
清华大学林金明教授——用于快速检测重金属离子的创新微流控技术 MDPI Chemosensors

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41108.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

清华大学林金明教授——用于快速检测重金属离子的创新微流控技术 MDPI Chemosensors。 论文标题：Innovative Microfluidic Technologies for Rapid Heavy Metal Ion Detection

论文链接：<https://www.mdpi.com/2227-9040/13/4/149>

期刊名：Chemosensors

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/chemosensors>

文章导读

重金属离子 (HMI) 污染对公共健康和环境安全构成重大威胁，亟需快速、灵敏且可现场部署的检测技术。传统方法如原子吸收光谱 (AAS) 和感应耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 存在成本高、流程复杂、缺乏便携性等局限。清华大学化学系林金明教授团队在 Chemosensors 期刊发表了一项研究，汇集了过去五年微流控技术在HMI检测方面的进展，强调其通过微型化、集成和自动化实现的变革潜力。

研究团队综合评价了微流控与尖端材料 (如石墨烯和量子点) 及检测机制 (电化学、光学和比色) 的协同效应，从而实现十亿分之一 (ppb) 级别的超微量检测。本研究重点介绍了新型设备架构，如基于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 的片上实验室 (LOC)、纸质微流控、3D打印系统和数字微流控 (DMF)，这些结构提供了无与伦比的便携性、成本效益和复用能力。此外，研究还解决了持续存在的挑战 (如选择性和可扩展性)，并提出了包括人工智能集成和可持续制造在内的未来方向，为下一代微流控解决方案提供了路线图，使其成为全球HMI监测不可或缺的工具。

研究过程和结果

重金属离子 (HMI) 是不可降解的环境污染物，主要来源于工业废弃物，通过食物链累积威胁生态与公共健康，可导致神经损伤、癌症等严重疾病。传统检测方法如原子吸收光谱、电感耦合等离子体质谱虽灵敏精确，但存在样品处理复杂、成本高、难以现场实时监测等局限。微流控技术凭借试剂消耗低、分析快速、便携集成及可同时检测多种金属离子等优势，结合石墨烯、量子点等纳米材料可实现ppb级超微量检测，成为传统方法的有力替代方案，尤其适用于现场实时监测

和去中心化测试场景。

1.微流控技术

微流控技术通过在微尺度通道内操控微升级液体，将样品制备、反应和检测等多步分析集成于单一平台，实现了重金属离子的高精度、低成本检测。常用制造材料包括PDMS、纸张、玻璃及各类聚合物，其中PDMS因经济可塑而广泛用于原型制作。碳纳米管、石墨烯、金属纳米颗粒等功能材料的引入显著提升了传感器的灵敏度与选择性。检测方法涵盖电化学 (如安培法、电位法) 和光学技术 (如荧光、比色法、SERS、SPR)，均可与微流控平台无缝集成。在样品处理方面，微流控技术通过微型化和自动化，克服了传统酸消解耗时长、试剂消耗大、易污染等缺点 (图1)。

