

环境检测技术的发展演进与未来趋势综述

张亚男

河南省中精环境工程有限公司 河南 济源 459000

摘要: 本文总结了环境检测技术发展过程中所经历的四大时期——初创期的基础化学分析、成长期的仪器分析及色谱质谱技术、发展阶段的传感器与遥感监测、目前的智能化与网络化结合期,在此基础上介绍了各个时期具有代表性的技术和特点。同时对近年来环境检测领域取得重要进展的技术进行了梳理,如高分辨质谱、微流控芯片、生物传感、激光雷达、卫星遥感以及基于物联网和人工智能的智能化环境监测系统等。最后对环境检测技术的发展趋势进行了预测,认为小型化与就地化、多种指标联合及不同介质之间综合、基于大数据的智能预报和追踪溯源能力提升、新型污染物检测技术开发是今后发展方向。

关键词: 环境检测; 传感器技术; 遥感监测; 智能化; 现场检测; 发展趋势

引言

自工业革命以来,人为污染物的数量以及种类急速增长,环境中存在的有害物质已经由原来的重金属和传统有机物发展到持久性有机污染物、内分泌干扰物、微塑料以及抗生素抗性基因等新关注污染物。同时公众对于环境质量的关注也从是否受到污染发展到污染的程度、来源、变化趋势以及带来的危害等问题。这使得人们对环境监测技术的要求不断提高,促使环境监测技术不断提升其灵敏度、选择性和通量以及及时性。纵观百年历史,环境监测技术的发展并不是一蹴而就的过程,在分析化学、物理学、电子学、材料学、信息学等多个领域共同进步的影响下,环境监测技术才得以突飞猛进的发展。特别是近几年微纳加工技术、人工智能以及无线通讯的发展使环境监测开始走向“从以实验室为中心到在现场分布式”的时代。

1 环境检测技术的演进阶段与历史脉络

1.1 初创期:经典化学分析方法的奠基

环境检测起源于19世纪末到20世纪中叶,主要以传统的容量分析(滴定法)、重量法为主,同时采用比色法、光度法等。此时期特点有三点:一是人工操作;二是时间较长;三是仅能测出较高浓度一般项目(如化学需氧量、溶解氧、硬度、重金属离子)。代表性的技术有高锰酸钾法测定耗氧量、碘量法测定溶解氧、二苯碳酰二肼分光光度法测定六价铬等。虽然这种技术灵敏度较低(大多在mg/L级),还需要较多化学药品以及前期准备工作,但是由于它比较成熟,因此对后世影响很大。目前仍有一些经典技术被当作标准来衡量新方法是否合格。

1.2 成长期:仪器分析革命与色谱质谱时代

20世纪50年代到90年代,随着分析仪器的的发展进步,环境监测进入了一个新的时代——高灵敏度的时代。气相色谱、高效液相色谱的应用使得复杂的有机物得以被有效分离;而质谱的应用又为人们提供了一种识别物质分子结构的方法。色谱-质谱联用技术(GC-MS、LC-MS)成为有机污染物定性和定量的最佳手段,可达到 $\mu\text{g/L}$ 乃至 ng/L 的检测限;另一方面,原子吸收光谱以及电感耦合等离子体质谱大大提高了对重金属进行检测的能力以及可以同时测定多种元素的功能^[1]。此时,环境监测已不再局限于一种物质或几个参数,而是发展成为一种多组分的筛选过程,由人工操作发展到自动化的进样及数据分析,工作效率大大提高。但是也有不足之处:设备成本高昂、维护繁琐、分析仍然需要在实验室中进行,在采样与分析之间的时间差导致结果滞后,不能及时应对突发事件或者实时监控。

1.3 转型期:现场传感与遥感技术的兴起

进入21世纪以来,在微电子技术、光纤传感技术和激光技术等技术日益成熟的背景下,环境监测朝着现场化、实时化的趋势发展,电化学传感器(例如pH、溶解氧、电导率)、光学传感器(例如紫外-可见光吸收、荧光猝灭)及基于纳米材料的增强型传感器件被大量用于水体和空气中的污染物监测。而在遥感方面,地面遥感(例如傅里叶变换红外光谱、差分吸收光谱)可以用于移动测量大气中污染物浓度;而卫星遥感(例如MODIS、OMI、TROPOMI)则可用于估算大范围甚至全世界范围内气溶胶、臭氧、二氧化氮等污染物含量。在现场传感与遥感相结合的应用中,环境监测的空间范围以及时间频率都大大提高,但是也存在由于受到现场环境影响而导致精度降低的问题,需要定期进行标定工

