

环境检测中化学分析方法的成本效益比较研究

樊小郡 谢冰 (陕西华邦检测服务有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 环境检测是防止污染的重要步骤, 技术选择会影响治理决策的科学性和经济性; 化学分析方法因为灵敏度高、精准性强, 所以在检测重金属和有机污染物方面很常用, 而不同的方法在设备、试剂和人力成本上差异很大, 导致实际检测中既有“过度检测”也有“检测不足”的情况, 基于此本文通过建立一个成本效益分析框架, 结合实际数据, 系统地比较了光谱法、色谱法和电化学法的经济性, 为环境检测机构选择技术提供参考。

关键词: 环境检测; 化学分析方法; 成本效益分析; 重金属检测; 有机污染物分析

中图分类号: X830.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0097-03

Cost-effectiveness comparison of chemical analysis methods in environmental monitoring

Fan Xiaojun Xie Bing (Shaanxi Huabang Testing Service Co., Ltd. Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: Environmental monitoring serves as the cornerstone of pollution control, where the selection of analytical techniques critically influences the scientific rigor and cost-effectiveness of remediation strategies. Chemical analysis methods, renowned for their high sensitivity and precision, dominate applications in heavy metal detection and organic pollutant analysis. However, significant disparities in equipment investment, reagent consumption, and labor costs among different methodologies result in a paradoxical coexistence of “over-testing” and “under-testing” in practice. This study establishes a cost-benefit analysis framework, systematically evaluates the economic viability of spectroscopy, chromatography, and electrochemical methods through case-specific data, and provides actionable recommendations for environmental monitoring institutions in technology selection.

Keywords: environmental monitoring; chemical analysis methods; cost-benefit analysis; heavy metal detection; organic pollutant analysis

环境检测提供的数据质量直接影响到污染治理决策的科学性和经济性; 空气质量评估、水质改善和土壤修复通过环境检测化学分析方法来定量分析环境中的污染物种类和浓度来提供关键数据支持, 就像是环境保护的“眼睛”, 比如, 原子吸收光谱法(AAS)在处理重金属污染时, 可以精准检测水中的铅、镉等微量重金属, 帮助政府制定治理策略; 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)在监测有机污染物时, 可以定性定量分析挥发性有机物(VOCs), 帮助企业优化生产工艺以减少排放6.6%(407); 化学分析方法包括设备购置、试剂消耗、人力成本和长期运维费用等, 不同方法的成本差异就很大, 比如电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)的单台价格可达200到300万元, 而阳极溶出伏安法(ASV)的设备成本仅为ICP-MS的十分之一, 在检测精度和适用场景上有明显差异; 所以选取最为经济的分析方法, 同时确保检测精度, 成为环境检测领域亟需攻克的关键问题。

1 化学分析方法的成本构成与驱动因素

1.1 显性成本: 可直接量化衡量的直接投入

在环境检测领域, 显性成本是能够直接进行量化统计的投入部分。设备购置与折旧方面, 不同检测设

备价格差异显著。以重金属检测常用设备为例, 原子吸收光谱仪(AAS)单台价格大致在50-80万元区间, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)价格更高, 可达200-300万元。若按5年折旧周期计算, AAS年均设备成本为10-16万元, ICP-MS则为40-60万元。试剂与耗材消耗上, 色谱法检测有机污染物时, 色谱柱更换周期为6-12个月, 单根价格约1-2万元; 流动相溶剂(如甲醇、乙腈)的年消耗成本可达设备投资的15%-20%, 以GC-MS为例, 年均试剂成本约8万元。人力成本也不容忽视, 高精度检测方法(如ICP-MS)对操作人员专业要求高, 其薪酬水平较常规方法(如分光光度法)高30%-50%。

1.2 隐性成本: 长期运维中不可小觑的因素

隐性成本虽不直观, 但对检测成本影响深远。校准与维护上, 光谱类设备需定期校准光源与检测器, 年均维护成本占设备投资的5%-8%, 以AAS为例, 年均维护成本约4-6.4万元。能源消耗方面, ICP-MS运行功率约3-5kW, 单次检测能耗是AAS的2-3倍。以日均检测10次计算, ICP-MS年电费约1.2-2万元, AAS约0.4-0.8万元。数据质量风险同样关键, 方法选择不当会使检测结果出现偏差, 导致重

复检测或误判，进而增加额外成本，影响检测效益与决策准确性。

2 典型场景下的成本效益实证分析

2.1 重金属检测：光谱法与电化学法的对比分析

以 2022 年某市对工业园区周边土壤重金属污染状况调查项目为例，该项目需检测土壤中铅、镉、汞等重金属含量，样本量达 1200 个。比较 AAS 与阳极溶出伏安法（ASV）的经济性：

