

人工智能辅助血细胞形态学检查的机遇与挑战

冯馨锐, 吴韦铷, 张晓丽, 杨忠, 毕清华 (中国人民解放军陆军军医大学药学与检验医学系
临床血液学教研室, 重庆 400038)

摘要: 血细胞形态学检查是血液病诊断的基础和重要手段。人工智能 (AI) 辅助血细胞形态学检查在早期检测和诊断血液病方面弥补了人工显微镜检查方法的不足, 提高了诊断效率、准确度和敏感度, 很大程度上降低了人力和时间成本, 明显提升医疗质量和推动个性化医疗。目前国内临床仍以传统人工镜检为标准方法, 为推动人工智能辅助血细胞形态学检查的完善和发展, 该文讨论了人工智能辅助血细胞形态学检查的现状和特点, 考虑到自动化血细胞形态学分析的标准化、数据库和伦理等问题, 对其仍存在的一些挑战和局限性进行总结分析, 可以支持血液疾病的诊断, 并在未来为研究人员和临床医生提供帮助。

关键词: 人工智能; 血细胞; 形态学检查; 临床应用

中图分类号: R446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7414 (2025) 01-189-07

doi:10.3969/j.issn.1671-7414.2025.01.036

Opportunities and Challenges of Artificial Intelligence Assisted Blood Cell Morphology Examination

FENG Xinrui, WU Weiru, ZHANG Xiaoli, YANG Zhong, BI Qinghua (Department of Clinical Hematology, College of Pharmacy and Laboratory Medicine Science, Army Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Blood cell morphology examination is the foundation and important means of diagnosing blood diseases. Artificial intelligence (AI) assisted blood cell morphology examination compensates for the shortcomings of artificial microscopy in the early detection and diagnosis of blood diseases, improves diagnostic efficiency, accuracy, and sensitivity, greatly reduces labor and time costs, significantly improves medical quality, and promotes personalized health care. Traditional manual microscopy is still the standard method in clinical practice in China. In order to encourage the improvement and development of intelligence-assisted blood cell morphology examination, this article discusses the current situation and characteristics of intelligence-assisted blood cell morphology examination. Considering the standardization, database, and ethical issues of automated blood cell morphology analysis, some challenges and limitations are summarized and analyzed, which can support the diagnosis of blood diseases and assist researchers and clinical doctors in the future.

Keywords: artificial intelligence; blood cell; morphological examination; clinical application

血细胞形态学检查是血常规检查的重要检验项目, 也是所有细胞形态学检查中较复杂的一项, 在以红细胞、白细胞、血小板等改变为主要表现的临床疾病诊疗中起着关键和重要作用。传统人工显微镜下血细胞形态学检查方法被认为是金标准。早在2015年, 国际血液学标准化委员会 (International Council for Standardization in Haematology, ICSH) 就发布了关于外周血细胞形态特征分级和命名规范化的建议^[1]。2020年, 中华医学会检验医学分会血液学与体液学学组发布了全血细胞计数检测报告标准化指南^[2]。虽然这些指南为检验专业人员实现准确、统一的报告结果提供了具体依据, 然而, 它仍是一项工作量大且耗时的工作, 且对形态学检验岗位人员专业知识和能力的要求极高, 其存在的方法学不足明显限制了工作的开展和有效执行。

在此背景下, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 在血细胞形态检测领域的应用发展迅猛, 且取得了重大进展。但与传统的人工镜检相比, 自动化血细胞形态学分析仪基于不同的算法或模型来识别和分类血细胞, 还存在诸多不足, 准确性仍需验证^[3-4]。为此, 本文将探讨人工智能辅助血细胞形态学检查在当下临床疾病诊疗中的应用现状、存在问题及解决方案, 并展望其应用趋势与前景。

1 AI 辅助血细胞形态学检查的应用现状

AI 在医学领域血细胞形态检测的应用正变得越来越广泛, 已被应用于实验室医学分析前的许多人工劳动密集型活动, 包括改进样本采集、运输以及样本质量评估和错误检测等阶段^[5-6], 其主要优势在于提高诊断效率、准确性和可重复性。

AI 辅助血细胞形态学检测领域的一些应用包

基金项目: 陆军军医大学教育改革研究课题 (项目编号: 2022B08)。

作者简介: 冯馨锐 (1994-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 医学检验技术, E-mail: fengxr@tmmu.edu.cn。

