

注：北京市教育委员会科技发展计划面上项目（NO.KM201611232021）；国家自然科学基金项目（NO.61601037）；北京市优秀人才培养资助基金项目（NO.2014000020124G104）

摘要：目前我国水环境重金属污染严重，威胁人民的生命和财产安全。提供有效的手段可靠地检测出水体重金属的种类和浓度是解决水环境重金属污染问题的前提基础。综述了目前水质重金属分析仪的种类和检测原理，系统介绍了光学法、电化学法和生物化学法在水环境重金属检测中的应用，并对不同分析仪的性能、特点以及研究现状做出了较为详细的阐述，同时对水环境重金属分析仪的未来发展趋势做出了展望。

关键词：水环境；重金属分析；研究现状；发展趋势

中图分类号：X832

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2017)11-0007-09

收稿日期：2017-10-28

水环境重金属分析仪的研究现状及发展趋势

李玥琪¹ 胡敬芳^{2*} 邹小平² 高国伟^{1,2}

1. 北京信息科技大学自动化学院，北京 100192；2. 北京信息科技大学传感器重点实验室，北京 100101

一、引言

水体中重金属主要来自重工业开采、冶炼、加工过程的违规排放的废气、废水和废渣，水体中金属有利或有害不仅取决于金属的种类、理化性质，而且还取决于金属的浓度、价态和形态，即使有益的金属元素浓度超标，也会产生剧烈毒性，使动植物死亡，给人民生活用水带来严重威胁^[1]。

在过去，我国为谋求经济快速发展，走了不少“先发展后治理”的老路，现如今，我国已经是世界第二大经济体，习总书记在十九大报告中提出了要加快生态文明体制改革，建设美丽中国，实现中华民族永续发展。加快速水污染防治，实施流域环境和近岸海域综合治理。水环境重金属污染问题成为非常重要的民生问题，加速相关行业转型升级或淘汰出局成为必然。随着我国化工、冶金、地质、环保等相关领域的产业不断优化，在这些产业的优化过程中，必备的检测项目和检测需求必将随之增多，这将带给检测分析仪器行业无限机遇。

水质重金属分析仪应用于地表水、工业制程水和工业废水等水质中多种重金属在线分析，包括环保部《重金属污染综合防治“十二五”规划》中的一类和二类防控重金属项目^[2]。现在市面上的水质重金属分析仪的主要测量原理包括光学法、电化学法和生物化学法^[3]。光学法测量的是原子外层或内层电子能级改变的产生的发射、吸收或散射辐射的波长和强度，有较强的选择性，分析范围广，灵敏度高，但受限仪器大型，适用于实验室。电化学法是根据溶液中物质的电化学性质及其变化规律，建立电学量与被测物之间的计量关系，具有仪器简单、灵敏度高、易于微型化等优点，适合用于在线、实时检测水环境。生物化学法是利用生物大分子对待测物的特异性识别能力，当待测物与分子识别元件结合后，产生的复合物、光、热等信号转变为电信号或光信号等来进行定量分析，有强的特异性识别能力，反应迅速、分析成本低，受限于传感器的稳定性和一致性，还没有得到广泛商业化应用。

本文将从这三种基本检测原理出发,对水环境中重金属检测仪的研究现状进行分析讨论,对其发展趋势予以展望。

二、水环境重金属分析的研究现状

1、基于光学法的水环境重金属分析仪

在光学法^[4]中常用于检测水环境中重金属离子的方法有原子吸收光谱法、原子发射光谱法、光电比色法。

原子吸收光谱法 (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)^[5] 是利用不同元素的特征谱线不同,通过其原子蒸汽对特征辐射吸收的作用来进行元素分析。这种方法具有灵敏度高,较强的选择性的优点,能够检测大部分的金属元素,检测限在 ppm 级,少数金属的检测限可达到 ppb 级。

王增焕^[6] 等人以吡咯烷基二流代甲酸铵和二乙氨基二硫代甲酸钠为螯合剂,采用商品化的固相萃取柱,分离海水中的镉、铜、铅、镍和锌五种重金属,采用原子吸收光谱法进行定量测定。线性范围分别为 0.02μg/L、2.6μg/L、0.06μg/L、0.18μg/L 和 0.3μg/L,加标回收率为 93.8~104%。

原子发射光谱法 (Atomic Emission Spectroscopy, AES)^[7] 是根据不同化学元素的离子在热激发或电激发下,发射出的特征光波辐射不同来进行定性定量分析。

