

智能手机比色分析在生物标志物检测中的应用

白 刚^{1*}, 余 华^{2#}

¹成都中医药大学医学与生命科学学院, 四川 成都

²成都中医药大学附属医院普外科, 四川 成都

收稿日期: 2025年1月28日; 录用日期: 2025年2月21日; 发布日期: 2025年2月28日

摘 要

智能手机比色分析是一种新兴的检测技术, 结合了智能手机的便携性与比色分析的高灵敏度和低成本优势, 在生物标志物检测中展现出重要应用价值。生物标志物广泛用于疾病的诊断、治疗效果评估及预后监测。近年来, 研究表明, 智能手机辅助比色分析技术能够实现多种生物标志物的快速、精准检测, 尤其在资源有限地区和即时检测中具有独特优势。本文系统综述了智能手机比色分析技术在各种生物标志物检测中的最新研究进展, 并探讨了其在医学诊断中的未来发展方向以及可能面临的挑战与解决策略。

关键词

智能手机, 比色分析, 生物标志物, 检测

Application of Smartphone-Based Colorimetric Analysis in Biomarker Detection

Gang Bai^{1*}, Hua Yu^{2#}

¹School of Medical and Life Sciences, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

²Department of General Surgery, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 28th, 2025; accepted: Feb. 21st, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

Smartphone-based colorimetric analysis is an emerging detection technology that combines the

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 白刚, 余华. 智能手机比色分析在生物标志物检测中的应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(2): 1942-1951.
DOI: 10.12677/acm.2025.152554

portability of smartphones with the high sensitivity and low-cost advantages of colorimetric analysis, demonstrating significant application value in biomarker detection. Biomarkers are widely used in disease diagnosis, therapeutic efficacy evaluation, and prognostic monitoring. Recent studies have shown that smartphone-assisted colorimetric analysis enables rapid and accurate detection of various biomarkers, offering unique advantages particularly in resource-limited settings and point-of-care testing. This paper systematically reviews the latest research progress of smartphone-based colorimetric analysis technology in the detection of various biomarkers, explores its future development directions in medical diagnostics, and discusses potential challenges and corresponding solutions.

Keywords

Smartphone, Colorimetric Analysis, Biomarker, Detection

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

生物标志物检测在医学诊断、疾病监测和个体化治疗中具有重要意义。生物标志物是体内可以测量和具体评估的生物物质,能够反映疾病的发生、发展及预后,因此在疾病的早期诊断和健康管理中起到非常关键的作用[1]。例如,肿瘤标志物的检测不仅有助于肿瘤的早期诊断,还可通过监测标志物的变化水平来评估及预测治疗的效果以及复发风险。如甲胎蛋白(AFP)、癌胚抗原(CEA)等,能为特定癌症提供重要的临床信息[2]。此外,感染性疾病标志物检测在快速识别病原体、监测感染严重程度以及评估治疗效果方面同样具有非常重要的价值。比如,通过病原体检测可及时发现细菌或病毒感染,特别是在疫情暴发时期,标志物的快速检测对于控制疾病传播、制定公共卫生政策以及优化医疗资源分配起到关键作用[3]。

目前生物标志物检测方法种类繁多,但传统的检测手段仍然存在显著局限性。许多检测技术如:酶联免疫吸附测定(ELISA)、聚合酶链反应(PCR)、流式细胞术、质谱分析等均需要依赖于大型的实验室设备、专业的技术人员和严格的样品处理步骤[4][5]。这不仅使得检测成本高昂,还导致样本运输和分析过程中的时间大大延长,特别是在需要即时诊断的场景下。这些缺点在资源有限的地区尤为显著,由于医疗设施、专业设备和专业人员的缺乏,很难满足高效快速的检测需求。比色分析作为一种重要的检测技术,近年来在生物标志物检测领域得到了广泛应用。比色分析的关键优势在于其能够提供快速、简便且低成本的检测方案。特别是基于颜色变化的检测方法,因其直观地进行肉眼可视化结果分析而受到青睐[6]。例如,利用纳米材料的色谱传感器可以实现对多种生物标志物的同时检测,这在临床诊断中具有非常重要的意义[7]。此外,比色分析技术的便携性使其在即时检测(point-of-care testing, POCT)和低资源环境中展现出巨大的应用潜力[8]。

目前,随着智能手机技术的发展,基于智能手机的比色分析也逐渐成为研究热点,其结合了传统比色分析的优势和智能手机的便携性,使得生物标志物检测变得更的地方便和高效[9]。通过智能手机应用程序,我们可以轻松地获取检测结果,进一步推动了即时检测的便利性[10]。研究表明,智能手机与比色分析法的结合,可以显著地提高检测灵敏度,以提供快速、无创的生物标志物检测方法[11]。例如,Krometriks 等人利用智能手机辅助比色分析实现了对 miRNA 的快速检测,灵敏度与传统实验室设备相当

[12]。而有些智能手机比色传感器的检测限能低至纳摩尔级别, 且在实际应用中表现出了良好的重复性[13]。因此, 在快速、便携和低成本的检测需求日益增长的背景下, 基于智能手机的比色分析在许多应用场景中展现出优越性[14]。

