

论分析化学法在环境污染物检测中的应用

雍海燕

宁夏森蓝环保有限公司 宁夏 银川 750000

摘要：环境污染物检测是守护生态环境与公众健康的关键防线。本文聚焦分析化学法在环境污染物检测中的应用。首先阐述了分析化学法包含光谱、色谱、质谱、电化学等的技术体系，各方法特点鲜明、优势互补。接着介绍了其在大气、水体、土壤及特殊污染物检测等场景的广泛应用。最后展望未来，技术融合创新将提升检测能力，新兴污染物研究是必然趋势，绿色分析化学也将成为发展方向，分析化学法在环境监测领域将持续发挥关键作用。

关键词：分析化学法；环境污染物检测；技术体系；应用场景；发展趋势

引言：随着工业化和城市化的快速发展，环境问题日益严峻，各类污染物对生态环境和人类健康构成严重威胁。准确、及时地检测环境中的污染物，是有效治理环境污染、保护生态环境的重要前提。分析化学法作为一门重要的学科，拥有多种先进的技术手段，能够精确测定环境中不同类型污染物的种类和含量。文章旨在系统探讨分析化学法的技术体系，分析其在不同环境污染物检测场景中的应用，并展望其未来发展方向，为环境污染物检测工作提供理论参考与实践指导。

1 分析化学法的技术体系

1.1 光谱分析法

光谱分析法是基于物质与电磁辐射相互作用产生的特征光谱进行定性和定量分析的技术体系。其核心原理在于不同物质的原子、离子或分子具有独特的能级结构，当吸收或发射特定波长的光子时，会形成特征吸收或发射光谱。主要技术包括原子发射光谱（AES）、原子吸收光谱（AAS）、紫外-可见吸收光谱（UV-Vis）及红外光谱（IR）等。例如，紫外-可见分光光度法通过测量200-760nm波长范围内分子价电子跃迁产生的吸收光谱，可快速测定水体中铅、铜等浓度；原子发射光谱则能在炼钢炉前1-2分钟内同时分析二十余种元素。该技术具有非破坏性、灵敏度高（可达 10^{-9} g级）及多元素同步检测的优势，广泛应用于环境监测、地质勘探及刑事侦查等领域。

1.2 色谱分析法

色谱分析法通过物质在固定相与流动相间分配系数的差异实现分离分析，是复杂混合物分离的核心技术。其技术体系涵盖气相色谱（GC）、液相色谱（HPLC）、超临界流体色谱（SFC）及毛细管电泳（CE）等分支。例如，气相色谱利用载气带动挥发性样品通过填充柱或毛细管柱，依据组分在固定相上的吸

附/解吸能力差异进行分离，常用于大气中VOCs（挥发性有机物）的检测；液相色谱则通过高压泵输送液态流动相，适用于非挥发性或热不稳定物质的分离，如水体中多环芳烃的测定。毛细管电泳技术以高压电场为驱动力，分离效率高达百万理论塔板数/米，可实现纳升级样品中蛋白质、核酸等生物大分子的高效分离。

1.3 质谱分析法

质谱分析法通过离子化、质量分离及检测三个核心步骤，实现物质分子量、结构及同位素组成的精确测定。其技术原理为：样品在离子源中被电离为带电粒子，经质量分析器（如四极杆、飞行时间或离子阱）按质荷比分离，最终由检测器记录离子信号形成质谱图。例如，电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）结合高温等离子体离子化与质谱检测，可同时测定水体中痕量重金属（如镉、汞）的浓度，检出限低至ppt级；液相色谱-质谱联用（LC-MS）技术则通过液相色谱分离复杂样品，质谱提供结构信息，广泛应用于环境有机污染物（如农药残留、全氟化合物）的定性定量分析。

1.4 电化学分析法

电化学分析法基于物质在电场作用下的氧化还原反应，通过测量电极电位、电流或电量等参数实现定量分析。其技术体系包括伏安法、电位滴定法、电化学阻抗谱及库仑法等。例如，伏安法通过扫描电极电位并记录电流响应，可检测水体中重金属离子（如铅、镉）的浓度；电位滴定法则利用电极电位突变确定滴定终点，常用于酸碱度或氧化还原能力的测定。该技术具有设备简单、操作便捷及实时监测的优势，广泛应用于环境水质监测（如溶解氧、化学需氧量测定）、工业过程控制（如pH值在线监测）及生物传感领域（如葡萄糖浓度检测）^[1]。