通讯作者: 毕清华 (1992-), 女, 在职博士研究生, 助教, 研究方向: 医学检验技术, E-mail: qinghua.bi@tmmu.edu.cn。

括：①自动化细胞识别与分类：AI可以通过扫描骨髓涂片并生成数字化电子涂片，然后利用人工智能算法自动识别细胞类型，例如：深度学习算法、k近邻算法、支持向量机和前向传播神经网络等机器学习方法，从而辅助血液科诊断人员进行细胞形态诊断工作^[7-9]；②辅助临床应用：近十年来，大部分医院已使用了AI技术在外周血细胞形态学领域来辅助检查血细胞形态，其以智能、高效的优势在血细胞形态特别是红细胞和白细胞形态分析中发挥了重要作用，提升了临床使用价值，例如：SyntheticCellGAN (SCG)是一种用于自动生成白细胞人工图像的新系统，已被开发和验证，证明在创建正常白细胞和与疾病(如急性早幼粒细胞白血病和毛细胞白血病)相关的低患病率细胞类别的图像方面是有效的^[10]；其次，AI技术在血小板聚集检测中的应用也是医学领域的一项重要进展，AI系统可以自动识别和量化血小板聚集情况，分析血小板聚集现象，结合临床数据和血小板聚集信息，实现AI辅助诊断相关疾病，如血液疾病和心血管疾病^[11]。除此之外，人工智能算法在贫血检测中的应用，展示了其在医疗健康领域的广泛潜力，特别是在快速、低成本和无创的检测方法方面。有研究已开发智能手机应用程序，通过分析手机拍摄的指甲床照片来检测贫血，并测算血红蛋白水平，从而实现无创、准确的定量智能手机应用程序贫血检测方法^[12]；③疾病诊断和鉴别：AI技术不仅在细胞形态识别方面发挥作用，还能在疾病鉴别诊断中提供实用价值，如在骨髓增生异常综合征(MDS)的诊断中，将DLS深度学习系统和XGBoost决策算法结合，评估到中性粒细胞中的颗粒减少(DG)，提供了高特异度和灵敏度^[13]；④疾病预测：AI在血液疾病预测方面已取得了显著进展，已被广泛用于医疗保健领域，尤其对疟疾、白血病和白细胞相关疾病的研究较多，但对血小板聚集预测功能的研究较少，AI可以建立预测模型，帮助预测血小板聚集的风险，以及评估抗血小板治疗的效果。AI技术还可以早期识别和诊断疾病^[14-17]；⑤远程诊断：AI技术推动了远程审核、会诊工作模式和网络实验室的实现，使我们能够进行远程在线血细胞形态学检验和诊断，从而提高诊断的可及性和效率。这种方式的普及不仅可以减少患者的就诊负担，还可以降低医疗机构的运营成本，从而全面提升医疗服务的质量和效率^[18]。

2 临床基于AI辅助血细胞形态学检查的特点

AI技术正以多种方式应用于血细胞形态学检查自动化。胶囊网络(一种新的深度学习模型)的运用缩短了全血细胞分析时间，并将细胞识别和分

类时间减少至4~6s，显著提高了血细胞形态检验效率^[19]。有研究表明，AI驱动的数字病理平台Morphogo，在对循环浆细胞识别分类时的准确率高达99.64%，相较于人工识别分类与传统显微镜方法，降低了主观因素对结果的影响，提高了诊断特异度和灵敏度，便于结果审核和复检^[20-21]。此外，AI辅助诊断支持系统包括白血病类型的细胞检测、分类和预测等，可以有效弥补人工显微镜检查方法的不足，解决了检验人员不足和劳动强度的问题。

在教育应用方面，基于AI的在线平台已被证明可以有效地帮助医学生学习血细胞形态学，可以启发学生比较细胞之间的异同，帮助他们更好地了解细胞，并补充传统的显微镜学习。因此，AI在线学习平台的可行性是该平台的优势，可以作为传统教学的有益补充^[22]。

AI辅助系统的运用，有可能彻底改变医疗保健现状，提高诊断和治疗的效率和准确性，并帮助形态学检验人员完成耗时的常规任务，促进快速诊断并有助于推进医疗实践的现代化和信息化进程。

3 AI应用于血细胞形态学检查的局限及解决方案

3.1 促进AI辅助血细胞形态学检查的标准化

AI辅助血细胞形态学检验报告结果准确度的关键是检验前、中、后全过程的标准化与规范化，涉及人、机、料、法、环各方面的质量保证^[2]，包括：①血涂片制备(标本采集、血涂片制备、血涂片染色)；②数据采集(图像采集、图像处理、图像分割)；③图像识别分类(预分类、形态学分析)；④人工确认和再分类(人工镜检)；⑤结果分析报告；⑥数据收集保存^[18]。

其中血涂片的质量是保证血细胞形态学检查结果准确度的前提。BAIN等^[23]早在2005年就强调了开发用于自动血液检查的图像识别标准化技术的必要性。强调血涂片是提供鉴别诊断和指示进一步必要测试的重要工具，血涂片对于快速诊断某些特定感染具有重要作用，所有实验室都应制定基于国际实验室血液学学会标准的血涂片检查方案。