本文就智能手机比色分析技术应用于生物标志物检测的应用原理、研究现状和未来展望及挑战进行了综述。期望为相关领域的研究与应用提供有价值的参考, 助力智能手机比色分析在生物标志物检测中的更广泛应用与深入发展。

2. 智能手机在比色分析中的应用

2.1. 比色分析的原理和特点

比色分析基于溶液颜色变化来判断检测目标物质浓度的经典分析技术, 其核心原理在于比色反应中的吸光度变化。具体而言, 目标物质与试剂反应后生成可见色素以引起溶液颜色改变, 从而通过测量吸光度或颜色强度的变化来进行定量分析。比色分析通常利用紫外-可见光光谱法, 通过测定光吸收强度与溶质浓度之间的线性关系实现浓度的准确测定[15]。

比色分析技术因其操作简便、快速和成本低廉的特点, 特别适合资源有限的环境及现场即时检测。相比依赖复杂设备的其他检测技术, 比色分析可直接通过颜色变化的可视化结果快速评估样品特征, 具备强大的应用潜力[16]。然而, 比色分析也存在一些局限性。例如, 其结果对外界环境光照条件高度敏感, 在不同照明环境中可能干扰颜色的稳定性导致分析结果不稳定。此外, 传统比色分析在低浓度样本检测中的灵敏度和精度也存在不足, 从而影响结果的可靠性[17][18]。

总体而言, 比色分析技术高效实用, 目前在实验室中得到了广泛的应用, 但应用在复杂场景中时需要依赖技术的进一步改进, 如智能手机辅助技术的引入提升其灵敏度、稳定性、实用性等。

2.2. 智能手机辅助比色分析

智能手机与比色分析技术的结合在精度、灵敏度和易用性方面远远优于传统比色分析方法。传统方法在没有紫外分光光度计等设备的情况下只能依赖肉眼判断颜色变化, 这种较强的主观性可能导致结果不稳定。智能手机通过高分辨率摄像头和先进的图像处理技术, 可以消除人眼的主观误差, 提供更准确的定量结果, 并在低浓度标志物检测和复杂样本分析中表现出更高的灵敏度和可靠性[18][19]。

确切地说, 智能手机的摄像头能够精准捕捉低浓度样本的颜色变化, 并通过相关图像分析软件, 建立颜色强度与浓度的线性关系, 自动进行定量分析。手机内置的 LED 光源和光传感器可以提供稳定的光照环境, 保障图像质量获取的稳定性[20]。其他硬件功能(如光学防抖功能等)还能进一步优化了拍摄的稳定性, 以确保颜色捕捉更加准确。在数据处理方面, 智能手机中的图像分析软件可以通过噪声去除、颜色校正和图像增强技术等增强灵敏度和可靠性。此外, 还可以结合智能手机实时数据显示和远程数据传输功能, 为远程医疗和快速诊断提供更加强有力的支持[21]。智能手机还具有良好的硬件扩展性, 能通过 USB、无线或蓝牙接口连接外部设备(如微流控芯片和纳米传感器等), 与智能手机协同工作, 进一步提升比色分析的多功能性和检测精度。例如, 微流控芯片可自动处理样品并将其导入检测区域, 结合智能手机摄像头和光源, 构成一套高效的检测系统, 进行快速的生物标志物定量分析[22]。

智能手机辅助比色分析技术不仅提升了比色分析的性能, 还极大地扩展了其应用范围, 为资源有限地区、个性化健康管理及即时检测领域提供了低成本、高效便捷的解决方案。未来, 通过进一步整合硬件与软件资源, 智能手机比色分析技术有望在医疗诊断、药物检测、食品环境监测等领域发挥更大的作用。

3. 生物标志物检测中的应用

3.1. 肿瘤标志物

智能手机辅助比色分析技术在肿瘤标志物检测中展现了显著的应用价值和广阔的前景。针对不同的肿瘤标志物, 多个研究已开发了基于智能手机的检测平台, 并取得了重要成果。Junjie Liu 等人针对 AFP 开发了基于功能化金纳米粒子的智能手机比色分析系统通过颜色变化实现定量分析, 检测限达 0.083 ng/mL, 灵敏度达到 90.81%, 特异性较高[23]。Yanlin Wang 等人基于离心芯片的检测系统通过颜色变化实现了对 CEA、CA125 和 EGFR 等乳腺癌相关标志物的多重分析, 该系统通过智能手机实现即时数据分析, 并能在 10 min 内得到结果[24]。Jinying Liu 等人设计了一种荧光和比色双模式智能手机检测平台针对卵巢癌早期重要标志物 β -半乳糖苷酶的检测实现了检测限低至 1.36 U/L, 可直接用于患者样本的检测, 提供了早期诊断的新方向[25]。