作,并且所获得的数据质量参差不齐的问题,不能取代实验室的标准方法。

1.4 智能化阶段:信息物理融合与网络化监测

2015年后,物联网、5G通信、人工智能、边缘计算等新技术与环境监测进行深度融合,产生了智能环境监测网络。大量小型化传感器分布在河流、城市以及工厂等地区形成细密感知层,它们的数据通过无线通信技术传送到云端,借助大气扩散模型、水质模型以及统计反演方法可以做到对污染事件及时发现、追溯以及发展趋势预报。这期间最大的变化就是“检测”到“决策”的距离大大缩短,环境监测已不再是简单的“数据汇报”,而是智能化的“预警”^[2]。此外,移动众包感知(例如车载监测、无人机巡查)解决了固定点位不足问题,形成了“固定+移动”的监测模式。智能化并不是对以往技术的否定,而是在原有基础上的一次提升和完善,在此之前依然有传统的实验室化验分析作为最后的保障。

2 当前环境检测关键技术领域的发展态势

2.1 高分辨质谱与高通量筛查技术

高分辨质谱(HRMS),如飞行时间质谱、静电场轨道阱质谱以及傅里叶变换离子回旋共振质谱,已被用于环境样品中未知污染物非靶向筛查。由于它们具有非常高分辨率(可达百万级)以及准确的质量测量值,在复杂的背景基质中能够一次鉴定出几百甚至上千个不同的有机污染物。结合自动化的样品预处理以及色谱分离,HRMS已经发展成为一种从“目标物检测”到“全组分特征描摹”。近年来,液相色谱-高分辨质谱联用在极性农药、药物残留以及饮用水消毒副产物等方面表现突出。另一方面,通过引入离子淌度质谱可以显著提高同分异构体之间的辨别能力,有助于环境中的代谢物或降解产物结构鉴定。但是目前HRMS的数据解析仍然需要依赖大量的化合物以及谱图数据库支持,而繁琐的数据处理过程以及缺乏统一的标准仍然是阻碍其广泛应用的主要原因。

2.2 生物传感与毒性效应导向检测

传统的环境监测以化学浓度为标准,但是浓度不能完全体现生物毒性作用,在此基础上发展起来的生物传感器利用固定化的酶、抗体、适配体、微生物或者细胞表面受体作为识别单元,把生物学变化转换成可以量化的光电、电化学或是热量变化。比如基于乙酰胆碱酯酶被抑制来检测有机磷农药,基于发光细菌检测急性毒性,以及基于雌激素受体荧光进行类激素筛选,都可以实现对“生物有效浓度”的快速判断。近年来出现的一系列体外生物测定方法,包括微核实验、彗星实验以及

基于基因报告细胞效应检测,都可以用来同时考察遗传毒性、氧化应激以及内分泌干扰等多个方面的影响因素。生物传感器和化学检测相辅相成,二者结合形成一个“浓度-效应”的二元体系,在环境健康风险评估中起着至关重要的作用。

2.3 激光雷达与卫星遥感的大气探测应用

大气环境监测的空间尺度很大程度上受制于遥感技术的发展水平。地面激光雷达(LIDAR)通过对气溶胶以及后向散射信号进行观测以推算出颗粒物的垂直分布以及边界层的高度,解决了地面站点只能测得近地面浓度的问题;而差分吸收激光雷达(DIAL)可以对臭氧、二氧化硫等某几种气体进行测量得到其浓度廓线。在卫星遥感领域里,欧洲的哨兵系列、美国的TROPOMI以及我国的风云系列都配置有大气痕量气体探测载荷,可以每天获得全球范围内的二氧化氮、甲醛、一氧化碳等物质的地图信息^[3]。随着静止轨道卫星的应用使得每个小时都可以进行一次污染状况的监测,这对研究区域之间的污染物传输和严重污染过程具有重要意义。同时遥感资料与地面观测相结合也是目前大气污染预报预警业务中的重要组成部分。

2.4 微流控与芯片实验室技术

微流控技术将样品进样、预处理、反应、分离、检测等功能模块集中在几毫米到几厘米大小芯片上,实现对环境监测小型化、自动化。芯片实验室利用精细流动通道设计可以实现纳升乃至微升量级样品多次处理,大大减少试剂使用量以及废物排放量。带有光学或者电化学检测模块微流控芯片已经能够用于水体中铅汞等重金属离子、硝酸根离子、磷酸根离子及致病菌等现场即时检测工作。而由于其低廉价格与简单易用性,近年来纸质微流控芯片(例如μPAD)也受到极大关注,在缺乏足够资源地区自来水安全筛查方面具有很大前景。微流控技术未来发展方向是开发更易于使用的样品注入装置以及提高其使用寿命。