洪欣^[8] 等人提出了采用微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法来测定河流和湖泊沉积物中 11 中重金属元素 (Ag、Cd、Co、Cr、Mn、Ni、Pb、Sb、V、Zn)。各元素的检出限为 0.20~2.00mg/kg,回收率在 81.6~112%。方法准确度和精密度都满足河流和湖泊沉积物多种重金属离子同时检测的需求,有很强的实用性。

光电比色法^[3] 是光学分析法的一种,是将水样进行消解处理,水样中的目标重金属元素全部氧化为离子态,与显色剂发生络合反应,形成特定颜色的络合物,在一定的波长处,该络合物具有最大吸收,得到吸光度与待测物浓度呈线性关系,据此,测定未知离子络合物的吸光度就可以得出目标重金属离子的浓度。

李萌^[9] 等人设计了一款基于电化学和比色方法联用的方法来检测浑浊水样中的重金属离子 Cd²⁺、Pb²⁺、Cu²⁺,待测金属离子由于电化学吸附作用而沉积

在工作电极表面,加入特定的金属指示剂,通过比色法定量分析溶解的待测重金属离子浓度,这种方法为仪器的便携化提供了可能性。

在重金属仪器的快速蓬勃发展,也出现了基于光电比色法向着全自动方向发展的新型仪器——全自动间断化学分析仪^[10],它是目前离子领域分析技术的新突破。它将比色分析法的检测过程完全自动化,模拟人工操作,将样品、试剂和显色剂加入比色皿中产生颜色反应,其浓度与颜色成正比,经比色计检测透光强度,得到相应的峰值吸光度,再通过标准曲线自动计算得到相应的浓度,彻底消除了由人工因素产生的误差。

采用中科院长春光机所最新研制的光栅分光系统的 AutoChem 系列全自动间断化学分析仪 (图 1)^[11] 打破了国外对智能间断化学分析仪的垄断。用高质量的军用光栅代替传统的滤波片,引入波段连续覆盖的概念。试剂消耗量在微升级,几乎没有易消耗品。



图 1 AutoChem 系列全自动间断化学分析仪^[11]

基于这种光谱检测原理的仪器发展技术成熟,灵敏度高,但是普遍存在仪器体积大,不能用于现场测试,并且易受环境温度影响的缺点,这些缺点制约了它适应现在检测发展的能力。

2、基于电化学法的水环境重金属分析仪

电化学方法^[12] 应用于水环境中重金属检测主要离

子选择电极法、溶出伏安法、计时电流法。

离子选择电极法^[13]是一种电位法测量溶液中某些离子活度的指示电极，对溶液中的特定离子具有特殊的选择性响应。

梁荣宁^[14]等人检测海水中的汞离子，采用高灵敏度非对称聚合物膜旋转电极检测技术成功地将离子选择性电极的检出限降低至 1.9nmol/L。

溶出伏安法^[13]是最常用电化学分析法的一种，它将控制电位电解富集与伏安分析相结合的一种新的伏安分析技术，是通过记录电流 i 与电压 U 的函数曲线来对物质进行分析。根据溶出时工作电极上发生的是氧化反应还是还原反应，可将溶出伏安分析分为阳极溶出伏安法和阴极溶出伏安法。金属离子的定量分析多用阳极溶出伏安法。

陈冲^[15]等人设计了一套基于溶出伏安法的水体重金属现场快速检测仪，采用高精度低噪声放大器及电路设计提高这套系统的稳定性，选择玻碳电极做为工作电极，通过测定 Zn 和 Cu 两种重金属离子的溶出伏安特性曲线，相关系数分别高达 0.997 和 0.995，从而说明系统稳定可靠。

计时电流法^[13]是将电化学工作电极控制在一单电位阶跃或双电位阶跃后，记录响应电流与时间的函数关系，进而定量计算出电解质溶液中发生电化学反应的离子浓度。

陈旭海^[16]等人针对传统计时电流法在检测样品时出现的系统延迟造成偏差的问题，提出了一种引入经典控制理论中惯性环节来减缓电压上升的速度，经缓冲作用后，响应电流将会快速出现峰值，由峰值快速测出被测物浓度的解决办法，易拓展为多通道检测装置，适合大规模电化学电极阵列。实验以 $K_3[Fe(CN)_6]$ 为例，结果显示经过改进的计时电流法的峰电流是传统方法产生的 $i-t$ 曲线的信噪比从 17dB 上升到 62dB，灵敏度同时得到了显著提高。

宾俊^[17]运用 Savitzky-Golay 平滑法处理重金属电化学分析仪测量数据时出现的曲线噪声，用切线识别法校正基线漂移，最小二乘法拟合散点数据，得到曲线各区间的拟合函数式，在测量范围内，参比电极和工作电极之间的电压的测量拟合曲线相关系数为

