et al. Exosomal MATN3 of urine-derived stem cells ameliorates intervertebral disc degeneration by antisenescence effects and promotes NPC proliferation and ECM synthesis by activating TGF- β [J/OL]. <https://doi.org/10.1155/2021/5542241>.
- 54 Cui SQ, Zhang L. microRNA-129-5p shuttled by mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles alleviates intervertebral disc degeneration via blockade of LRG1-mediated p38 MAPK activation [J]. *J Tissue Eng*, 2021, 12: 20417314211021679.
- 55 Li W, Xu Y, Chen WJ. Bone mesenchymal stem cells deliver exogenous lncRNA CAHM via exosomes to regulate macrophage polarization and ameliorate intervertebral disc degeneration [J]. *Exp Cell Res*, 2022, 421 (2): 113408.

(责任编辑: 孟晓彤)