Peng Liu 等人前列腺癌的早期标志物 Sarcosine 的检测采用基于纳米酶的比色和荧光双模检测方法, 通过智能手机读取结果。研究显示, 该平台的比色检测限为 120 pM, 且能够在尿液样本中实现非侵入性检测。这种方法为前列腺癌早期诊断提供了简单且高效的工具[26]。Xiaoya Liu 等人利用微流控芯片和纳米酶技术, 该平台通过智能手机捕捉颜色变化, 实现了对血液和粪便样本中循环肿瘤干细胞的高灵敏度检测, 检测下限低至 3 cells/mL。在早期筛查和病程监测中具有巨大潜力, 尤其适合家庭检测和随访[27]。Asmita Mojumdar 等人使用金纳米粒子与多胺分子相互作用引发比色变化, 并通过智能手机分析 RGB 值变化, 用于口腔癌标志物的快速检测。该方法能够在人工唾液中实现高灵敏度检测, 特异性较强, 且操作简便, 非常适合资源有限地区的初筛工作[28]。智能手机辅助比色分析技术在肿瘤标志物的早期检测中展现出高灵敏度、低成本和便携性的显著优势, 这些研究成果为推动智能手机技术在肿瘤检测领域的广泛应用奠定了坚实基础。

3.2. 感染性疾病标志物

智能手机比色分析技术在感染性疾病标志物的检测中展现出快速、便携和高效的诊断潜力, 为感染性疾病的早期诊断和实时监测提供了重要支持。以下研究结合比色分析和智能手机技术, 探讨了其在不同感染性疾病检测中的具体应用。Yaning Liu 等人针对呼吸道合胞体病毒(RSV)开发了一种金纳米棘颗粒(AuNU)增强的等离子体耦合分析智能手机光谱仪检测平台, 检测限达到 17 copies/ μ L, 操作简单, 灵敏度提升至目前市面快速抗原检测方法的数倍[29]。Nelson Odiwuor 等人开发了智能手机比色检测系统可用于猴痘病毒(Mpox)和新冠病毒(SARS-CoV-2)双检测, 其检测限为 10 copies/ μ L, 诊断 Mpox 的灵敏度为 93.8%, SARS-CoV-2 为 96%, 特异性均达 100%, 结果快速且适用于非专业人员操作[30]。Qiulan Li 等人针对细菌内毒素(LPS)开发了一种基于 Fe、Cu 掺杂碳点的双模式比色-荧光智能手机传感器, 检测限低至 0.036 EU/L, 在真实注射样本中的回收率为 89%~101.3%, 适合用于快速评估内毒素含量[31]。

Xiao Zhou 等人基于葡萄糖代谢的比色传感器阵列, 利用智能手机分析 RGB 信号分析, 成功区分了 11 种细菌, 并可以评估抗生素的最小抑制浓度(MIC), 为快速抗生素敏感性测试提供了新方法[32]。Hong Duan 等人针对伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)开发了一种非酶级联放大的比色免疫分析方法, 可以通过智能手机实现自动化结果读取。检测限低至 16.8 CFU/mL, 操作时间为 1 h, 灵敏度较传统 ELISA 提升了 3 个数量级[33]。Cagla Celik 等人基于紫甘蓝提取物中花青素的 pH 依赖性颜色变化构建快速比色检测方法, 通过智能手机图像分析 ΔE 值实现了尿素酶阳性细菌的定量检测, 检测限低至 10 CFU/mL, 检测时间为 150~180 min, 其利用智能手机辅助分析提升了人眼未能观察到的低浓度样本的检测精度[34]。Rong Deng 等人基于智能手机的光学平台, 通过比色 ELISA 实现高通量 C 反应蛋白(CRP)、降钙素原(PCT)、血清淀粉样蛋白 A(SAA)的多靶标检测, 利用智能手机的便携性和自定义 App, 实现自动化数据

处理和即时检测, 无需专业操作人员[35]。综上所述, 智能手机比色分析技术在感染性疾病标志物检测中同样展现出了高灵敏度、便捷性和操作简易等显著优势。这些技术不仅加快了感染性疾病的诊断速度, 还推动了家庭检测和资源有限地区的疾病筛查, 具有重要的临床价值和社会意义。

3.3. 代谢性标志物

常见的代谢性生物标志物包括葡萄糖、尿酸、蛋白质及其他代谢产物, 这些标志物的检测对于疾病的早期诊断和健康监测至关重要[36]。智能手机辅助比色分析技术在代谢性生物标志物检测中表现出许多优势, 其操作简便, 无需专业技术人员, 适合家庭和临床即时检测。Zongxiao Cai 等人针对全血中的葡萄糖和红细胞压积(HCT)开发了一种折叠式纸基微流控设备(μ PAD)和 3D 打印智能手机盒, 实现血浆分离与比色反应, 并在临床样本中验证了其可靠性, 适合家庭和基层医疗应用[37]。Madeleine Flaucher 等人开发了一种尿检试纸, 可基于智能手机通过神经网络和色彩匹配算法分析颜色变化同时检测尿液中的葡萄糖、蛋白质、胆红素、亚硝酸盐等 10 种常规生物标志物。检测准确率超过 85.5%, 特异性测试达到 98.6%, 并验证了在家庭环境中的可行性[38]。Shuaiwen Li 等人基于空心 MnO_2 纳米酶(H- MnO_2)的多酶模拟活性开发了一种智能手机辅助比色检测方法, 可联合检测肝功能标志物谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、碱性磷酸酶(ALP), 实现快速、便携的肝功能检测[39]。