0.9996，平均相对标准偏差为 0.27mV，与理论值非常接近，平均电流分辨率达到 2nA。用此仪器测量 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的混合溶液，两者的拟合曲线相关系数分别为 0.9932 和 0.9961。

基于电化学检测原理的分析仪易做到小型化、自动化、运行维护成本低，可以进行价态分析、在线检测和现场分析，测量的信号是电信号，不需要进行信号再转换灵敏度高，检测限可以达到 ppb 级，因此，受到越来越多重金属分析仪厂商青睐。

近几年，基于电化学检测原理的水环境重金属分析仪的发展除了追求更低的检测限，更高的灵敏度以外，研究人员将重心放在以下几个方面：

(1) 提高仪器的便携性、操作的简便性，发挥触摸屏优势，提高用户人机交互的体验

中科院长春应用化学研究所研制了一种 USB 插头式微型电化学分析仪^[18]，图 2 是整体外观示意图，真正地做到了微型化，不再需要独立供电，可以即插即用。同时电流测量范围为 1nA~5mA，电位范围为 -5~+5V，能满足常用电化学分析实验的要求。上位机采用 Borland Delphi 7.0 开发的 32 位应用程序，能实现包括线性扫描法、循环伏安法、计时电流法等多种电化学方法。

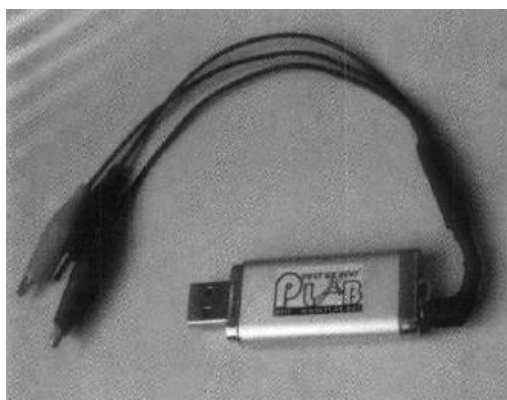


图 2 USB 插头式电化学系统外观图

现阶段国内外各大厂商都推出了基于电化学检测原理的便携式的水环境重金属分析仪的产品，主要包括两类：通用型和专项型。通用型水质重金属分析仪可以检测的重金属种类多，但通常灵敏度相对不高；

表 1 各大厂商的通用型便携式水环境重金属分析仪（图 3）性能特点比较

厂商及型号	体积 / 重量	测试原理	测量范围	产品特点	数据存储模式	人机交互界面
美国 HACH 公司 HQd 台式 / 便携式水质分析仪 ^[19]	430g	电化学方法	pH、电导率、溶氧量（LDO），LBOD、ORP、钠、铵、氨、硝酸盐、氯	可以自动识别电极，具备数据追溯性，数据可以和样品 ID、用户 ID、电极序号相关联	USB 传输	大屏幕，多参数，多项目显示
上海雷磁公司 SJB-801 型便携式重金属离子分析仪 ^[20]		阳极溶出伏安法	铅、镉、铜、砷、汞、锌、硒、锰、镍	自动标定、自动清洗、操作过程界面显示	USB 传输及 REX 数据采集软件，支持数据存储、删除、查询，输出保存至 SD 卡	4.3in. 高亮彩屏，菜单式操作
加拿大 AVVOR 公司 AVVOR8000 便携式重金属检测仪 ^[21]	箱 9kg	光度比色法和伏安法	铝、砷、硼、镉、六价铬、铁、汞、锰、镍、铅、锌	ppb 级灵敏度，电极无需维护、推插式可移动电极、内置温度感应，外界环境恶劣不影响正常操作	可连接电脑上传数据	
江苏天瑞仪器公司 HM-5000P（多功能）便携式水质重金属检测仪 ^[22]	配套便携式手提箱	光度比色法和溶出伏安法	铜、镉、铅、锌、汞、砷、锰、铊、镍、铬、铁、钴等重金属离子，结合 PC 机可拓展测量金属种类	ppb 级灵敏度，支持无线打印（可接蓝牙打印机），现场打印历史测试结果	USB 接口，可以联机操作，进行硬件检测，电极维护，测量操作、历史数据上传、极谱图分析和算法应用分析等所有仪器操作	中英文界面，友好智能

专项性水质重金属分析仪只针对某种重金属离子的检测，因此检测原理单一，仪器设计复杂度降低，成本低，检测灵敏度高。通用型产品占据着重金属分析仪市场的大份额，表 1 中所列是各大厂商目前最新款的通用型便携式水环境重金属分析仪特点的比较。