3 环境检测技术的未来趋势与挑战

3.1 微型化、集成化与现场即时检测

未来五到十年间,环境检测的一个重要变化就是检测仪器由实验室向现场移动、由专业人士向普通民众普及。微纳加工技术使得传感器尺寸可以做到微米乃至纳米级大小,结合微流控以及片上电源,可以做到类似“口袋实验室”的便携式设备。现场即刻检测(POCT)可以极大缩短从取样到出结果的时间,在突发污染事件或偏远地区的监测中具有重要意义。但是微型化的同时也需要解决选择性、长期稳定性和环境适应性问题,

否则不能用于立法依据。新型材料（如金属有机框架、共价有机框架、二维材料）的应用可能在选择性吸附和信号放大上有新的发现。

3.2 多参数协同与跨介质整合监测

目前监测体系以水、气、土、生态等不同介质各自为战，而现实中环境问题往往是由多种介质之间相互作用所引起的。未来发展方向是建立“地上-地下-大气-生物”的全方位一体化跨介质联合监测网，同时获得污染物在各相之间分布、传输以及变化情况。多种参数传感器可以同时测定物理化学性质以及生物学特征，从而实现由单一因子向多个指纹谱转变。同时，非靶向筛查和效应导向相结合的方法，将化学物质检测与生物效应检测放在同一个平台进行，有利于对化学品混合暴露带来危害进行更准确判断。

3.3 人工智能驱动的智能预警与决策闭环

检测的目标是为了服务管理。将来，人工智能不仅进行数据分析，在检测过程中也会发挥作用——智能采样（根据实际情况调整采样频率及位置）、智能质控（自动发现问题质控样品并且重新检测）、智能报告（自动生成分析结果以及提出建议）。在此之上建立“监测-预警-溯源-调控”的管理体系，使环境保护由被动应对到主动防控^[4]。但是，智能化模型的透明度以及不确定性的度量是难题，需要发展可解释的人工智能让使用者对模型有信心。

3.4 新兴污染物检测方法体系构建

随着化学品注册评估制度的发展和完善，越来越多的新污染物（例如全氟和多氟烷基物质、微塑料、抗生素抗性基因、纳米材料）受到关注。而这类污染物一般具有低含量、种类多样、基质复杂等特点，传统的检测手段无法满足需求，在今后的研究中应加强以下几方面

的研究工作：微塑料的自动识别及定量方法（利用红外显微成像技术和机器学习的方法）；全氟化合物的总氟-靶向-非靶向联用检测方法；抗性基因的微流控数字PCR绝对定量方法。此外，还需针对不同新污染物的特点制定相应的采样、存储以及预处理的标准操作程序，以消除因方法不同造成的不可比性。

4 结语

环境检测技术经过百年的变迁与发展，已经从早期少量几种常规项目的实验室手工操作到如今包括色谱质谱、光谱遥感、生物传感及智能感知等多种手段在内的综合性、全方位的技术体系。而今信息技术、人工智能以及微纳制造等正在引领该行业发生从“数据采集”到“认知理解”的变革。未来的环境检测将会朝着小型化便携化、跨介质联合作业、大数据驱动以及规范化信息化的方向发展。因此需要加大基础理论与实际应用之间的联系促进产、学、研、用联合攻关的同时也要未雨绸缪地做好相关的标准制定和质量管理工作部署以便更好地服务于日趋复杂的环境保护工作。只有技术和制度两手抓两手硬才能真正达到“测得准、说得清、管得住”。

参考文献

- [1]王桥,刘思含,赵少华.中国环境遥感监测技术进展与展望.遥感学报,2022,26(1):1-11.
- [2]张亚辉,李国刚,陈红军.高分辨质谱在环境有机污染物非靶向筛查中的研究进展.分析化学,2023,51(6):867-879.
- [3]杨敏,李新,王斌.生物传感技术在环境毒性快速检测中的研究现状与发展趋势.环境科学学报,2024,44(2):32-42.
- [4]孟凡,于云江,彭晓武.环境新兴关注污染物的检测方法 & 风险评价研究进展.环境与健康杂志,2023,40(4):365-372.