Ana M. Ulloa-Gomez 等人利用金纳米颗粒修饰的无标记适配体传感器, 通过智能手机读取比色信号血清中的肌钙蛋白 T, 检测限为 0.39 ng/mL, 适合心肌梗死(AMI)的即时检测, 且比传统 ELISA 检测方法速度更快[40]。Kaijing Yuan 等人通过智能手机比色分析技术为肌酐的即时定量检测提供了一种创新方案, 所需设备仅包括一支激光指示器和智能手机, 总成本极低, 操作简单, 且将分析灵敏度提高 90 至 2334 倍, 特别适合资源受限的环境[41]。Meiling Chen 等人提出了一种基于铂、磷共掺杂碳氮化合物纳米酶(PtCNP2)的胆固醇检测平台, 可结合智能手机实现视觉和荧光双模式通过 RGB 值实时分析胆固醇浓度[42]。Suticha Chunta 等人设计了微尺度比色分析套件, 通过智能手机拍摄并分析多参数的颜色反应, 可在 12 min 内完成血糖(Glu)、总蛋白(TP)、白蛋白(HSA)、尿酸(UA)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TGs) 6 项常规健康检查血液关键指标检测, 为个性化健康管理和移动医疗的发展开辟了新路径[43]。综上所述, 智能手机比色分析技术为家庭健康监测、个性化医疗及资源受限地区的疾病筛查提供了切实可行的解决方案。这些研究成果为代谢性标志物检测的普及化与精准化应用奠定了技术基础。

3.4. 其他生物标志物

智能手机比色分析技术不仅在疾病诊断中具有重要应用, 还可广泛用于药物监测等领域, 通过快速筛查药物浓度, 避免药物滥用及相关风险。以下研究展示了智能手机比色分析技术在药物监控中的典型应用: 异烟肼是关键的抗结核药物, 高浓度可能导致严重的不良反应, Neda Azizi 等人基于硫、氮掺杂碳点和钴氧化物纳米片的双模智能手机比色传感器实现便携式检测, 最低检测限为 4.0 μM [44]。巴氯芬是一种 γ -氨基丁酸(GABA)受体激动剂, 但因其滥用潜力和窄治疗指数使其成为高风险药物, Abd el-Aziz 等人根据巴氯芬与萘醌磺酸盐(NQS)在碱性环境中反应生成可见颜色变化采用智能手机比色分析 RGB 值, 有助于治疗监控和快速医疗干预[45]。Ping Tan 等人提出了一种基于深度学习辅助逻辑门和智能手机集成检测平台, 结合荧光和比色双模式, 实现了四种四环素类抗生素的实时识别和定量检测。并使用自研微信小程序“96 Speckles”和深度学习模型(YOLOv5 和 YOLOv8 算法)可同时对 96 孔板的图像进行实时处理和数据提取[46]。

智能手机辅助比色分析技术在生物标志物检测领域展现了显著的应用潜力, 研究表明, 基于智能手机的比色分析平台在肿瘤标志物检测中, 如 AFP、CEA、CA125、EGFR 等, 已成功实现高灵敏度和高特异性的定量分析, 且检测限达到了临床应用标准。感染性疾病如 RSV、猴痘病毒、新冠病毒等的快速检

测也通过智能手机平台得到了显著改进, 检测限可低至 10 拷贝/ μL 。代谢性标志物检测方面, 智能手机比色分析技术成功应用于血糖、肝功能等标志物的实时检测, 具有高度的便捷性和准确性, 适合家庭健康监测及基层医疗。除了疾病检测, 智能手机比色分析还在药物监控中获得了广泛应用, 特别是在抗结核药物和抗生素的浓度监测上, 提供了简单且高效的解决方案。

尽管智能手机比色分析技术在生物标志物检测中展现出诸多优势, 但仍存在一些局限性。首先, 环境光变化可能会影响智能手机拍摄图像的准确性, 尽管部分研究设计了专用的手机拍摄小黑盒以减少干扰[23][26], 但仍有研究未提及这一点, 可能导致结果的不稳定。其次, 图像处理技术的准确性以及智能手机硬件性能的差异, 可能会影响检测结果的可重复性[28][31]。尽管许多研究通过额外的光源控制和算法优化来缓解这些问题, 但这些变量仍难以完全消除。此外, 尽管智能手机比色分析方法具有低成本优势, 但对于某些复杂标志物或多重靶标的检测, 仍需一定的样本预处理步骤, 增加了操作的复杂性[25]。综上所述, 虽然智能手机比色分析技术在生物标志物检测中具有广泛的应用前景, 但仍需进一步优化技术, 克服现有缺点, 以提升其在临床和大规模筛查中的实际应用价值。