2.1.1 成本对比

AAS：设备投资 75 万元，年均试剂成本 4.5 万元，人力成本 9 万元（配备 2 名专业操作人员），年均维护成本 6 万元，总成本 104.5 万元/年。

ASV：设备投资 18 万元，电极更换成本 0.8 万元/年，人力成本 5 万元（1 名操作人员兼顾其他简单检测任务），年均维护成本 1.4 万元，总成本 25.2 万元/年。

2.1.2 效益评估

AAS 检测限低至 0.05 μg/L，能精准检测土壤中极低浓度的重金属，适用于对检测精度要求极高的场景，如居民区附近土壤污染评估，可避免因误判导致居民健康风险评估偏差，减少后续不必要的健康监测和治理成本。ASV 检测限为 0.5 μg/L，但检测速度是 AAS 的 3 倍，适合大批量样本筛查。在此项目中，ASV 仅用 3 个月完成全部样本检测，而 AAS 预计需要 9 个月，大大缩短了项目周期，提高了工作效率。同时，采用 ASV 筛查后，对疑似超标样本再用 AAS 复检，总成本较全部使用 AAS 检测降低约 55%。

2.2 有机污染物分析：色谱法与光谱法的选择策略

某大型化工企业污水有机污染物排放监测项目，在 2021 年该企业污水成分繁杂，需检测多种挥发性有机物（VOCs）和非挥发性有机物，样本量为 600 个；在此比较气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）与红外光谱法（IR）的经济性如下：

2.2.1 成本对比

GC-MS：高精度的有机污染物分析仪器，设备

投资 220 万元；在运营成本上年均色谱柱费用为 9 万元，载气耗费成本 2.5 万元；对于操作员专业学问与技艺的严苛需求，安排 2 名行家分析员，人工费用达 16 万元；年均保养费用为 18 万元；合计各项费用，GC-MS 年度总费用约为 265.5 万元。

IR：设备投资 45 万元，年均光源更换成本为 0.4 万元，因操作相对简便，只需 1 位操作员便能完成检测工作，人工费用为 5 万元；年均维护成本为 3.5 万元，所以 IR 年总成本约为 53.9 万元。

2.2.2 效益评估

GC-MS 具有出色的定性定量分析功能，能对超过 300 种挥发性有机化合物进行精确检测，能够精确辨识废水中各种有机污染物及其确切浓度，特别适合于对污染物种类和浓度要求极高的场合，例如化工厂废水排放监测，能精确的检测结果能有效防止因遗漏或错误检测导致的环境法规处罚；在该项目中，GC-M 检测出了一种企业未报告的微量有机污染物，企业因此及时采取了针对性的处理措施，避免了可能遭遇的重罚（根据相关环保法规，此类遗漏检测可能引发 50-100 万元的罚款）。

IR：在快速筛查方面 IR 虽然只能检测特定官能团，但检测速度非常快，是气相色谱-质谱联用的 5 倍，具有明显优势；在这个项目中，通过采用“初步筛查+复查”模式，先利用 IR 对废水样本进行快速筛查，筛选出可能含有有机污染物的样本，再用气相色谱-质谱联用进行精确分析，检测效率提升了 60%，这种模式总成本较全部使用气相色谱-质谱联用检测降低约 65%。

3 成本效益优化的策略建议

3.1 基于检测精度需求的技术分层策略

在不同使用场合对检测精确度的需求也会有所差异，在环境监测领域，这种情况直接决定了化学分析技术的选择；在面对高精度监测情境时，例如涉及严苛环境标准实施、可能的高风险污染源监控以及关键

表 1 重金属检测方法成本效益对比

方法	设备投资 (万元)	年均试剂成本 (万元)	年均人力成本 (万元)	年均维护成本 (万元)	总成本 (万元/年)	检测精度 (μg/L)	适用场景
AAS	75	4.5	9	6	104.5	0.05	居民区附近土壤污染评估
ASV	18	0.8	5	1.4	25.2	0.5	工业园区土壤污染普查

表 2 有机污染物检测方法成本效益对比

方法	设备投资 (万元)	年均试剂/耗材成本 (万元)	年均人力成本 (万元)	年均维护成本 (万元)	总成本 (万元/年)	检测能力	适用场景
GC-MS	220	11.5	16	18	265.5	定性定量分析 300 余种 VOCs	化工企业废水排放口监测
IR	45	0.4	5	3.5	53.9	检测特定官能团	化工废水快速筛查