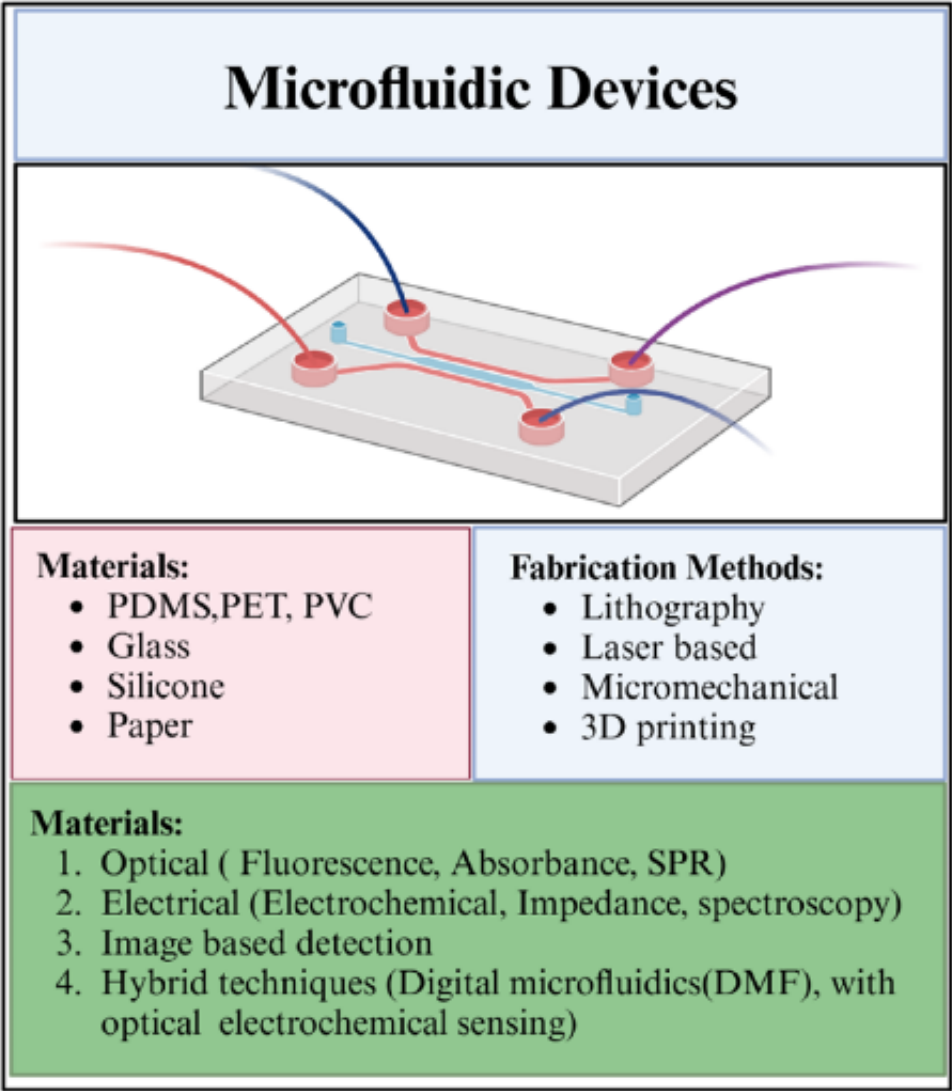


图1. 用于构建微流控器件的材料、制造和检测方法。

2.用于HMI检测的微流控器件创新

- 基于PDMS的机密接触点用于HMI检测

PDMS因其柔性、生物相容性、透明、低成本及易加工等优点，被广泛用于制造微流控器件。多个研究团队基于PDMS开发了用于重金属离子检测的微流控平台：例如，将PDMS器件与石墨烯氧化物适配体传感器集成，可同时检测 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} ，检测限分别低至0.70 ppb和0.53 ppb，优于WHO标准；基于PDMS/玻璃的SMAW微芯片通过信号转换与放大，实现了对 Pb^{2+} 的实时连续检测，检测限低至10-14M；结合氧等离子体处理PDMS与玻璃、采用罗丹胺衍生物化学传感器的便携微流控设备，对 Hg^{2+} 的检测限为0.031 μM ，具有高选择性、快速响应和低试剂消耗的特点；智能手机便携式PDMS比色设备利用金纳米颗粒聚集原理，可同时检测 As^{3+} 和 Hg^{2+} ，检测限分别为710 $\mu\text{g/L}$ – 1278 $\mu\text{g/L}$ 和10.77 $\mu\text{g/L}$ – 53.86 $\mu\text{g/L}$ (图2)。