4. 未来展望与挑战

4.1. 未来研究方向

4.1.1. 技术整合与多功能检测

未来, 智能手机比色分析还将继续朝着技术整合与多功能化检测的方向迈进。通过与各种传感技术(如电化学传感器、光谱分析和比色分析技术)的结合同时实现多种生物标志物的检测[47], 在一个平台上集成多功能检测能力, 为全面的健康监测提供丰富的数据支持。使用者能够实时跟踪监测多种健康指标, 并可以自由按需求搭配, 如血糖、肿瘤标志物和感染性疾病标志物等, 从而显著提升个性化医疗的效果。这种多种标志物联合检测的技术突破, 不仅满足了个体化检测的需求, 也为精准医疗和动态健康管理奠定了坚实的基础。

4.1.2. 人工智能与大数据分析

人工智能(AI)和大数据分析技术的快速发展也为智能手机比色分析带来了巨大的可能性[48]。如基于机器学习和深度学习算法, 可以优化检测图像的处理和数据分析流程, 从而提高检测的灵敏度和准确性。AI 还能够通过分析历史数据, 识别健康趋势, 提供个性化的健康建议和疾病预警。同时, 大数据分析技术能够挖掘大量用户数据中的潜在的疾病模式, 帮助医疗科研人员揭示疾病的传播及发生发展规律, 为公共卫生政策的制定提供科学依据。这种 AI 与大数据分析的检测体系, 不仅提升了个体健康管理的质量, 还推动了社会健康管理事业的进步。

4.1.3. 云计算与远程医疗

云计算与远程医疗技术的引入也将为智能手机比色分析系统提供更强大的互联互通能力。如用户的检测数据可以通过云平台实时上传并与相关医疗机构共享, 从而实现远程监测。远程医疗模式的普及, 不仅能够提升患者的健康管理能力, 还使医疗服务更加便捷, 尤其是对偏远地区和资源有限区域的患者具有重要意义。此外, 云平台的应用可以整合和分析大规模的健康数据, 为公共卫生监测、疾病防控和流行病预警提供更加精准的支持, 进一步助力于医疗系统向数字化、智能化方向迈进。

4.2. 面临的挑战与解决策略

4.2.1. 数据隐私与安全性

未来, 随着智能手机比色分析技术的广泛应用, 数据隐私与安全性等问题也将逐渐凸显。许多智能

手机应用程序在实现检测功能的同时, 需要采集和存储用户的健康数据, 而这些数据往往包含了敏感的个人信息。一旦数据保护措施不足, 可能会导致隐私泄露, 从而威胁用户安全。因此, 开发人员需要在设计相关应用程序之初, 就必须优先考虑数据加密和用户隐私的保护, 采用加密技术及分布式存储等措施, 以确保用户数据的安全性和私密性, 增强用户对技术的信任。

4.2.2. 标准化与法规制定

尽管智能手机比色分析在生物标志物检测中的应用已有大量深入研究, 但在标准化方面仍缺乏系统性研究。目前, 大部分研究主要集中在智能手机获取比色图像的单一标准化, 或在数据分析阶段进行标准化。随着这一技术的普及与发展, 迫切需要建立统一的技术标准与法规体系, 以提高检测的准确性和可重复性, 增强医务人员与患者的信任。目前, 设备多样性、试剂非标准性及缺乏统一操作流程, 可能会限制其在临床应用中的推广。因此, 相关行业应积极推动技术标准的制定, 明确设备性能、试剂质量标准及操作规范, 以确保检测结果的一致性和可靠性。同时, 应加快出台政策, 将智能手机比色分析纳入医疗诊断监管, 确保其合规性与伦理要求。

4.2.3. 教学培训与公众意识提升

为推动智能手机比色分析技术的普及与应用, 提升大众和医疗人员的相关培训水平至关重要。由于许多使用者对比色分析技术的操作步骤和结果解读可能缺乏相应的了解, 可能影响其实际应用效果。因此, 未来还应开发配套的简单易懂的教学资料、视频教程或在线培训课程, 帮助掌握比色分析操作流程及数据解读。此外, 医疗机构可以通过举办专业培训班, 提升医疗从业人员对该技术的熟悉程度, 促进其在临床环境中的应用。同时, 应加强公众宣传, 提升社会对智能手机健康监测技术的认知, 强化其在日常健康管理中的作用, 以推动智能手机比色分析技术的广泛应用。

综上所述, 智能手机比色分析技术作为目前新兴的检测技术手段, 其便携性、低成本和高灵敏度等优势为资源有限地区和现场即时检测提供了高效可行的解决方案, 在各种生物标志物的检测中展现出显著优势, 能够有效支持各种临床应用场景。智能手机比色分析技术能够随时随地进行检测, 无需依赖实验室设备和人员, 大幅缩短监测时间, 在流行病暴发或筛查紧迫等即时检测场景中尤为重要。然而, 未来发展和推广仍面临标准化不足、数据隐私保护和普及应用等多方面挑战。未来, 随着多功能技术整合、人工智能和大数据分析的引入, 以及云计算支持的远程医疗发展, 智能手机比色分析技术有望进一步提升检测的精准性和实用性, 为精准医疗、个性化健康管理和公共卫生应对提供创新解决方案, 并推动医疗资源的普及化与公平化, 具有重要的社会和经济意义。