（2）将无线传感器网络引入水环境重金属分析领域，真正实现大面积水域，实时在线检测

无线传感器网络的引进对水环境检测具有极重要的意义。随着半导体技术、微系统技术、通信技术、计算机技术的飞速发展，无线传感器网络在各个领域的研究与应用开始蓬勃发展。无线传感器网络极大地扩展了人们获取信息的能力，将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起，为人们提供最直接的、最有效的信息。将无线传感器网络应用于水环境重金属检测中，形成“分布使用传感器 + 服务器数据中心”的模式，使得大面积实时在线监测水环境重金属含量变化成为可能。

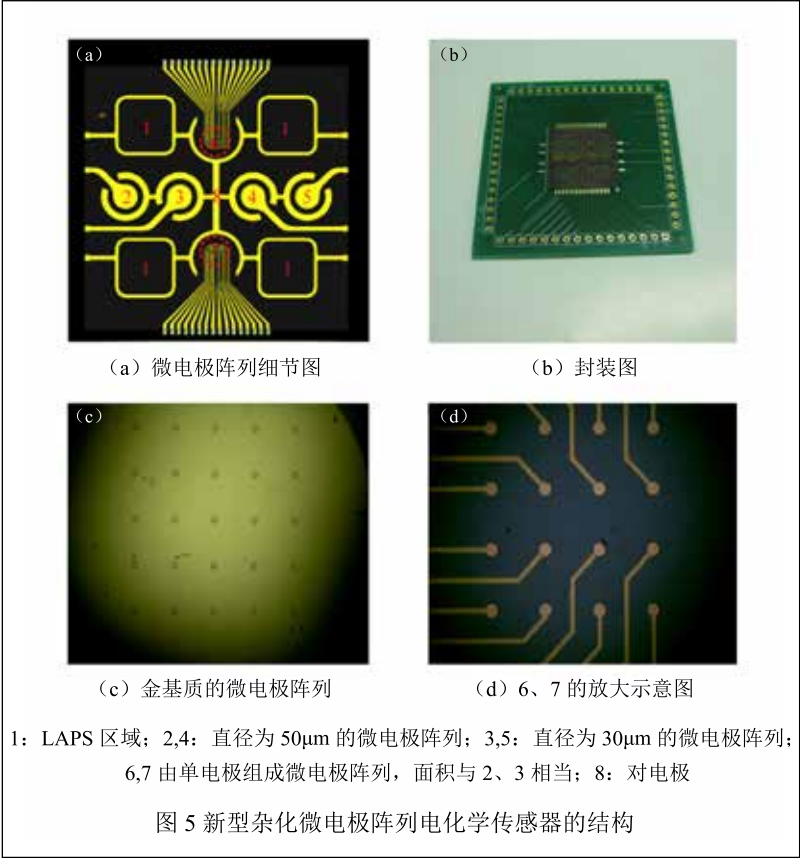
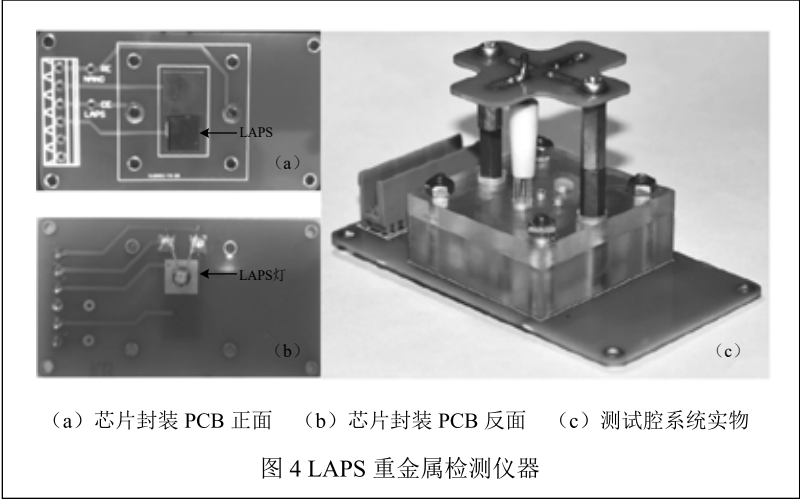