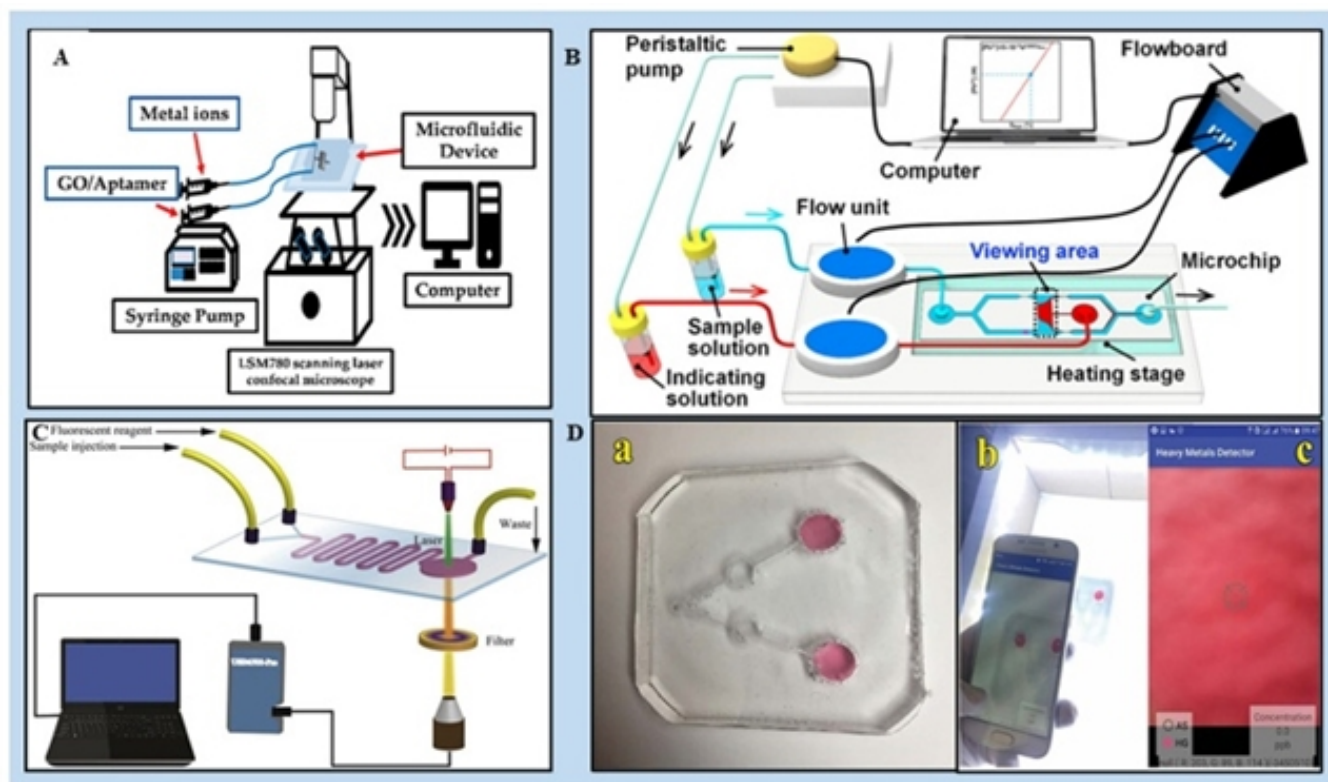


图2. 微流控装置 (MFD) 的示意图：(A) 展示了用于检测 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 监测系统的PDMS微流控装置。经Ruey-Jen Yang许可转载，见Micromachines；MDPI，2021。(B) 基于SMAW微芯片的 Pb^{2+} 检测平台设置。经Wei Wang许可转载，来源：《化学工程学报》；ELSEVIER，2021。(C) 展示了结合LIF在线荧光检测的流注微流控装置。经Jin-Ming Lin许可转载，来源：《光谱化学学报A辑》；ELSEVIER，2018。(D) 展示了制备的微流控试剂盒、智能手机成像平台及HMD移动应用程序。(a) 制备的微流控试剂盒，(b) 基于智能手机的成像平台，(c) HMD移动应用程序。图经Hasan Bagheri许可转载，RSC Advances，2018。

• 基于纸张的微流控技术用于HMI检测

微流控纸质分析设备 (μPAD) 因可生物降解、经济且可一次性使用，在资源受限地区的重金属检测中优势显著。近期研究通过集成适配体、金纳米颗粒、量子点及离子印迹聚合物等材料，结合比色法、荧光检测及智能手机图像分析等手段，实现了对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cr^{6+} 等多种重金属离子的高灵敏检测，检测限低至纳克至微克每升级别，部分达0.007 $\mu\text{g/L}$ – 0.015