不同自动化血液分析仪配套推片机的制片质量存在差异。有研究表明，通过手动载片审核(MSR)对Sysmex XE-2100配备SP-1000i(日本Sysmex公司)和ABX Pentra DX120配备SPS evolution(法国ABX-Horiba公司)两台配有自己的自动切片制作器/染色器的血液学分析仪的结果进行验证，不同血液分析仪的切片制作速度各不相同。这也意味着，虽然推片机不能完全替代手工制片，但可以有效优化以减少实验室工作量^[24]。刘贵建团队研究表明采用不同的血涂片(推片机或手工，不同形状、血量和涂膜厚度)、染色方法(染片机和手工染色)、

染色液（3个品牌6种染色液）等，自动化血细胞形态学分析仪对不同类别白细胞的识别结果准确度有差异^[18]。

其次，血细胞图像采集和分析的质量控制也是保障检验结果准确度与精密度的重要因素。自动化血细胞形态学分析仪的图像分析系统影响着采集细胞内部结构的清晰度，从而影响细胞图像提取效果。目前血细胞图像采集，规范化自动化血细胞形态学分析系统应该接近或达到人工显微镜镜检下观察到的细胞形态特征，减少染色方案、不规则着色、扫描细胞数量少、速度慢、光照对比度低、分辨率低等方面问题对细胞形态图片的影响。

关于血细胞形态图像采集相关的标准化指南与文件极少，但病理数字成像的标准化采集分析已有相对完备的文件^[25]，而血细胞图像采集分析与病理图像采集分析在图像采集处理、识别分类及存储等检测原理、方法、技术上有许多相通之处。因此，血细胞形态图像采集标准化操作流程可以参考病理图像采集分析的标准化文件^[26]。

目前，针对人工智能辅助血细胞形态学检查技术方法存在的不完善方面，2023年中华医学会检验医学分会血液体液学组等三家学术团体组织全国多家医疗机构的近百位专家结合临床工作经验与众多文献制定了《人工智能辅助外周血细胞形态学检查的中国专家共识》^[2]，该共识已作为国际实践指南被借鉴应用。共识包括适用范围、术语和定义、标本采集和血涂片制备、血涂片染色、临床应用范围、检测系统的性能评估、阅片方式和数据采集、结果分析和报告、数据保存共享和再利用、检验人员的能力要求、标准化共10个检验前中后全过程中的技术和管理要素方面的内容，提出了28条建议，制定了科学、规范、有效的操作程序和检验流程。因此，为确保AI辅助血细胞形态学检查结果的准确度和精密度，未来的发展趋势需要关注技术完善、标准化和规范化，以及建立高质量的形态学数据库和评价体系，为制定标准化、规范化建议和方案提供强有力的循证医学数据。

3.2 加强自动化血细胞形态学分析检测系统的性能评估 基于ISO15189-《医学实验室-质量和能力的专用要求》及《医疗机构临床实验室管理办法》临床实验室管理要求，以及为保证自动化血细胞形态学分析系统检查结果准确性，临床实验室应全面掌握自动化血细胞形态学分析仪的性能评估方法，在开展形态学检测前中后全过程，都应进行必要的性能评估与验证，从而判断检测系统是否满足临床要求的有效性和完整性。

在血细胞形态学分析中，AI技术检测系统的性

能评估和验证是关键环节，同时也是一个复杂的过程，涉及各种参数，如大小、颜色、形状、夹杂物和空间模式^[27]。包括细胞识别谱的评估、血细胞识别及分类的准确性评价、对外周血异常细胞筛查能力的评估、细胞识别的精密度（重复性）评估方法及要求、细胞图像的质量要求及实验室质量控制^[2]。

尽管AI技术在血细胞形态学检验中的应用前景广阔，对正常或仅有少量细胞异常样本的预分类结果与人工确认结果的符合率和检出率均较高，与人工显微镜检查结果具有较好的一致性^[28]，KOCH等^[29-30]评估了Sysmex XN系列（日本Sysmex公司）自动图像分析系统对红细胞（RBC）形态异常筛查的准确度和有效性，证明了在与疾病相关的RBC异常形态筛查中具有潜在效用。但自动化血细胞形态分析仪在出现比例较低的原始幼稚细胞、正常生理状态下不出现的异常细胞或肿瘤细胞的识别和检测方面存在局限性^[31]，如CellaVision DM96（瑞典CellaVision AB公司）自动化数字图像分析仪对一些“高危科室”患者的异常细胞筛查的灵敏度较低^[32]。

虽然数字显微镜系统与自动图像处理系统已在临床实验室得到广泛使用，提高了诊断的效率、客观性和准确性，但在使用前必须全面深入了解仪器对异常细胞的筛查能力，对其检测系统进行性能评估。检测标本时，对于敏感度与准确度较低的异常细胞，仍需要人工镜检审核。目前，自动化血细胞形态学分析仪仍存在技术困难，但技术方法的进步有望解决这些挑战并提高形态学检查的准确度与特异度，包括需要增加数字图像分析对出现比例较低细胞及异常细胞的研究，充分验证的多中心数据、数据标准化等。