基金项目

四川省科技计划(MZGC20240006); 成都中医药大学“杏林学者”课题研究自由探索专项(ZYTS2024007)。

参考文献

- [1] Zhou, Y., Tao, L., Qiu, J., Xu, J., Yang, X., Zhang, Y., *et al.* (2024) Tumor Biomarkers for Diagnosis, Prognosis and Targeted Therapy. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, **9**, Article No. 132. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01823-2>
- [2] Nair, M., Sandhu, S.S. and Sharma, A.K. (2018) Cancer Molecular Markers: A Guide to Cancer Detection and Management. *Seminars in Cancer Biology*, **52**, 39-55. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2018.02.002>
- [3] Miyamura, S., Oe, R., Nakahara, T., Koresawa, H., Okada, S., Taue, S., *et al.* (2023) Rapid, High-Sensitivity Detection of Biomolecules Using Dual-Comb Biosensing. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 14541. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41436-3>

- [4] Swanson, D.M., Pearson, J.M. and Evans-Nguyen, T. (2021) Comparing ELISA and LC-MS-MS: A Simple, Targeted Postmortem Blood Screen. *Journal of Analytical Toxicology*, **46**, 797-802. <https://doi.org/10.1093/jat/bkab104>
- [5] Hosseini, S., Vázquez-Villegas, P., Rito-Palomares, M. and Martínez-Chapa, S.O. (2017) Advantages, Disadvantages and Modifications of Conventional Elisa. In: *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, Springer, 67-115. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6766-2_5
- [6] Jin, Z., Yim, W., Retout, M., Housel, E., Zhong, W., Zhou, J., et al. (2024) Colorimetric Sensing for Translational Applications: From Colorants to Mechanisms. *Chemical Society Reviews*, **53**, 7681-7741. <https://doi.org/10.1039/d4cs00328d>
- [7] Pinheiro, T., Marques, A.C., Carvalho, P., Martins, R. and Fortunato, E. (2021) Paper Microfluidics and Tailored Gold Nanoparticles for Nonenzymatic, Colorimetric Multiplex Biomarker Detection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 3576-3590. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c19089>
- [8] Mazur, F., Han, Z., Tjandra, A.D. and Chandrawati, R. (2024) Digitalization of Colorimetric Sensor Technologies for Food Safety. *Advanced Materials*, **36**, Article 240274. <https://doi.org/10.1002/adma.202404274>
- [9] Balbach, S., Jiang, N., Moreddu, R., Dong, X., Kurz, W., Wang, C., et al. (2021) Smartphone-Based Colorimetric Detection System for Portable Health Tracking. *Analytical Methods*, **13**, 4361-4369. <https://doi.org/10.1039/d1ay01209f>
- [10] Meng, R., Yu, Z., Fu, Q., Fan, Y., Fu, L., Ding, Z., et al. (2024) Smartphone-Based Colorimetric Detection Platform Using Color Correction Algorithms to Reduce External Interference. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **316**, Article 124350. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124350>
- [11] Celikbas, E., Ceylan, A.E. and Timur, S. (2020) Paper-Based Colorimetric Spot Test Utilizing Smartphone Sensing for Detection of Biomarkers. *Talanta*, **208**, Article 120446. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120446>
- [12] Krishnan, T., Wang, H. and Vo-Dinh, T. (2021) Smartphone-Based Device for Colorimetric Detection of Microna Biomarkers Using Nanoparticle-Based Assay. *Sensors*, **21**, Article 8044. <https://doi.org/10.3390/s21238044>
- [13] Park, J. (2024) Smartphone Based Lateral Flow Immunoassay Quantifications. *Journal of Immunological Methods*, **533**, Article 113745. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2024.113745>
- [14] Ramírez-Coronel, A.A., Alameri, A.A., Altalbawy, F., Sanaan Jabbar, H., Lateef Al-Awsi, G.R., Iswanto, A.H., et al. (2023) Smartphone-Facilitated Mobile Colorimetric Probes for Rapid Monitoring of Chemical Contaminations in Food: Advances and Outlook. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **54**, 2290-2308. <https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2164173>
- [15] Cole, K. and Levine, B.S. (2020) Ultraviolet-Visible Spectrophotometry. In: *Principles of Forensic Toxicology*, Springer International Publishing, 127-134. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42917-1_10
- [16] Myers, F.B., Moffatt, B., El Khaja, R., Chatterjee, T., Marwaha, G., McGee, M., et al. (2022) A Robust, Low-Cost Instrument for Real-Time Colorimetric Isothermal Nucleic Acid Amplification. *PLOS ONE*, **17**, e0256789. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256789>
- [17] Monogarova, O.V., Oskolok, K.V. and Apyari, V.V. (2018) Colorimetry in Chemical Analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, **73**, 1076-1084. <https://doi.org/10.1134/s1061934818110060>
- [18] Bao, X., Jiang, S., Wang, Y., Yu, M. and Han, J. (2018) A Remote Computing Based Point-of-Care Colorimetric Detection System with a Smartphone under Complex Ambient Light Conditions. *The Analyst*, **143**, 1387-1395. <https://doi.org/10.1039/c7an01685a>
- [19] Cardozo, J.C., Barbosa Segundo, I.D., de Medeiros Leandro, M.E., Gondim, A.D., Cavalcanti, L.N., dos Santos, E.V., et al. (2024) Decentralized and Cost-Effective Colorimetry Analysis by Smartphone-Based Method Digital Image for Monitoring Electrochemical Elimination of Dye from Water Matrices. *Journal of Solid State Electrochemistry*, **29**, 873-885. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06146-4>
- [20] Ciaccheri, L., Adinolfi, B., Mencaglia, A.A. and Mignani, A.G. (2023) Colorimetry by a Smartphone. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 88-93. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25706-3_15
- [21] Coleman, B., Coarsey, C. and Asghar, W. (2019) Cell Phone Based Colorimetric Analysis for Point-of-Care Settings. *The Analyst*, **144**, 1935-1947. <https://doi.org/10.1039/c8an02521e>
- [22] Feng, J., Jiang, H., Jin, Y., Rong, S., Wang, S., Wang, H., et al. (2023) A Device-Independent Method for the Colorimetric Quantification on Microfluidic Sensors Using a Color Adaptation Algorithm. *Microchimica Acta*, **190**, Article No. 148. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05731-0>
- [23] Liu, J., Geng, Q. and Geng, Z. (2024) A Route to the Colorimetric Detection of Alpha-Fetoprotein Based on a Smartphone. *Micromachines*, **15**, Article 1116. <https://doi.org/10.3390/mi15091116>
- [24] Wang, Y., Gao, W., Feng, B., Shen, H., Chen, X. and Yu, S. (2024) Surface Protein Analysis of Breast Cancer Exosomes Using Visualized Strategy on Centrifugal Disk Chip. *International Journal of Biological Macromolecules*, **280**, Article 135651. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135651>