$\mu\text{g/L}$ 。三维纸质设备、旋转混合器件及移动 μPAD 等创新设计进一步提升了检测性能与便携性(图3)。

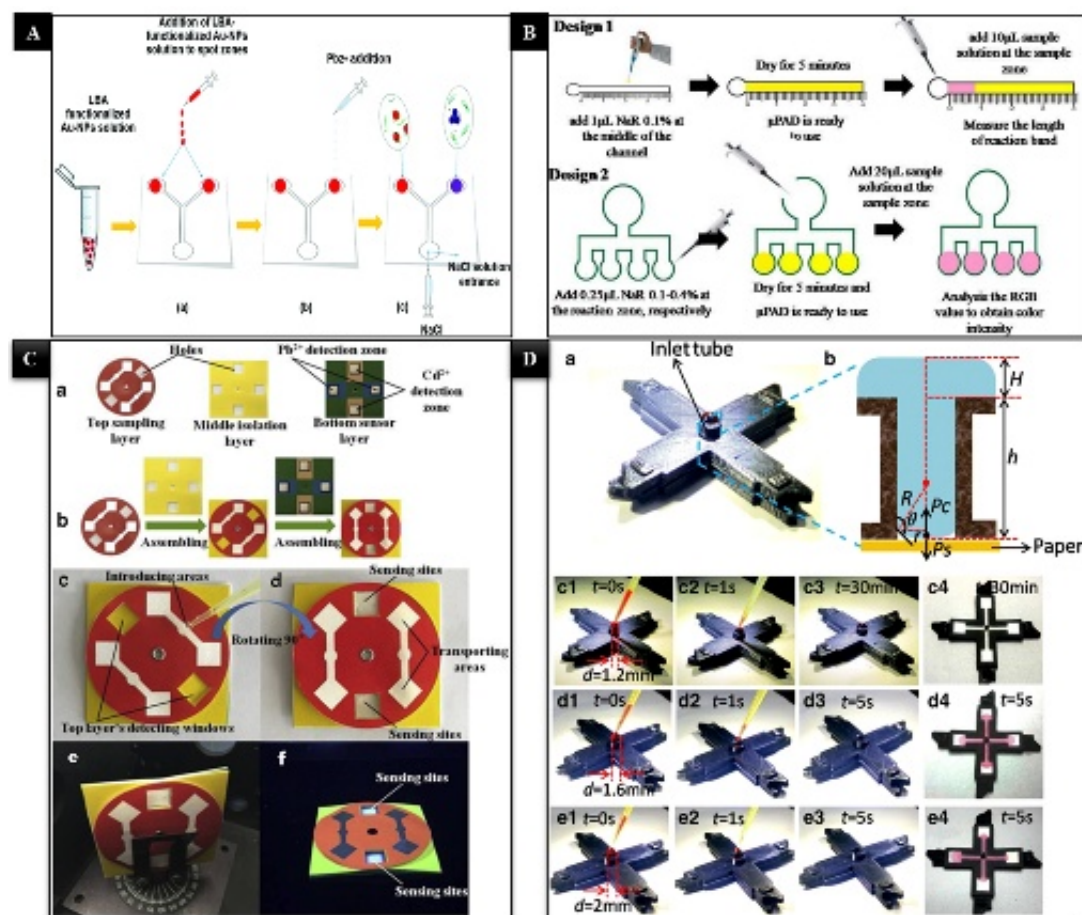


图3。

用于 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 和 Pb^{2+} 分析的微流控纸基生物传感器的设计、制备及检测机制示意图：(A) 用于 Pb^{2+} 检测的微流控纸基生物传感器示意图。经Morteza Hosseini许可转载自 Analytical Methods；RSC，2018。(B) 废水样本中 Pb^{2+} 的检测方法。经Akhmad Sabarudin许可转载，来源：IOP Conference Series: Materials Science and Engineering；IOP Publishing，2019。(C) 完整的离子印迹纸基芯片组装与检测。经Bowie Li许可转载，来源：Sensors and Actuators B: Chemical；ELSEVIER，2020。(D) 用于检测沿海水体中多种金属(包括 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Hg^{2+})的3D微流控纸基装置。经Yunhua Wang许可转载，Anal Bioanal Chem；Springer Nature，2021。