综上，评价自动化血细胞形态分析系统的稳定性和正确性，需要从多个方面进行综合考量。可以通过与人工镜检结果对比，评估系统的准确度，包括特异度（specificity）、敏感度（sensitivity）、阴性预测值（NPV）和阳性预测值（PPV）^[33]。对于自动化系统结果的一致性和重复性评估，可以对同一样本重复进行多次检测。长时间运行自动化血细胞形态分析系统，持续监测其在连续工作状态下的性能是否保持稳定，以评估其稳定性。除此之外，还要分析其外部干扰因素，如样本处理、染色过程和成像条件等。最后，定期收集使用该系统的专业人员反馈意见，了解其在实际应用中的表现和存在的问题，以便及时监测与调整。通过这些方法，可以较全面地评估自动化血细胞形态分析系统的稳定性和正确性，确保其在临床应用中的可靠性和有效性。

3.3 加强自动化血细胞形态学分析检测系统的质量管理 自动化血细胞形态分析仪的质量管理是保证

检验结果可靠性和准确性的关键步骤。应建立规范化的质量管理体系和流程,全面管理和严格控制检验质量,从而实现检验实验室质量的高效、客观管理。

首先,需要定期对自动化血细胞形态学分析仪进行维护和校准,确保一定的稳定性和精密度;其次,应严格遵循定期及长期的质量控制程序,从而检测仪器性能;第三,确保操作人员操作流程规范,操作人员应定期进行培训及考核,包括样本处理、操作和结果判读,从而减少人为错误。除此之外,定期进行外部质量评估,与其他实验室进行结果比较,从而达到评估和提升检验质量的目的。基于内部质量管理和外部质量评估,通过这些措施,可以有效地管理自动化血细胞形态分析仪的质量,确保为临床诊断提供可靠的数据支持和高质量的检验服务^[34-35]。

3.4 加强血细胞分析自动审核的建设 AI在自动化审核报告方面国内已经发展了近十年^[36-37],作为一种标准化和系统化的检验数据错误识别高级功能,可以极大降低检验人员因各种因素导致的人为误差,提升检验结果的质量和临床价值。但目前,国内大多数实验室血细胞分析后过程中仍处于人工审核检验结果阶段,因其不仅仅涉及血细胞数量相关参数还涉及形态学异常,相较于单纯数量变化的检验项目而言,血液分析自动审核相对更复杂,因此相关文献报道较少^[38]。

自动化血细胞形态分析系统的智能化审核报告标准化是确保缩短周转时间(TAT)的同时,保障检验质量的重要环节^[39]。以下是实现智能化审核报告标准化的一些关键步骤和建议:①程序文件化:参考国际临床实验室标准化协会(CLSI)发表的AUTO10-A临床实验室检验结果的自动审核指南和国内《临床实验室定量检验结果的自动审核WS/T 616-2018》,结合所使用的血液分析检测系统参数特点,建设相对应的符合实验室自身条件特点的血液分析自动审核规则和详细的操作规程,包括逻辑关系、参数范围、危急值等,确保审核结果的准确度和一致性;②系统验证:在系统投入使用前,进行彻底的临床相关性验证,包括真阴性、假阴性、真阳性、假阳性、自动审核通过率和通过正确率,以及自动审核规则前后平均TAT的变化,确保提高实验室的标本检测容量和检验工作效率;③周期性评审和更新:实施严格的质量控制措施,包括日常和长期的质控计划,定期评估和更新智能化审核系统,以适应新的医学知识和技术进步;④多中心验证:通过多中心研究和验证,确保智能化审核系统在不同人群和不同实验室中的准确性和适用性;⑤

数据管理:建立标准化的数据管理系统,确保数据的准确、安全和可追溯;⑥反馈和持续改进:建立反馈机制,不断改进智能化审核系统。

3.5 加快推进血细胞形态学数据库的建设 血细胞形态学数据库的建设是实现AI辅助血细胞形态学检验的关键步骤之一。收集大量且高质量的血细胞图像是创建有价值AI模型数据库的前提,数据库应包含各种正常和病理状态下的血细胞图像,以训练和验证深度学习模型的有效性。例如,2019年《自然机器智能》杂志发表的文章显示,卷积神经网络在深度学习了18000个细胞后,能够准确识别急性髓系白血病的原始细胞^[40]。2021年《Blood》杂志发表的论文中提到,MATEK^[41]研究团队使用超过17万张骨髓细胞图像,开发了迄今为止最大的骨髓细胞显微图像开放存取数据库,通过训练和验证卷积神经网络,以高精度识别骨髓细胞。