2 分析化学法在环境污染物检测中的应用场景

2.1 大气污染物检测

分析化学法在大气污染物检测中发挥着至关重要的作用,为精准评估空气质量、制定污染防控策略提供了关键数据支撑。(1)光谱分析法凭借其高灵敏度和快速检测优势,广泛应用于大气中痕量污染物的测定。例如,差分吸收光谱技术(DOAS)通过测量特定波长光在大气中的吸收特性,可实时监测二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等气态污染物的浓度,适用于城市空气质量监测站及工业区周边的大范围连续监测。紫外荧光法则是检测大气中臭氧(O₃)的经典方法,其原理基于臭氧分子吸收紫外光后发射特征荧光,具有选择性强、干扰少的优点。(2)色谱分析法在复杂大气样品分离分析中表现突出。气相色谱(GC)结合多种检测器(如FID、ECD),可同时测定大气中挥发性有机物(VOCs)、多环芳烃(PAHs)等数百种有机污染物,尤其在工业废气排放源解析中应用广泛。液相色谱-质谱联用技术(LC-MS)则进一步拓展了检测范围,能够准确分析大气颗粒物中的半挥发性有机物及极性化合物,为细颗粒物(PM2.5)来源解析提供分子水平证据。(3)电化学传感器因其便携性和实时响应特性,成为大气污染物现场快速筛查的重要工具。例如,基于金属氧化物半导体的电化学传感器可实时检测一氧化碳(CO)、一氧化氮(NO)等有毒气体,适用于交通要道、隧道等封闭空间的空气质量监测,为应急响应和人群健康防护提供即时数据。

2.2 水体污染物检测

分析化学法在水体污染物检测领域应用广泛且深入,为保障水资源安全、治理水污染提供了坚实的技术支撑。(1)光谱分析法以其快速、灵敏的特点,成为水体中多种污染物检测的重要手段。紫外-可见分光光度法常用于检测水体中的重金属离子,如铅、汞等,通过特定试剂与重金属离子发生络合反应,产生具有特征吸收峰的络合物,从而根据吸光度进行定量分析。原子吸收光谱法则可直接测定水样中多种金属元素的含量,具有选择性好、灵敏度高的优势,广泛应用于饮用水源地、工业废水等水体的重金属污染监测。(2)色谱分析法在分离和测定水体中的有机污染物方面表现出色。气相色谱法适用于挥发性有机物的检测,如苯系物、卤代烃等,通过将水样中的有机物进行气化处理后进入色谱柱分离,再经检测器检测,可准确分析水体中有机污染物的种类和浓度。液相色谱法则对非挥发性和热不稳定性的有机物检测效果显著,像农药残留、多环芳烃等,能有效分离复杂水样中的目标化合物,为水体有机污染的溯源和控制提供关键数据。(3)电化学分析法凭借其设

备简单、操作便捷的优势,常用于水体污染物的现场快速检测。例如,离子选择性电极可快速测定水样中的氟离子、氯离子等阴离子,以及钙、镁等阳离子,为水质评价提供基础指标。同时,一些新型电化学传感器还能实现对水体中重金属、有机污染物的实时在线监测,大大提高了检测效率。

2.3 土壤污染物检测

土壤作为生态环境的重要载体,其污染状况直接影响农产品安全与生态系统健康。分析化学法凭借多样化的技术手段,在土壤污染物检测中发挥着不可替代的作用。(1)光谱分析法为土壤中重金属的快速筛查提供了高效工具。X射线荧光光谱(XRF)通过激发土壤样品中的原子内层电子,产生特征X射线荧光,可实现铜、锌、铅等重金属元素的现场无损检测,适用于大面积土壤污染调查与农田重金属分布监测。原子吸收光谱(AAS)则通过原子化技术将土壤消解液中的重金属转化为基态原子,测量其对特征波长光的吸收程度,具有灵敏度高、准确性好的特点,常用于实验室精准定量分析。(2)色谱分析法在土壤有机污染物检测中占据核心地位。气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术通过气相色谱分离土壤萃取液中的多环芳烃、农药残留等挥发性有机物,再经质谱定性定量,可同时检测数十种有机污染物,为土壤有机污染溯源与风险评估提供分子级证据。液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)则进一步拓展了检测范围,能够分析土壤中极性较强、热不稳定的抗生素、全氟化合物等新兴污染物。(3)电化学分析法以其便携性和实时性,成为土壤污染现场快速检测的重要手段。基于离子选择性电极的便携式检测仪可快速测定土壤浸提液中的硝酸盐、氟化物等无机离子,而新型电化学传感器结合纳米材料修饰技术,显著提升了对重金属、有机污染物的检测灵敏度,为土壤污染应急监测与农田修复效果评估提供了实时数据支持。