• 3D用于HMI检测的印刷微流控

3D打印技术为微流控器件带来了快速原型制作和可定制化设计，能够制造复杂多层结构以满足特定检测需求。多项研究表明：采用3D打印流动反应器与多孔碳电极检测 Pb^{2+} ，检测限为 0.0330 mg/L ；基于外延石墨烯的3D打印平台检测 Pb^{2+} ，检测限达 95 nM ；集成电化学传感器的3D打印微流控单元可同时检测 As^{3+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} ，检测限分别为 $2.4\text{ }\mu\text{g/L}$ 、 $1.2\text{ }\mu\text{g/L}$ 和 $0.8\text{ }\mu\text{g/L}$ ；基于 $\alpha\text{-MnO}_2/\text{GQD}$ 的移动电阻式装置检测 Pb^{2+} ，检测限低至 0.81 nM ；全3D打印金膜修饰电极检测 Hg^{2+} ，检测限为 $0.52\text{ }\mu\text{g/L}$ ；集成 Ca-MOF 的3D打印注射器实验室设备检测 Hg^{2+} ，检测限为 $0.6\text{ }\mu\text{g/L}$ ；采用3D Ag-rGO-f-Ni(OH) $_2$ /NF

复合材料的微流控传感器，在智能手机控制下检测河水中的 Pb^{2+} ，检测限低至 $0.00498 \mu g/L$ ，仅需300秒(图4)。

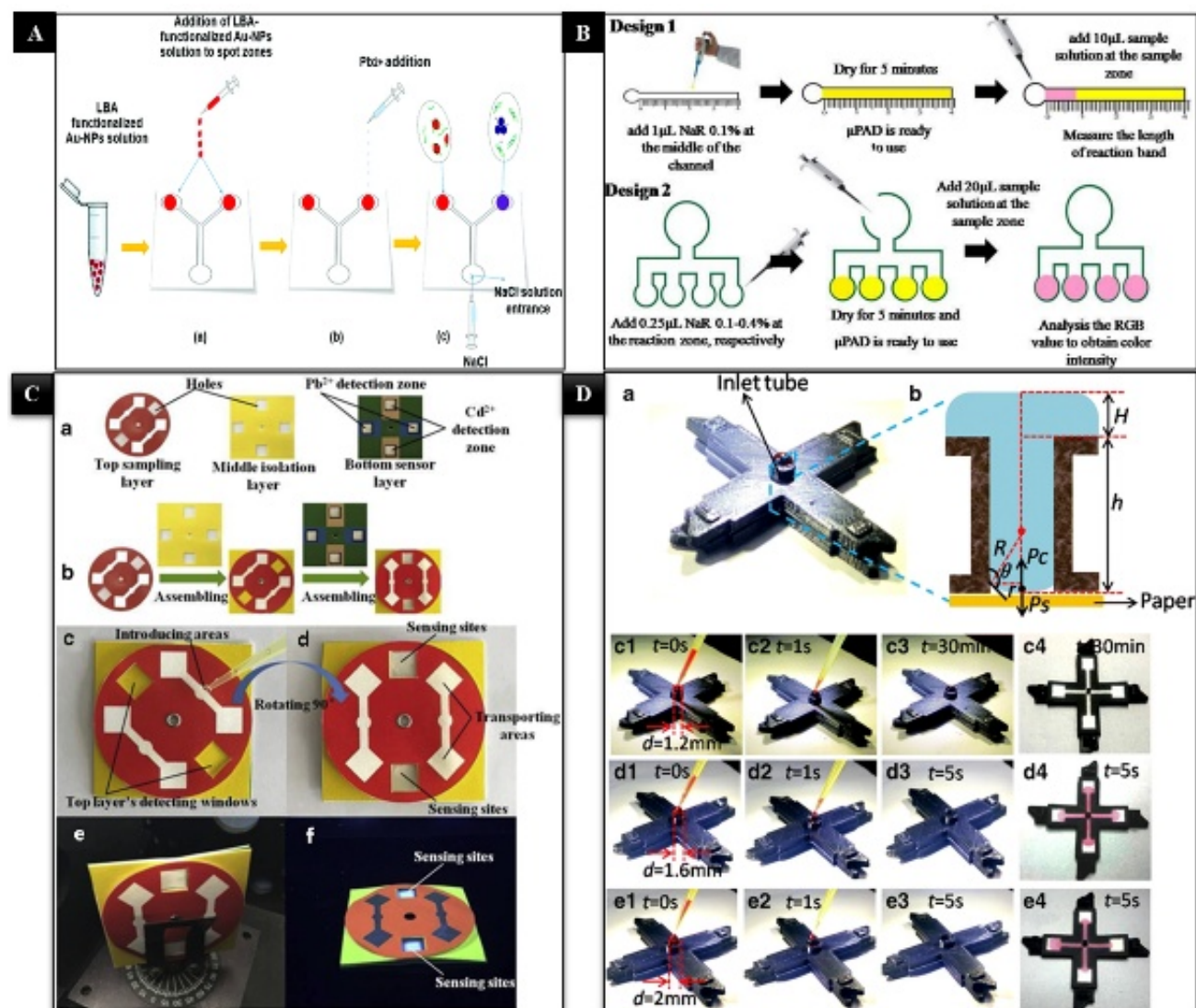