为了确保数据集的质量和一致性,需要构建标准化数据采集流程。采用规范化的血细胞图像采集流程,这包括标本采集、血涂片制备、血涂片染色等步骤,确保采集到的图像能够反映细胞的真实形态。也要采用先进的图像处理技术,使用如卷积神经网络等深度学习算法来提高图像处理的自动化水平,包括图像分割、特征提取和分类,AI辅助血细胞形态学检查的智能化、信息化关键技术也是数据库建设中不可或缺的技术要素。与此同时,数据库的建设应该加强AI专业技术人员与医学检验专业技术人员之间的跨学科合作,共同解决临床实际应用中遇到的问题,并根据反馈进一步优化算法和数据库,形成良性的技术迭代和优化过程。

随着医疗方法技术的发展和数据的产生,数据库的建设不仅需要收集和整理数据,还需要定期持续地更新和维护,以确保数据库的准确性和时效性。与此同时,数据库的建设应该通过多中心合作收集更丰富的数据,应尽可能包含各类常见或罕见血液病,以及各类血液系统相关疾病,并进行临床验证,以增加数据库的覆盖性和可靠性^[18,42]。

目前,国内尚缺乏具有权威性、专业性的血细胞形态学及相关疾病的公共数据库,血细胞形态学数据库的建设和应用是一个跨学科、多方面的合作过程,涉及到数据收集、处理、存储、分析等多个环节,并且需要形成专家共识和不断的创新技术,来推动一个具有科学性、权威性、多样性和规范性的血细胞形态学数据库的建设和发展,各类专业团体应积极努力致力于建设高质量、高标准血细胞形态学及相关疾病的数据库,为研究人员和临床医生提供坚实可靠的数据资源。

3.6 在医学领域使用人工智能的伦理问题 尽管

AI在预测血液疾病方面具有潜力,但仍存在挑战。大数据是指AI利用大量相关数据的能力。例如,剑桥乳腺癌算法基于近100万名女性的数据,它可以提供与全球专业医生相比较的专业建议^[43]。这不仅降低了患者的风险,并在诊断和治疗方面提供了更好的医疗表现。通过这种方式,它实现了生物医学伦理学的一个核心原则,即有益。然而,虽然数据的使用可以获得患者同意,但仍可能会侵犯患者的隐私。

除此之外,AI在医学领域中使用会引发与责任、信任、隐私、歧视风险、自主性以及潜在利益和危害相关的伦理问题^[44]。目前,有案例显示AI在咨询、诊断、治疗、疾病管理与预防整个治疗过程中存在危害和潜在风险,例如医患关系的破坏、不公平公正的存在、自主权的损害以及对患者的伤害^[45]。

针对这些伦理问题,可以采用应对措施。首先,数据使用需要获得有效同意。由于数据的使用方式很难提前评估,以及个人在多大程度上同意未来未知的用途,因此可以在传统模式的保密机制基础上改进不同的同意模式,以更好地防范与避免伦理问题。其中包括“广泛同意”,这使个人能够同意广泛的或多或少指定的未来用途;元同意,即个人保留对其未来用途的同意类型的控制权(例如,对某些类型的用途的全面同意,但对其他类型的使用的具体同意)^[46];以及动态同意,即个性化的,并基于交互式在线平台,参与者可以在其中实时不断地参与他们认为合适的用途^[47]。其次,可以建立机构来管理数据和数据链接,以确保机密性,例如新加坡的TRUST平台。还可以采用新型隐私保护技术,如“区块链”技术^[48]。第三,数据可以匿名或去标识以保护隐私。

无论好坏,AI在血细胞形态学检测中的应用在提高医学诊断的准确度和效率方面,是一项有可能彻底改变医疗保健服务有前途的技术。然而,需要明确的道德规范,确保AI技术在临床实践中的设计、开发和利用伴随着道德监督,从而使AI成为一种有益的工具,以充分发挥改善患者和临床医生体验的潜力。

4 展望

全球医疗人工智能(AI)市场预计将持续快速增长,特别是在中国,随着市场需求的增加和政策的支持,AI在医疗保健领域的应用将得到更广泛的支持和投入,AI辅助血细胞形态学检查的前景是广阔和充满希望的。通过收集和分析大量且高质量的显微图像数据,可以提高AI模型识别和分类血细胞的准确率。随着自动化血细胞分析AI在血液检验医学中的应用将更加深入和广泛,机器学习