王旭^[23]等人设计了一种新型的基于光寻址电位传感器（LAPS）的重金属检测仪器（图4）。LAPS是一种基于硅基底的高灵敏光学式电化学传感器件，利用其光可寻址特性检测局部信号，非常适合构建无线传感器网络。LAPS检测重金属 Pb^{2+} 的检测范围是 $10^{-7}mol/L \sim 10^{-1}mol/L$ ，灵敏度为 $26.43mV/Pb^{2+}$ ，检测限为 $10^{-7}mol/L$ 。使用大功率无线路由器，无线网卡分别与ARM开发板、上位机连接从而搭建无线传感器网络可以在1km范围内稳定通信，基本实现远距离快速自动化检测。

万浩^[24]设计了一种基于LAPS重金属检测的新型杂化微电极阵列电化学传感器（图5），采用偏最小二乘法与局部最优值法对检测结果自校正。针对溶液pH变化对微电极阵列检测结果造成的干扰，溶出伏安法以检测水环境中的Zn、Fe、Cu为例，证实其可行性，检测灵敏度分别为 $36.3nA/ppb$ ， $11.2nA/ppb$ ， $4.6nA/ppb$ ，稳定性好，基于此传感器，又设计了可用于太湖重金属现场检测的无线浮标传感系统^[25]，基于Wi-Fi无线通信构建无线网络。

（3）借助云服务器完成数据存储，开展在线存储和联机操作，为后期处理数据带来极大的方便，为实现数据可溯源提供可能

大数据时代的到来，数据的存储与自动分析能力成为占领市场、开拓市场的有利武器。检测仪器往往随着使用时间的累加，存储的数据量会越来越大。现在市售的产品大部分依靠内部存储器，有的提供外部存储插口，数据可以直接存放SD卡或U盘中。这样的存储方式面对大量数据时显得力不从心，也无法进行数据的纵向对



比和横向对比。现在云存储技术日益成熟，只要设备能够联网，数据将直接备份到云端，同时实现多地、多平台共享数据，这为数据后续的处理分析提供方便。

原有的水质重金属分析仪的上位机平台一般能够实现的功能包括选择分析方法、控制开关以及数据的

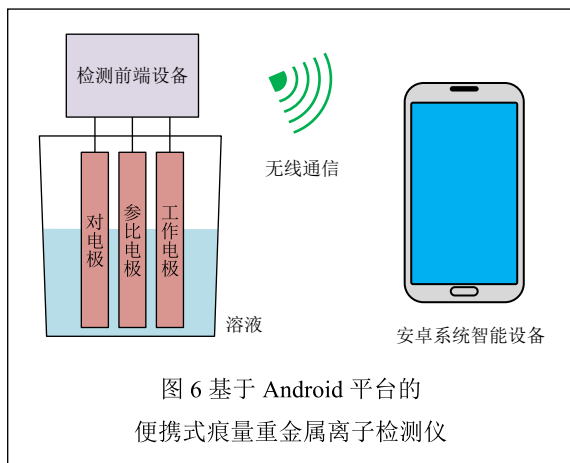


图 6 基于 Android 平台的便携式痕量重金属离子检测仪

存储，往往在检测数据收集完成之后依靠专业人员以及 Origin 软件分析才能得到结果。现在，上位机平台研究向着智能化的方向发展，软件系统能根据用户需求进行实时数据预处理、结合化学计量学算法解决测量过程中可能出现的噪声、漂移、插值拟合等问题，甚至很多专用型便携性设备能够直接给出测量结果。

随着智能手机的普及，借用手机触摸屏作为便携式仪器的操作界面成为未来的发展方向。这样既节约了产品硬件成本，又增强了软件界面的可移植性。无论是 IOS 系统还是安卓系统，开发技术越来越成熟，开发周期越来越短，APP 的软件维护和升级都能够借用手机连接网络进行，同时数据存储也可以利用手机成熟的硬件资源优势。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所研制了一款基于 Android 平台的便携式痕量重金属离子检测仪^[26]，检测原理如图 6 所示，仪器的精度达到普通电化学分析仪的标准，用户对检测前端设备的控制、图形曲线的查看以及对数据的管理都可以进行手机上进行。设计同时兼顾专业用户和普通用户，专业用户可以直接查看数据图形、处理数据，分析数据；普通用户按照操作指南可以完成检测，得到检测结果。手机联网后，可以直接将数据上传至 Windows+IIS+ASP+Access 方法搭建的服务器数据库。

数据可溯源是检测仪器数据存储发展的另一个方向。检测试验多为大量重复性试验，同时实验条件多变，这使得实验员后期整理分析数据非常困难。由美

国 HACH 公司生产的 HQd 系列的水质分析仪^[19]能够自动记录电极的序列号，当前的校正数据、用户 ID、样品 ID、时间以及日期，均保存在系统的数据日志中。每个测量数据都能与样品 ID，用户 ID。电极序列号等数据相关联，保证了完整的数据追溯性和报表监管。