环境质量指标评估等,应优先采用 ICP-MS、GC-MS 等高精度设备;以感应耦合等离子体质谱技术为例,检测限可低至百亿分之一乃至千万亿分之一级别,能够精确发现环境中微量污染物,如重金属元素镉的检测限可达 0.001 微克/升;一次检测成本比较昂贵,大约在 500 - 1000 元/次,从长远和整体效益来看优势非常明显;检测结果越准确,就能更好地避免因为判断错误导致的管理过多或管理不够的情况。研究显示,管理过度可能会让管理成本增加 30% 到 50%;投入很多人力、物力和财力;但如果管理不好,环境污染问题会越来越严重,造成更大的环境和经济负担,后续管理成本可能是前期及时管理的 2 到 3 倍。所以,在需要精确的地方,虽然选择高精度的设备前期投入大,但为了后续科学决策,首先得保证监测结果的可靠性,这样才能从长远来看,实现经济和环境效益的双赢。在大规模筛查的时候,比如大范围的土壤污染调查、化工废水快速检查等,可采用 ASV、IR 等低成本监测方法,并构建“初筛+复检”的监测模式,ASV 监测成本约为 50 - 100 元/次,IR 监测成本约为 80 - 150 元/次;利用低成本方法进行初步筛查,快速筛选出疑似超标样本,再针对这些样本使用精确度高的方法进行复检;假设在大规模土壤污染普查中,采用“初筛+复检”模式,初筛样本量为 10000 个,复检样本量为 1000 个,相较于全部使用精确度高的方法监测,总监测成本可降低 40% - 60%;这种模式既能保证监测的准确性和全面性,又能有效降低总监测成本,在大规模样本监测中展现出良好的经济效果。

3.2 样本量规模的经济性阈值分析

试样量规模是影响化学分析方式经济性的重要因素,当试样量超过一定界限(如 500 个/年)时,高阶仪器(如 ICP-MS)的单次检测成本会明显降低;例如:某地区环境检测机构,当试样量从 300 个/年提升到 800 个/年时,ICP-MS 的单次检测成本从 800 元/次降至 400 元/次,可降至常规方式的 1.5 倍以内;此时,购置高阶设备更具经济性,因为高阶设备虽然初始购买成本高,一台 ICP-MS 设备价格大约在 200 - 500 万元,可随着试样量的提升,其固定成本被分摊,单次检测成本降低,且能确保检测精度,满足大规模检测的需求,综合效益较高;而对于小试样量场景,如小型企业每年检测试样量仅为 50 - 100 个,自行购买检测设备容易导致设备空置,造成资源浪费。据统计,设备空置率可能高达 70% - 80%,所以建议采用第三方检测服务模式;第三方检测机构具有专业的仪器和技术人员,能够实现设备的充分利用,降低单次检测成本,企业或机构通过外包检测业务,

可避免设备购买、维护等成本,提高资金使用效率,如某小型化工企业为例,若自行购买检测设备,初始投资和每年维护成本约 50 万元,而采用第三方检测服务,每年检测费用仅 10 - 20 万元。

3.3 长期运维成本的动态管理措施

长期运维成本是环境检测设备总成本的重要组成部分,应建立设备全生命周期成本模型,将校准、维护、耗材更换等费用纳入采购决策考量范围。例如,一台 GC-MS 设备,初始购置成本为 150 万元,每年校准费用约 5 万元,维护费用约 8 万元,耗材更换费用约 3 万元,使用年限按 10 年计算,其全生命周期总成本约为 310 万元。在采购新设备时,通过对比不同品牌设备的全生命周期总成本,选择性价比高的设备,可有效降低长期运营成本。此外,推广“共享检测平台”模式也是一种有效的成本管控方式。通过环保部门或相关机构牵头,联合多家企业建立区域共享检测平台,将高端检测设备集中管理,供各单位按需使用。以某工业园区为例,建立共享检测平台后,设备利用率从原来的 30% 提高到 70%,各企业检测成本平均降低 35%,实现了资源共享和成本共担,促进环境检测行业的可持续发展。

4 结论

在环境检测领域,化学分析方法的成本效益受到检测精度要求、样本量规模以及运维管理模式等多重复杂因素的交互影响。为达成成本与效益的最优平衡,需采取一系列科学举措:构建分层检测体系,依据不同场景的精度需求精准选用分析方法;优化样本分配策略,针对大批量样本采用初筛与复检结合模式,降低总体成本;动态管理运维成本,通过全生命周期成本模型和共享平台模式,提升设备利用效率。展望未来,随着物联网与人工智能技术的深度融合与广泛应用,化学分析方法有望实现智能化升级,进一步提高检测效率、降低运营成本,从而显著提升成本效益比,为环境治理工作提供更为高效、精准且经济的技术支撑。

参考文献:

- [1] 梁曼玲. 化学分析方法在环境检测中的应用 [J]. 现代盐化工, 2025, 52(02): 66-68.
- [2] 毛元凤, 孙均均. 环境检测中化学分析方法的应用研讨 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024, (12): 40-42.
- [3] 黄秋娟. 环境检测中化学分析方法的应用研究 [J]. 大众标准化, 2024, (20): 178-180.
- [4] 薄乐. 化学分析方法在环境检测中的应用 [J]. 清洗世界, 2024, 40(06): 147-149.
- [5] 郑庆俊, 苏彤彤, 徐虹虹. 浅谈化学分析方法在环境检测中的应用 [J]. 清洗世界, 2024, 40(04): 160-162.