算法和深度学习的不断完善,以及新技术的不断涌现,如时空组学技术,AI在血细胞形态学检查中的应用将更加高效和精准。

综上所述,AI辅助血细胞形态学检查的未来发展将更加自动化、数字化、智能化和标准化,有望在降低成本、提高诊断效率、提升医疗质量和推动个性化医疗等方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] PALMER L, BRIGGS C, MCFADDEN S, et al. ICSH recommendations for the standardization of nomenclature and grading of peripheral blood cell morphological features[J]. *International Journal of Laboratory Hematology*, 2015, 37(3): 287-303.
- [2] 白求恩精神研究会检验医学分会. 中华医学会检验医学分会血液体液学组, 中国医学装备协会检验医学分会基础检验设备学组. 人工智能辅助外周血细胞形态学检查的中国专家共识 [J]. *中华检验医学杂志*, 2023, 46(3): 243-258. Medical Laboratory Diagnostics Branch Society of Bethune Spiritual Research Association, Laboratory Medicine Committee of Chinese Association of Integrative Medicine, Hematology and Body Fluid Group. Chinese expert consensus on artificial intelligence assisted morphology examination of peripheral blood cells [J]. *Chinese Journal of Laboratory Medicine*, 2023, 46(3): 243-258.
- [3] 杨华, 孙天舒, 王瑶, 等. 人工智能辅助阅片与单纯人工阅片在女性阴道微生态系统形态学诊断中的比对研究 [J]. *现代检验医学杂志*, 2023, 38(1): 169-174, 198. YANG Hua, SUN Tianshu, WANG Yao, et al. Comparative study of artificial intelligence-assisted analysis and manual visual analysis in gynecological microbiome diagnosis [J]. *Journal of Modern Laboratory Medicine*, 2023, 38(1): 169-174, 198.
- [4] 李勤, 石佳, 卢兴兵, 等. XN-9000全自动血液细胞分析仪有核红细胞计数与手工方法验证的探讨 [J]. *现代检验医学杂志*, 2017, 32(1): 124-127. LI Qin, SHI Jia, LU Xingbing, et al. Evaluation of the nucleated red blood cells count of sysmex XN-9000 automatic hematology analyzer and the validation of manual method [J]. *Journal of Modern Laboratory Medicine*, 2017, 32(1): 124-127.
- [5] LIPPI G, MATTIUZZI C, FAVALORO E J. Artificial intelligence in the pre-analytical phase: state-of-the-art and future perspectives [J]. *Journal of Medical Biochemistry*, 2024, 43(1): 1-10.
- [6] RASTOGI P, KHANNA K, SINGH V. LeuFeatx: deep learning-based feature extractor for the diagnosis of acute leukemia from microscopic images of peripheral blood smear [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2022, 142: 105236.
- [7] LIPPEVELD M, KNILL C, LADLOW E, et al. Classification of human white blood cells using machine learning for stain-free imaging flow cytometry [J]. *Cytometry*, 2020, 97(3): 308-319.