2.4 特殊污染物检测

特殊污染物往往具有隐蔽性、持久性和高毒性,对生态环境和人体健康构成严重威胁。分析化学法凭借其高灵敏度、高选择性和多组分分析能力,在特殊污染物检测中展现出独特优势。(1)针对持久性有机污染物(POPs),如二噁英、多氯联苯等,气相色谱-高分辨质谱联用技术(GC-HRMS)是国际公认的“金标准”。该技术通过高分辨质谱的精确质量测定,可实现POPs的定性定量分析,检出限低至皮克级,广泛应用于土壤、沉积物及生物样品中POPs的污染调查与风险评估。(2)新兴污染物如微塑料、抗生素和全氟化合物等的检测需求

日益增长。拉曼光谱结合化学计量学方法,可对微塑料进行快速无损鉴定,区分不同聚合物类型;液相色谱-三重四极杆质谱联用技术(LC-MS/MS)则通过多反应监测模式,实现水体、土壤中痕量抗生素和全氟化合物的精准定量,为新兴污染物环境行为研究提供关键数据。

(3) 放射性污染物和生物毒素的检测对公共安全至关重要。 α/β 射线计数器与 γ 能谱仪可快速测定环境样品中的放射性核素活度,而酶联免疫吸附试验(ELISA)和生物传感器技术则通过抗原-抗体特异性结合,实现黄曲霉毒素、河豚毒素等生物毒素的高灵敏度检测,为食品安全监管和核事故应急响应提供技术支撑^[2]。

3 分析化学法在环境污染物检测中的未来方向

3.1 技术融合与创新

未来分析化学法将加速多技术交叉融合,推动环境污染物检测向智能化、高精度方向发展。一方面,色谱-质谱联用技术将深度整合超高效分离与高分辨质谱检测,通过优化离子传输路径和碰撞能量控制,实现复杂基体中痕量污染物的精准定性定量,同时结合多维色谱技术提升分离效率。另一方面,光谱与电化学传感技术将向微型化、集成化演进,例如基于纳米材料修饰的微型传感器阵列,可同步检测多种污染物并实现无线数据传输。此外,人工智能与大数据分析的引入将重构检测流程,通过机器学习算法优化样品前处理条件、自动解析质谱数据,并构建污染扩散模型,实现从“单点检测”到“区域监测”的智能化升级。

3.2 新兴污染物研究

随着工业化和城市化进程加速,全氟化合物(PFAS)、微塑料、药物残留及内分泌干扰物等新兴污染物成为研究热点。这些物质因环境持久性、生物累积性及潜在毒性,对生态系统与人体健康构成长期威胁。未来研究需聚焦新兴污染物的环境行为与转化机制,例如通过非靶向筛查技术识别未知污染物,结合稳定同位素示踪技术解析其迁移路径。同时,开发高选择

性、高灵敏度的检测方法至关重要,如利用高分辨质谱(HRMS)结合多级质谱碎裂模式,实现复杂基体中痕量新兴污染物的结构鉴定;发展基于分子印迹技术或适配体传感器的特异性识别方法,提升检测抗干扰能力。

3.3 绿色分析化学

绿色分析化学通过整合绿色溶剂、节能技术与可持续设计理念,推动环境污染物检测向低碳、环保方向转型。在样品前处理环节,固相微萃取(SPME)、膜分离技术等无溶剂或低溶剂消耗方法将逐步替代传统液液萃取,减少有机试剂使用与废弃物产生。分离分析过程中,超高效液相色谱(UHPLC)采用亚2 μm 颗粒色谱柱与低流量泵系统,显著降低溶剂消耗;低温等离子体离子化技术则实现样品直接电离,省去复杂前处理步骤。检测技术方面,电化学传感器与生物传感器利用无毒电解质和可再生电极材料,降低能耗的同时提升检测稳定性。此外,绿色分析化学强调全生命周期管理,从仪器设计、试剂生产到废弃物处理均遵循环保原则,例如开发可降解传感器基底材料、优化分析流程以减少能源消耗^[3]。

结束语

分析化学法作为环境污染物检测的核心技术,凭借其高灵敏度、高选择性与多组分分析能力,已成为守护生态环境安全的关键力量。从大气中痕量气体的精准监测,到水体与土壤中复杂污染物的深度解析,再到新兴污染物与特殊毒物的快速筛查,分析化学法不断突破检测极限,为环境风险评估与污染治理提供科学依据。

参考文献

- [1] 邱石庆,许玉萍.化学分析方法在环境检测中的应用[J].中国化工贸易,2020,12(20):129-130.
- [2] 杨亚琴.化学分析方法在环境检测中的应用[J].化工设计通讯,2021,45(2):215,228.
- [3] 齐兴涛,杜佳,杜威,等.分析化学法实践于环境监测探析[J].中国石油和化工标准与质量,2022,39(4):49-50.