

绿色分析化学在环境样品检测中的应用与挑战

石凯玥

河南名扬环保工程有限公司 河南 济源 459000

摘要: 随着全球环境问题日益严峻,对环境样品进行精准、高效的检测已成为环境保护和风险评估的关键环节。然而,传统分析化学方法在提供可靠数据的同时,也因其高能耗、大量有毒有害试剂的使用及废弃物的产生,对环境本身构成了二次污染。在此背景下,绿色分析化学(Green Analytical Chemistry, GAC)应运而生,旨在从源头上减少或消除分析过程对人类健康和环境的危害。本文系统阐述了绿色分析化学的核心原则,重点综述了其在水体、土壤/沉积物、大气及生物等环境样品检测中的具体应用,包括样品前处理技术的革新(如微萃取技术、无溶剂技术)、仪器分析方法的绿色化(如小型化、自动化、联用技术)以及替代性绿色试剂的开发。同时,深入剖析了GAC在实际推广中面临的技术瓶颈、标准化缺失、成本效益权衡及认知不足等挑战,并对未来的发展趋势进行了展望,以期构建更可持续、更环保的环境监测体系提供理论参考与实践指导。

关键词: 绿色分析化学; 环境样品; 样品前处理; 微萃取; 绿色溶剂; 可持续发展

引言

21世纪以来,工业化、城市化迅猛发展带来严重环境污染问题,威胁生态与人类健康。科学准确获取污染物信息是制定环境政策等的基石,环境分析化学至关重要。但传统环境分析方法存在巨大“分析足迹”,完整分析过程含多个步骤,样品前处理环节突出,消耗大量有毒有机溶剂,还伴随高能耗与大量废弃物产生,其中高达80%的化学品消耗和废弃物源于此。“以污染治污染”与可持续发展理念相悖。在此背景下,绿色化学理念引入分析化学领域,催生绿色分析化学(GAC)。GAC基于预防优于治理原则,将环境友好性作为核心考量,终极目标是开发出满足分析性能且环保的分析策略。践行GAC对环境样品检测意义重大,能降低实验室风险与成本,提升数据真实性及环境决策科学性。本文将梳理GAC在环境样品检测领域的进展,探讨挑战并思考未来方向。

1 绿色分析化学的核心原则

绿色分析化学的理论基础源于P.T. Anastas和J.C. Warner于1998年提出的绿色化学十二原则。在此基础上,研究者们针对分析化学的特点,提炼和发展了一系列更具操作性的指导方针。S. Gałuszka等人提出的GAC十大原则被广泛认可,主要包括:(1)避免或减少样品采集;(2)在采样点进行直接分析(现场分析);(3)设计低能耗的分析方法;(4)最小化或消除衍生化步骤;(5)使用可再生、无毒、可生物降解的试剂;(6)通过自动化提高方法效率;(7)原位、在线、实时监测;(8)采用小型化设备;(9)增加样品通量,

提高分析效率;(10)产生尽可能少的二次废物。

2 绿色分析化学在环境样品检测中的应用

环境样品基质复杂多样,包括水、土壤、大气、生物组织等,每种基质都有其独特的物理化学性质和待测目标物。GAC的应用主要集中在两个方面:一是革新样品前处理技术,这是实现绿色化最关键的突破口;二是优化或开发绿色的仪器分析方法。

2.1 水体样品检测

水体作为污染物迁移的主要载体,其检测历来是环境分析的重点,但传统液-液萃取(LLE)等方法因消耗大量有毒有机溶剂而饱受诟病。绿色分析化学为此提供了一系列创新解决方案。以固相微萃取(SPME)为代表的微萃取技术,通过将涂有固定相的熔融石英纤维直接浸入水样或置于其顶空,实现了对目标物的高效吸附,整个过程无需任何有机溶剂,且其便携特性使其成为现场快速筛查的理想工具。与此同时,液相微萃取(LPME)家族,包括单滴微萃取(SDME)和中空纤维液相微萃取(HF-LPME),巧妙地利用微升级甚至纳升级的有机溶剂液滴或填充于多孔纤维内的溶剂膜,极大地减少了试剂用量,同时通过增大两相接触面积保证了萃取效率^[1]。分散液液微萃取(DLLME)则另辟蹊径,通过将萃取溶剂与分散剂快速注入水样形成瞬时乳浊液,实现了超快速、高富集倍数的萃取,尽管仍需少量溶剂,但其用量已降至极低水平,并且研究者正积极采用低共熔溶剂(DES)或离子液体(ILs)等绿色溶剂对其进行改良。此外,膜分离技术如渗透萃取(PE)利用选择性渗透膜进行分离,以及超临界流体萃取(SFE)采