- [8] 余恋雨,陈鸣.人工智能在检验领域的新发展新方向[J].中华检验医学杂志,2021,44(10):887-891.
YU Lianyu, CHEN Ming. New development and new direction of artificial intelligence in laboratory medicine [J]. Chinese Journal of Laboratory Medicine, 2021, 44(10): 887-891.
- [9] 何文军,李曼,李涛,等.基于血细胞形态识别的自动检测系统的研发[J].现代检验医学杂志,2019,34(2):104-108.
HE Wenjun, LI Man, LI Tao, et al. Study on automatic detection system base on blood cell morphology recognition [J]. Journal of Modern Laboratory Medicine, 2019, 34(2): 104-108.
- [10] BARRERA K, MERINO A, MOLINA A, et al. Automatic generation of artificial images of leukocytes and leukemic cells using generative adversarial networks (syntheticcellgan) [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2023, 229:107314.
- [11] 樊爱琳,杨丽华,刘家云,等.全自动数字细胞分析系统对血小板聚集的检测能力分析[J].中华检验医学杂志,2023,46(7):732-737.
FAN Ailin, YANG Lihua, LIU Jiayun, et al. Evaluation of automated digital cell morphology system for the detection of platelet clumps[J]. Chinese Journal of Laboratory Medicine, 2023, 46(7): 732-737.
- [12] MANNINO R G, MYERS D R, TYBURSKI E A, et al. Smartphone app for non-invasive detection of anemia using only patient-sourced photos[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4924.
- [13] KIMURA K, TABE Y, AI T, et al. A novel automated image analysis system using deep convolutional neural networks can assist to differentiate MDS and AA[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 13385.
- [14] KRITTANAWONG C, ZHANG Hongju, WANG Zhen, et al. Artificial intelligence in precision cardiovascular medicine[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2017, 69(21): 2657-2664.
- [15] 骆琳.基于深度神经网络对肺间质纤维化的预测[D].大连:大连医科大学,2022.
LUO Lin. Prediction of pulmonary fibrosis based on deep neural network[D]. Dalian: Dalian Medical University, 2022.
- [16] Abdalla Fakheraldin Yahia Omer.基于非线性和非平稳分解方法的心律失常分类研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
ABDALLA F Y O. Ecg arrhythmia classification based on nonlinear and nonstationary decomposition methods[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] 武江朋.基于血液检测数据的计算机辅助医疗诊断系统构建[D].兰州:兰州大学,2020.
WU Jiangpeng. Construction of computer-aided medical diagnosis system based on blood test data[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [18] 刘贵建,庞博.应促进和拓展人工智能辅助血细胞形态学检查的临床应用[J].中华检验医学杂志,2023,46(3):231-237.
LIU Guijian, PANG Bo. The clinical application of artificial intelligence assisted blood cell morphological examination should be promoted and expanded[J]. Chinese Journal of Laboratory Medicine, 2023, 46(3): 231-237.
- [19] BAYDILLI Y Y, ATILA Ü. Classification of white blood cells using capsule networks [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2020, 80: 101699.
- [20] LI Mingling, FANG Shu, WANG Xiaoli, et al. Peripheral blood leukocyte detection based on an improved detection transformer algorithm[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(16): 7226
- [21] CHEN Pu, ZHANG Lan, CAO Xinyi, et al. Detection of circulating plasma cells in peripheral blood using deep learning-based morphological analysis[J]. Cancer, 2024, 130(10): 1884-1893.
- [22] LI Junxun, OUYANG Juan, LIU Juan, et al. Artificial intelligence-based online platform assists blood cell morphology learning: a mixed-methods sequential explanatory designed research[J]. Medical Teacher, 2023, 45(6): 596-603.
- [23] BAIN B J. Diagnosis from the blood smear[J]. The New England Journal of Medicine, 2005, 353(5): 498-507.
- [24] HUR M, CHO J H, KIM H, et al. Optimization of laboratory workflow in clinical hematology laboratory with reduced manual slide review: comparison between Sysmex XE-2100 and ABX Pentra DX120[J]. International Journal of Laboratory Hematology, 2011, 33(4): 434-440.
- [25] BADANO A, REVIE C, CASERTANO A, et al. Consistency and standardization of color in medical imaging: a consensus report[J]. Journal of Digital Imaging, 2015, 28(1): 41-52.
- [26] PANTANOWITZ L, SINARD J H, HENRICKS W H, et al. Validating whole slide imaging for diagnostic purposes in pathology: guideline from the college of American Pathologists Pathology and Laboratory Quality Center[J]. Archives of Pathology & Laboratory Medicine, 2013, 137(12): 1710-1722.
- [27] MERINO A, PUIGVI L, BOLDU L, et al. Optimizing morphology through blood cell image analysis[J]. International Society for Laboratory Hematology, 2018, 40 (Suppl 1): 54-61.
- [28] 高飞,唐晶,李景岗,等.LDBC-I全自动血细胞图像分析仪对外周血有核细胞分类能力的验证评价[J].现代检验医学杂志,2018,33(2):86-90.
GAO Fei, TANG Jing, LI Jinggang, et al. Evaluation of LDBC-I blood cell image automatic analyzer in analysis of the nucleated cells in peripheral blood smear [J]. Journal of Modern Laboratory Medicine, 2018, 33(2): 86-90.
- [29] KOCH S P R, THOMASEN I N, NIELSEN J Ø, et al. Interchangeability of multiple Sysmex XN10 and XN20 modules for six types of leukocytes[J]. International Journal of Laboratory Hematology, 2022, 44(2): 273-280.
- [30] VELIZAROVA M, YACHEVA T, GENOVA M, et al. Evaluation of automated hematology analyzer DYMIND DH76 compared to SYSMEX XN 1000