- [25] Liu, J., Li, Z., Zhang, J., Wang, G. and Su, X. (2022) A Dual-Signal Fluorometric-Colorimetric Sensing Platform and Visual Detection with a Smartphone for the Determination of B-Galactosidase Activity Based on Fluorescence Silicon Nanoparticles. *Talanta*, **240**, Article 123165. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123165>
- [26] Liu, P., Sun, Q., Gai, Z., Yang, F. and Yang, Y. (2024) Dual-Mode Fluorescence and Colorimetric Smartphone-Based Sensing Platform with Oxidation-Induced Self-Assembled Nanoflowers for Sarcosine Detection. *Analytica Chimica Acta*, **1306**, Article 342586. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342586>
- [27] Liu, X., Fang, Y., Liu, J., Chen, X., Teng, F. and Li, C. (2024) Nanozyme-Based Pump-Free Microfluidic Chip for Colorectal Cancer Diagnosis via Circulating Cancer Stem Cell Detection. *ACS Sensors*, **9**, 5090-5098. <https://doi.org/10.1021/acssensors.4c00774>
- [28] Mojumdar, A., B S, U. and Packirisamy, G. (2024) A Simple and Effective Method for Smartphone-Based Detection of Polyamines in Oral Cancer. *Biomedical Materials*, **19**, Article 045044. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/ad581a>
- [29] Liu, H., Tian, Y., Xue, C., Niu, Q., Chen, C. and Yan, X. (2022) Analysis of Extracellular Vesicle DNA at the Single-Vesicle Level by Nano-Flow Cytometry. *Journal of Extracellular Vesicles*, **11**, e12206. <https://doi.org/10.1002/jev2.12206>
- [30] Odiwuor, N., Li, J., He, P., Wang, N., Murtaza, A., Jiang, M., *et al.* (2025) Facilitating Self-Testing with a Fast, Accurate, and Simplified Shelf-Stable Colorimetric LAMP System for Mpox and Sars-Cov-2 Detection. *Talanta*, **283**, Article 127119. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127119>
- [31] Li, Q., Li, J., Yang, D., Xiang, C. and Yang, Y. (2025) Dual-Mode Colorimetric-Fluorescence Biosensor for Endotoxin Detection Based on Cs@Fe,Cu/CDs-MnO₂ Nanomaterials. *Talanta*, **285**, Article 127330. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127330>
- [32] Zhou, X., Wu, H., Chen, X., Li, W., Zhang, J., Wang, M., *et al.* (2024) Glucose-Metabolism-Triggered Colorimetric Sensor Array for Point-of-Care Differentiation and Antibiotic Susceptibility Testing of Bacteria. *Food Chemistry*, **438**, Article 137983. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137983>
- [33] Duan, H., Qi, W., Wang, S., Zheng, L., Yuan, J. and Lin, J. (2022) Sample-in-Answer-out Colorimetric Detection of Salmonella Typhimurium Using Non-Enzymatic Cascade Amplification. *Analytica Chimica Acta*, **1218**, Article 339850. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339850>
- [34] Celik, C., Demir, N.Y., Duman, M., Ildiz, N. and Ocsoy, I. (2023) Red Cabbage Extract-Mediated Colorimetric Sensor for Swift, Sensitive and Economic Detection of Urease-Positive Bacteria by Naked Eye and Smartphone Platform. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 2056. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28604-1>
- [35] Deng, R., Chao, X., Li, H., Li, X., Yang, Z. and Yu, H. (2023) Smartphone-Based Microplate Reader for High-Throughput Quantitation of Disease Markers in Serum. *The Analyst*, **148**, 735-741. <https://doi.org/10.1039/d2an01571d>
- [36] Yeasmin, S., Ammanath, G., Ali, Y., Boehm, B.O., Yildiz, U.H., Palaniappan, A., *et al.* (2020) Colorimetric Urinalysis for On-Site Detection of Metabolic Biomarkers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 31270-31281. <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c09179>
- [37] Cai, Z., Jiang, M., Chuang, Y. and Kuo, J. (2024) Paper-Based Microfluidic Analytical Device Patterned by Label Printer for Point-of-Care Blood Glucose and Hematocrit Detection Using 3D-Printed Smartphone Cassette. *Sensors*, **24**, Article 4792. <https://doi.org/10.3390/s24154792>
- [38] Flaucher, M., Nissen, M., Jaeger, K.M., Titzmann, A., Pontones, C., Huebner, H., *et al.* (2022) Smartphone-Based Colorimetric Analysis of Urine Test Strips for At-Home Prenatal Care. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, **10**, 1-9. <https://doi.org/10.1109/jtehm.2022.3179147>
- [39] Li, S., Chen, Z., Yang, F. and Yue, W. (2023) Self-Template Sacrifice and *in Situ* Oxidation of a Constructed Hollow MnO₂ Nanozymes for Smartphone-Assisted Colorimetric Detection of Liver Function Biomarkers. *Analytica Chimica Acta*, **1278**, Article 341744. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341744>
- [40] Ulloa-Gomez, A.M., Agredo, A., Lucas, A., Somvanshi, S.B. and Stanciu, L. (2023) Smartphone-Based Colorimetric Detection of Cardiac Troponin T via Label-Free Aptasensing. *Biosensors and Bioelectronics*, **222**, Article 114938. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114938>
- [41] Yuan, K., Sun, Y., Liang, F., Pan, F., Hu, M., Hua, F., *et al.* (2022) Tyndall-Effect-Based Colorimetric Assay with Colloidal Silver Nanoparticles for Quantitative Point-of-Care Detection of Creatinine Using a Laser Pointer Pen and a Smartphone. *RSC Advances*, **12**, 23379-23386. <https://doi.org/10.1039/d2ra03598g>
- [42] Chen, M., Yang, Y., Chen, Q., Tang, L., Liu, J., Sun, Y., *et al.* (2024) Pt, p-Codoped Carbon Nitride Nanoenzymes for Fluorescence and Colorimetric Dual-Mode Detection of Cholesterol. *Analytica Chimica Acta*, **1297**, Article 342351. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342351>
- [43] Chunta, S., Jarujamrus, P., Prakobkij, A., Khongwichit, S., Ditcharoen, N., Pencharee, S., *et al.* (2024) Point-of-Care Blood Tests Using a Smartphone-Based Colorimetric Analyzer for Health Check-Up. *Microchimica Acta*, **191**, Article No. 402. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06463-5>