(4) 利用微加工工艺制作微电极阵列，适合批量生产，保证了电极响应的一致性，有效节约成本

芯片实验室 (Lab-on-a-chip) 是水环境重金属分析仪的另一个重要发展方向，集成于芯片上的微系统利用日益成熟的集成工艺，成功地降低了成本、减小体积，同时提高了传感器的一致性和灵敏度。

Z. Zou^[27]提出了一种微型化集成芯片检测电路 (图 7)，采用微加工技术将三电极系统集成在一个芯片上，如图 7 所示，实现了芯片实验室 (Lab-on-a-chip)，可以直接用来检测水环境中的重金属离子 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} ，检测范围分别为 25-400ppb 和 28-280ppb，检测限为 8ppb 和 93ppb。这种集成芯片成本低，对环境无污染，可以即用即丢，可以实现自然水环境的在线检测。

W. Moujahid^[28]提出了在硅片上集成三电极系统 (图 8)，工作电极和对电极均为铂电极，参比电极为 Ag/AgCl。微电极阵列系统可以持续工作 72h，显示

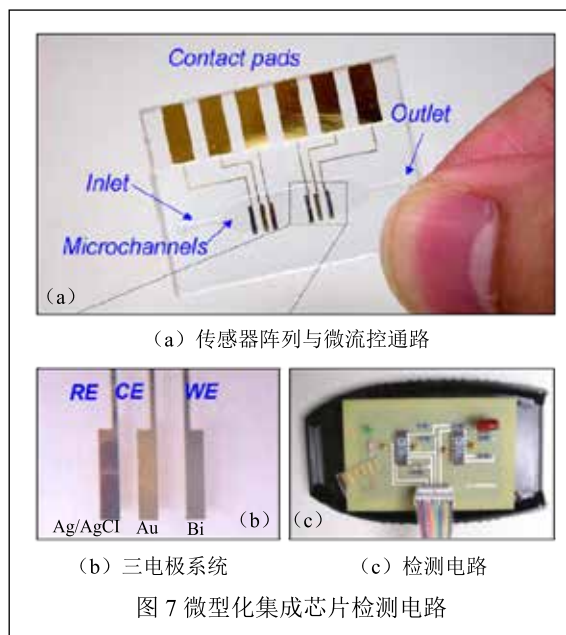
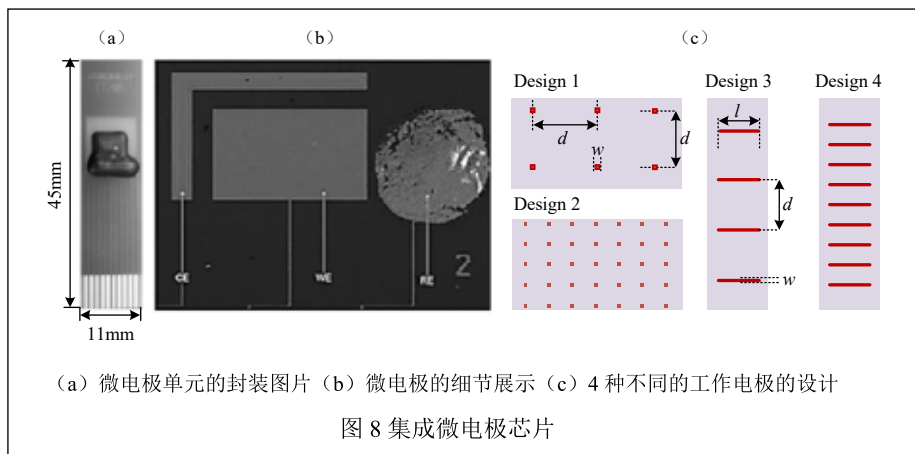


图 7 微型化集成芯片检测电路



在应用于检测水环境中重金属离子时，生物传感器具有高度的特性选择性，体积小，样品用量少，但同时受到生物分子本身特性的限制，存在可靠性和稳定性差，样品前期处理过程复杂，对仪器设备的安装环境和使用维护要求较高，难以实现现场或在线检测。

了非常好的稳定性，检测人工海水中的 Cu^{2+} 的灵敏度可以达到 $2.93 \pm 0.14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，检测下限为 $1 \mu\text{mol}$ 。