- system[J]. *Journal of Medical Biochemistry*, 2021, 40(4): 367-377.
- [31] 陈洁,李文生,张巍. 人工智能辅助系统在宫颈液基细胞学分析中的应用价值研究[J]. *现代检验医学杂志*, 2023,38(5):155-159.
CHEN Jie, LI Wensheng, ZHANG Wei. Study on the value of artificial intelligence-assisted systems in cervical liquid-based cytology analysis[J]. *Journal of Modern Laboratory Medicine*, 2023, 38(5): 155-159.
- [32] 黄骥斌,曾婷婷,郭曼英,等. CellaVision DM96 自动化数字图像分析系统进行白细胞分类的临床应用[J]. *检验医学*, 2012,27(4):299-303.
HUANG Jibin, ZENG Tingting, GUO Manying, et al. Clinical application of white blood cell differentiation of CellaVision DM96 system[J]. *Laboratory Medicine*, 2012, 27(4): 299-303.
- [33] 蒋浩琴,陈葳,何军,等. 基于人工智能的血细胞形态分析仪白细胞分类性能的多中心研究[J]. *中华检验医学杂志*, 2023,46(3):265-273.
JIANG Haoqin, CHEN Wei, HE Jun, et al. A multi-center study on evaluation of leukocyte differential performance by an artificial intelligence-based digital cell morphology analyzer[J]. *Chinese Journal of Laboratory Medicine*, 2023, 46(3): 265-273.
- [34] 中国病理医师协会数字病理与人工智能病理学组,中华医学会病理学分会数字病理与人工智能工作委员会,中华医学会病理学分会细胞病理学组. 宫颈液基细胞学的数字病理图像采集与图像质量控制中国专家共识[J]. *中华病理学杂志*, 2021, 50(4): 319-322.
Expert Group of Digital Pathology and Artificial Intelligence Pathology of Chinese Association of Pathologists, Expert Group of Digital Pathology and Artificial Intelligence Pathology of Chinese Society of Pathology, Expert Group of Cytopathology of Chinese Society of Pathology. Chinese experts' consensus on digital pathological image acquisition and quality control of cervical liquid based cytology [J]. *Chinese Journal of Pathology*, 2021, 50(4): 319-322.
- [35] 姜梦琦,韩昱晨,傅小龙. 基于人工智能的H-E染色全切片病理学图像分析在肺癌研究中的进展[J]. *中国癌症杂志*, 2024, 34(3): 306-315.
JIANG Mengqi, HAN Yuchen, FU Xiaolong. Research progress on H-E stained whole slide image analysis by artificial intelligence in lung cancer[J]. *China Oncology*, 2024, 34(3): 306-315.
- [36] 温冬梅,张秀明,王伟佳,等. 临床实验室生化免疫自动审核系统的建立及应用[J]. *中华检验医学杂志*, 2018,41(2):141-148.
WEN Dongmei, ZHANG Xiuming, WANG Weijia, et al. Establishment and application of the autoverification system in laboratory clinical chemistry and immunology laboratory[J]. *Chinese Journal of Laboratory Medicine*, 2018, 41(2): 141-148.
- [37] 夏良裕,程歆琦,刘茜,等. 临床实验室生化免疫项目自动审核程序的建立与应用[J]. *中华医学杂志*, 2017, 97(8): 616-621.
XIA Liangyu, CHENG Xinqi, LIU Qian, et al. Developing and application of an autoverification system for clinical chemistry and immunology test results[J]. *National Medical Journal of China*, 2017, 97(8): 616-621.
- [38] 续薇,郝晓柯,崔巍,等. 血液分析自动审核规则建立与验证的多中心研究[J]. *中华医学杂志*, 2018,41(8):601-607.
XU Wei, HAO Xiaoke, CUI Wei, et al. A multi-center research on the establishment and validation of autoverification rules for blood analysis [J]. *Chinese Journal of Laboratory Medicine*, 2018, 41(8): 601-607.
- [39] 胡月明,李宾,高光强,等. 人工智能在检验医学中的应用及展望[J]. *国际检验医学杂志*, 2021,42(6):753-758.
HU Yue ming, LI Bin, GAO Guangqiang, et al. Application and prospect of artificial intelligence in laboratory medicine [J]. *International Journal of Laboratory Medicine*, 2021, 42(6): 753-758.
- [40] MATEK C, SCHWARZ S, SPIEKERMANN K, et al. Human-level recognition of blast cells in acute myeloid leukaemia with convolutional neural networks[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2019, 1(11): 538-544.
- [41] MATEK C, KRAPPE S, MÜNZENMAYER C, et al. Highly accurate differentiation of bone marrow cell morphologies using deep neural networks on a large image data set[J]. *Blood*, 2021, 138(20): 1917-1927.
- [42] 杨军霞,连荷清,庞博. 人工智能血细胞形态学检查的关键技术进展[J]. *中华检验医学杂志*, 2023,46(3):326-330.
YANG Junxia, LIAN Heqing, PANG Bo. Progress in key technologies of artificial intelligence-assisted blood cell morphology examination[J]. *Chinese Journal of Laboratory Medicine*, 2023, 46(3): 326-330.
- [43] CANDIDO DOS REIS F J, WISHART G C, DICKS E M, et al. An updated PREDICT breast cancer prognostication and treatment benefit prediction model with independent validation[J]. *Breast Cancer Research*, 2017, 19(1): 58.
- [44] SAVULESCU J, GIUBILINI A, VANDERSLUIJ R, et al. Ethics of artificial intelligence in medicine[J]. *Singapore Medical Journal*, 2024, 65(3): 150-158.
- [45] OBERMEYER Z, POWERS B, VOGELI C, et al. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations[J]. *Science*, 2019, 366(6464): 447-453.
- [46] PLOUG T, HOLM S. Going beyond the false dichotomy of broad or specific consent: a meta-perspective on participant choice in research using human tissue[J]. *American Journal of Bioethics*, 2015, 15(9): 44-46.
- [47] KAYE J, WHITLEY E A, LUND D, et al. Dynamic consent: a patient interface for twenty-first century research networks[J]. *European Journal of Human Genetics*, 2015, 23(2): 141-146.
- [48] PORSDAM MANN S, SAVULESCU J, RAVAUD P, et al. Blockchain, consent and present for medical research[J]. *Journal of Medical Ethics*, 2020, 47(4): 244-250.