图4. 电化学分析与传感器平台的示意图：(A) 电化学分析流程——(a) 激光烧结；(b,c) 电化学传感器示意图及实物照片。经Shengyang Tao许可转载自 ACS Omega；ACS, 2021。(B) 传感器平台示意图。经Jens Eriksson许可转载，来源：Sensors (Basel)；MDPI, 2019。(C) HMI分析流注系统示意图。经Ashok Mulchandani许可转载，来源：Front Chem；Frontiers in Chemistry, 2022。(D) 采用便携式电阻装置和阻抗分析仪的纳米传感器制备及 Pb^{2+} 检测方案。经许可转载自Ashish Mathur，《IET纳米生物技术》；Wiley, 2021。

• 用于HMI检测的数字微流控 (DMF)

数字微流控 (DMF) 通过静电操控离散液滴在二维电极阵列上的运动，克服了传统连续流动微流控的局限，在重金属离子检测中展现出独特优势。研究表明：集成电化学传感器与DMF的平台可实现水中 Pb^{2+} 的自动检测，设备节能且适合长期部署；基于金纳米颗粒液滴电润湿特性的DMF芯片，对 Hg^{2+} 的检测限达 $0.01 \mu M$ ，具备无标记、低成本和自动化潜力；基于azine的荧光探针

集成于DMF芯片，通过聚集诱导发射增强效应选择性检测 Al^{3+} ，检测限为153 nM，低于WHO标准，并在天然水和饮用水中成功应用；DMF平台用于沿海海水中 Hg^{2+} 检测，通过微型化效应显著提升荧光探针灵敏度，并利用反馈控制回路解决盐度干扰问题，可在20秒内实现ppb级灵敏度、高选择性和稳定性，适用于定期及快速应急监测(图5)。