3、基于生物化学法的水环境重金属分析仪

生物化学法^[3]常用于的水环境重金属检测的方法有酶抑制法、免疫分析法。

酶抑制法^[29]是指当待测溶液中含有重金属抑制剂时，特异性的酶活性受抑制，产生电位差，以此测定待测溶液中重金属含量。

D.B.Kestwal^[30]等人提出了一种基于修饰蔗糖酶和葡萄糖氧化酶抑制的超微电极的电化学传感器检测水中重金属离子 Hg^{2+} 、 Ag^{+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} ，琼脂糖凝胶膜作为电极的保护膜提高了检测精度，基质和抑制剂能透过膜迅速扩散，传感器总的检测范围 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{mol}$ ，检测限为 10^{-10}mol 。

免疫分析法^[29]利用的是抗原抗体特异性结合反应检测，用于重金属离子检测的有荧光偏振免疫检测、酶联免疫吸附检测和 KinExA 免疫检测等。

H. Yu^[31]等人提出了一种基于 KinExATM3000 的自动免疫传感器，并对 Uo^{6+} 进行检测，检测范围是 $1.4 \sim 2.4 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，检测变异系数为 $3.5 \sim 5.9\%$ ，平均回收率高达 99.17% 。

功能核酸能与目标特异性结合，且对目标有催化功能，禹亚莉^[32]设计了一种基于 DNA 双链电荷转移原理，利用胸腺嘧啶对汞离子的特异性识别，采用计时电流法的检测水中汞离子的电化学生物传感器。测量范围是 $1 \text{nmol} \sim 10^4 \text{nmol}$ 检测限为 0.5nmol 。

三、水环境重金属分析的发展趋势

近几年水环境重金属分析仪发展势头强劲，各种新兴技术的引进为它的升级增加了无限可能。下一代水环境重金属分析仪存在许多机遇与挑战，对它的发展作如下展望：

1、利用新材料，制作高灵敏的离子选择性电极、化学修饰电极、微电极；特异性高的酶传感器、免疫传感器、微生物传感器；

2、随着无线传感器网络的传输远距离的能力的不断增加，真正做到河域、湖域的大面积传感器分布，实时监控水质；

3、针对检测数据，使用不断发展更加先进的算法，进行校正，减小噪声，提高信噪比，提升仪器性能。

四、总结

重金属检测为水环境监控提供重要的参考依据，基于光谱学检测原理的重金属分析仪技术相当成熟，常用于在实验室分析溶液中的重金属含量，受限于仪器本身体积庞大，无法满足现场、在线检测的需求，从而基于电化学方法成为了现在发展势头强劲的发展方向，在市场份额比重加大，其商业化产品的种类数量大幅增加，应用的场景也越来越广泛。基于生物化学法商业化的重金属分析仪还处于起始阶段，具有较大发展潜力，随着困扰生物化学法的核心技术的突破，有望形成更多元化的商业化产品。