-
- [44] Azizi, N., Hallaj, T. and Samadi, N. (2021) A Turn Off-On Fluorometric and Paper-Based Colorimetric Dual-Mode Sensor for Isoniazid Detection. *Luminescence*, **37**, 153-160. <https://doi.org/10.1002/bio.4156>
- [45] Abd el-Aziz, M.O., Nadim, A.H., Monir, H.H., Nebesen, M. and Younis, S.E. (2023) Smartphone Based Colorimetric Point-of-Care Sensor for Abused Drugs: Case of Baclofen Determination in Urine. *BMC Chemistry*, **17**, Article No. 179. <https://doi.org/10.1186/s13065-023-01093-z>
- [46] Tan, P., Chen, Y., Chang, H., Liu, T., Wang, J., Lu, Z., *et al.* (2024) Deep Learning Assisted Logic Gates for Real-Time Identification of Natural Tetracycline Antibiotics. *Food Chemistry*, **454**, Article 139705. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139705>
- [47] Woodburn, E.V., Long, K.D. and Cunningham, B.T. (2019) Analysis of Paper-Based Colorimetric Assays with a Smartphone Spectrometer. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 508-514. <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2876631>
- [48] Mutlu, A.Y., Kılıç, V., Özdemir, G.K., Bayram, A., Horzum, N. and Solmaz, M.E. (2017) Smartphone-Based Colorimetric Detection via Machine Learning. *The Analyst*, **142**, 2434-2441. <https://doi.org/10.1039/c7an00741h>