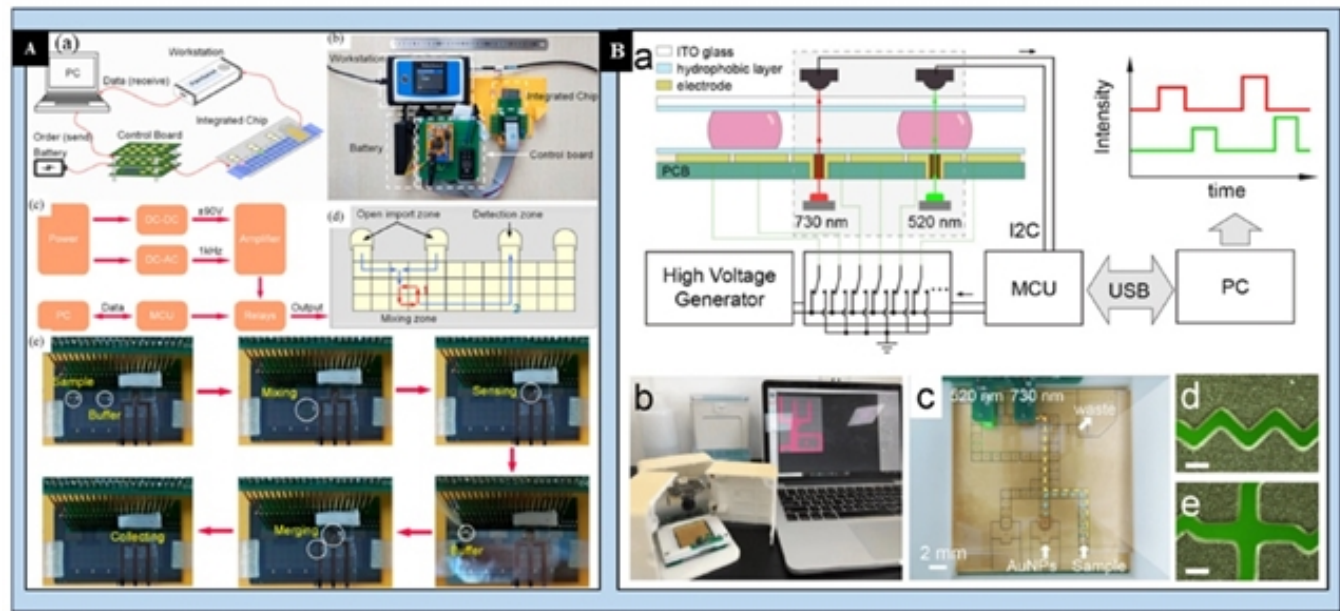


图5. 用于比色分析的DMF系统的示意图及功能概述：(A)—(a) 检测系统的示意图和(b) 实物照片。(c) 控制板框图。(d) 预处理DMF电极图案及液滴传输路径示意图。红色箭头表示滴液混合。(e) 摘自视频的图像，展示了样品进入、接受检测及移出的过程。经牛鹏飞许可转载，出自《纳米技术与精密工程》；AI P出版，2021。(B)—(a) 用于730 nm和520 nm波长比色检测的DMF系统设计。(b) DMF的快照。(c) 配备光学传感器的DMF。(d,e) 为交叉指状电极及间隙的显微图像。经Hui-Feng Wang许可转载，见 Micromachines (Basel)；MDPI，2021。

挑战、局限性及未来展望

微流控技术在重金属离子检测中虽具优势，但仍面临多项挑战：灵敏度和选择性易受环境因素干扰；纳米涂层稳定性不足；制造工艺的可扩展性与标准化规范仍有待完善；实验室性能与现场应用存在差距；商业化受制于高昂成本和材料依赖。未来研究应聚焦于人工智能集成(机器学习、实时校准、预警系统)、提升现场测试能力(设备耐用性、自动预处理、便携电源)、推进3D打印与纸质微流控等制造技术的研发落地，以及通过产学研合作实现商业化。通过上述努力，微流控技术有望成为高灵敏、高可靠、低成本的重金属检测工具，为守护人体健康与生态环境提供有力支撑。

文章总结

微流控技术克服了传统检测方法(AAS、ICP-MS)成本高、流程复杂、缺乏便携性等局限，凭借微型化、便携性、快速分析和低试剂消耗等优势，成为重金属离子检测的变革性解决方案。片上实验室、纸质微流控、3D打印等创新平台提升了设备的多功能性和可及性，而纳米材料、量子点的集成则显著提高了检测灵敏度与特异性，实现了超痕量检测。然而，当前仍面临在复杂环境

下兼顾高选择性与高灵敏度、推进商业化规模化生产等挑战。未来研究方向包括提高传感器稳定性与可重复性、集成人工智能与机器学习进行数据处理、发展多技术融合的一体化系统，以及开发环保、一次性、可持续的检测平台。总体而言，微流控技术有望成为全球重金属污染监测与治理的重要工具。

引用格式：

Rauf, M.F.; Lin, Z.; Rauf, M.K.; Lin, J.-M. Innovative Microfluidic Technologies for Rapid Heavy Metal Ion Detection. Chemosensors 2025, 13, 149.

Chemosensors期刊介绍

主编：Nicole Jaffrezic-Renault, CNRS/University of Franche-Comté, France; Jin-Ming Lin, Tsinghua University, China

期刊范围涵盖化学传感理论；机理和检测原理；开发、制造技术；化学分析方法在食品、环境监测、医药、制药、工业、农业等方面的应用。

2025 Impact Factor：4.4

2025 CiteScore：8.1

Time to First Decision：19.8 Days

Acceptance to Publication：3.7 Days

来源：Chemosensors

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发