参考文献

- [1] 李鹏, 冯治宇. 环境分析与监测 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [2] 吴舜泽, 孙宁, 卢然, 等. 重金属污染综合防治实施进展与经验分析 [J]. 中国环境管理, 2015, 7(1):21-28.
- [3] 李宗浩. 环境水样中重金属离子的检测方法研究 [D]. 武汉: 生命科学与技术学院, 2013.
- [4] 陈瑞生. 河流重金属污染研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [5] 朱睿. 原子吸收光谱法在测定水中重金属的应用 [J]. 污染防治技术, 2013(4):66-70.
- [6] 王增焕, 王许诺, 谷阳光, 等. 疏水性螯合物固相萃取 - 原子吸收光谱法测定海水中 5 种重金属 [J]. 岩矿测试, 2017, 36(4):360-366.
- [7] Hong Fang J U. Direct Determination of the heavy metal in water with platform furnace graphite by AAS [J]. Journal of Changshu College, 2003(02):47-50
- [8] 洪欣, 王晓飞, 苏荣, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定河流和湖泊沉积物中 11 种重金属元素含量 [J]. 理化检验: 化学分册, 2017, 53(7):787-791.
- [9] 李萌, 李原婷, 李大伟, 等. 电化学与比色的“杂交”方法选择性检测污染水中重金属离子 [A]. 中国化学会第 28 届学术年会论文集 [C]. 中国化学会学术年会. 2012.
- [10] 刘文娟. 全自动间断化学分析 (SmartChem200) 测定水中六价铬 [J]. 河南科技, 2014(1):162-163.
- [11] 长春星锐智能化科技有限公司. AutoChem1100 产品简介 [EB/OL]. http://www.ccxingrui.com/html/pic/zizhuyuanfa/20145/pic_68.html
- [12] 巴德 A.J 等. 电化学方法原理及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1986.
- [13] 李荻. 电化学原理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.
- [14] 梁荣宁, 王倩文, 秦伟. 高灵敏离子选择性电极检测海水中的汞 [A]. 第七届全国环境化学大会摘要集 -S12 重金属污染与修复 [C]. 中国化学学会. 2013.
- [15] 陈冲, 耿志浩, 祁欣. 溶出伏安法水体金属离子检测仪及其稳定性研究 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2017, 44(1):105-110.
- [16] 陈旭海, 陈敬华, 潘海波, 等. 改进计时电流法的数学模型和电路实现 [J]. 物理化学学报, 2010, 26(11):2920-2926.
- [17] 宾俊. 便携式重金属智能分析仪的设计与实现 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [18] 夏勇, 杜艳, 董晓东, 等. USB 插头式微型电化学分析仪的研制及应用 [J]. 分析化学, 2009, 37(1):157-160.
- [19] 哈希水质分析仪器 (上海) 有限公司. HQd 台式 / 便携式水质分析仪 [EB/OL]. <http://www.hach.com.cn/product/hqd>
- [20] 上海仪电科学仪器股份有限公司. SJB-801 型便携式重金属离子分析仪 [EB/OL]. http://www.lei-ci.com/products_details/productId=243.html
- [21] 北京天驰纵横科技有限公司. AVVOR 8000 便携式重金属检测仪 [EB/OL]. <http://www.ti-flyer.com/products/2010727155206634.html>
- [22] 江苏天瑞仪器股份有限公司. HM-5000P (多功能) 便携式水质重金属检测仪 [EB/OL]. <http://www.skyray-instrument.com/product/detail/26/633>
- [23] 王旭. 基于光寻址电位传感器的水环境重金属铅离子无线检测仪器设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] Wan H, Da H, Zhang W, et al. Design of a novel hybrid sensor with microelectrode array and LAPS for heavy metal determination using multivariate nonlinear calibration [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2014, 192:755-761.
- [25] 王浩. 用于水环境重金属检测的微纳传感器及系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [26] 黄善洛, 金妍, 郭慧, 等. 基于 Android 平台的便携式痕量重金属离子检测仪的研制 [J]. 分析化学, 2015(7):1098-1103.
- [27] Zou Z, Jang A, Macknight E, et al. Environmentally friendly disposable sensors with microfabricated on-chip planar bismuth electrode for in situ, heavy metal ions measurement [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2008, 134(1):18-24.
- [28] Moujahid W, Eichelmann-Daly P, Strutwolf J, et al. Microelectrochemical Systems on Silicon Chips for the Detection of Pollutants in Seawater [J]. Electroanalysis, 2011, 23(1):147-155.
- [29] 罗学刚. 生物质基重金属吸附材料的制备与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [30] Bagal-Kestwal D, Karve M, Kakade B, et al. Invertase inhibition based electrochemical sensor for the detection of heavy metal ions in aqueous system: Application of ultra-microelectrode to enhance sucrose biosensor's sensitivity [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2008, 24(4):657.
- [31] Haini Yu, R. Mark Jones, Diane A. Blake. An immunosensor for autonomous in-line detection of heavy metals: validation for hexavalent uranium [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2005, 85(12-13):817-830.
- [32] 禹亚莉, 李燕, 张俊玲, 等. 基于 DNA 双链电荷转移的 Hg²⁺ 电化学生物传感器的研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(2):314-319.

Research status and developing directions of analyzers for heavy metal detection in aqueous environment

LI Yue-qi¹, HU Jing-fang², ZOU Xiao-ping², GAO Guo-wei^{1,2}

(1. *Institute of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*; 2. *Key laboratory of information acquisition & detection, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China*)

Abstract: Heavy metal pollution in water environment is serious at present, which threatens the safe of people's life and property. Providing effective means to reliably detect the types and concentration of heavy metals in water is the basis for solving the problem of heavy metal pollution in water environment. A review of types of heavy metal analyzers with different detection theories is given in this paper, and the applications of optical, electrochemical and biochemical methods for heavy metal detection are introduced. The performance, characteristics and research

status of different analyzers are elaborated in detail and the developing directions in the future are pointed out.

Keywords: water environment; heavy metal analysis; research status; developing direction

作者简介

李玥琪, 北京信息科技大学 自动化学院, 研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置

通信地址: 北京北四环中路 35 号

邮编: 100101

邮箱: liyueqi2015@126.com

胡敬芳, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 助理研究员, 研究方向为新型传感器及系统

邹小平, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 研究员, 研究方向为新型纳米材料

高国伟, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 研究员, 博士, 研究方向为新型传感器及系统。