用无毒、不可燃的超临界CO₂作为萃取剂,都为水体样品的绿色前处理开辟了新路径。

2.2 土壤/沉积物样品检测

土壤和沉积物基质的复杂性和目标物的强吸附性,使得其前处理尤为困难,传统索氏提取法耗时长、溶剂消耗巨大。绿色分析化学通过引入能量辅助萃取技术有效应对了这一挑战。加速溶剂萃取(ASE)在高温高压条件下进行,不仅能显著缩短萃取时间,还能大幅减少溶剂用量,并可通过选用丙酮/正己烷等相对低毒的混合溶剂进一步提升其绿色属性。微波辅助萃取(MAE)则利用微波能选择性加热,快速破坏基质结构释放目标物,其封闭系统设计有效防止了溶剂挥发。超声波辅助萃取(UAE)虽相对温和,但通过优化超声参数也能在保证效率的同时降低溶剂消耗。值得一提的是,最初为农残分析设计的QuEChERS方法,凭借其使用乙腈等低毒溶剂进行萃取并结合分散固相萃取(d-SPE)一步完成净化的简洁流程,已被成功拓展应用于土壤中有机污染物的快速前处理,充分体现了GAC追求流程简化与试剂绿色化的理念。

2.3 大气样品检测

大气样品的特殊形态决定了其采样与前处理方式的独特性,也为绿色化提供了天然优势。被动采样技术无需任何动力装置,依靠分子扩散原理即可长期、低能耗地采集空气中的污染物,特别适用于大范围背景监测。对于挥发性有机物(VOCs)的捕集,固相吸附管(如Tenax、Carbopack)结合后续的热脱附-气相色谱/质谱(TD-GC/MS)分析,实现了从采样到进样的全程无溶剂化^[2]。然而,最彻底的绿色化路径无疑是现场/在线监测技术的发展。便携式傅里叶变换红外光谱(FTIR)、差分光学吸收光谱(DOAS)以及激光诱导击穿光谱(LIBS)等技术,能够直接在污染源或环境空气中进行实时、连续的监测,从根本上规避了样品运输、保存及实验室前处理所带来的所有环境负担和潜在误差,代表了未来环境空气质量监控的发展方向。

2.4 生物样品检测

生物样品因其含有大量蛋白质、脂肪等复杂基质成分,给前处理带来了巨大挑战。绿色分析化学在此领域的应用侧重于开发能有效去除干扰物同时减少试剂消耗的策略。凝胶渗透色谱(GPC)作为一种尺寸排阻技术,能够高效地分离并去除生物样品中的大分子脂质和蛋白质,是一种相对温和且绿色的净化手段。基质固相分散(MSPD)技术则将样品与固相吸附剂一同研磨,使样品均匀分散于吸附剂表面,随后通过选择性洗脱目

标物,巧妙地将匀浆、提取和净化三个步骤合为一体,显著简化了操作流程并减少了溶剂用量。更具前景的是酶解辅助提取方法,它利用蛋白酶、脂肪酶等生物催化剂,在温和条件下选择性降解基质中的干扰成分,不仅条件友好,而且专一性强,为生物样品的绿色前处理提供了全新的思路。

3 绿色分析化学面临的主要挑战

尽管GAC理念深入人心,技术成果丰硕,但在从实验室走向大规模实际应用的过程中,仍面临诸多挑战。

3.1 技术层面的瓶颈

许多新兴的绿色前处理技术,如SPME、LPME等,虽然在减少溶剂消耗方面成效显著,但其普适性和稳健性仍有待加强。这些方法往往针对特定类型的目标物或基质进行优化,在面对成分未知或极其复杂的实际环境样品时,其重现性和可靠性可能不如经过长期验证的传统方法^[3]。此外,微型化和无溶剂化策略在降低环境影响的同时,也可能导致进入分析仪器的绝对物质量减少,这对于痕量乃至超痕量污染物的检测构成了严峻挑战,如何在保证足够灵敏度与检出限的前提下实现绿色化,是技术开发者必须解决的核心问题。再者,作为传统有机溶剂替代品的离子液体、低共熔溶剂等,虽然在理论上具备绿色潜力,但其高昂的成本、较大的粘度、潜在的未知生态毒性以及废弃后的行为不确定性,都限制了它们的广泛应用。而水、乙醇等公认的安全溶剂,其萃取能力又相对有限,难以满足对所有类型分析物的覆盖需求。

3.2 标准化与法规的滞后

当前,无论是国际还是国内的权威监管机构,其发布的官方标准分析方法绝大多数仍基于成熟但非绿色的传统技术。一个全新的GAC方法要获得官方认可,成为具有法律效力的标准方法,必须经历漫长而严格的多实验室协同验证、与现有标准方法的比对以及繁琐的审批程序^[4]。这种标准化进程的严重滞后,使得许多优秀的GAC研究成果只能停留在科研论文层面,无法在政府环境执法、司法鉴定、贸易仲裁等正式场合得到应用,极大地制约了其社会价值的实现。

3.3 成本效益的权衡

开发和验证一套全新的GAC方法需要投入可观的研发成本。尽管从长远来看,减少的试剂采购费用和废物处理成本可以带来经济效益,但初期购置专用自动化设备(如ASE、MAE系统)或采购高成本的新型绿色溶剂,对于预算紧张的基层实验室或发展中国家的研究机构而言,无疑是一笔沉重的负担。在实际决策中,管理

者往往更倾向于关注短期、可见的经济支出，而忽视了长期的环境效益和社会责任，这种短视的成本效益权衡成为GAC推广的一大障碍。

3.4 认知与教育的不足

尽管学术界对GAC的重要性已有广泛共识，但在一线分析技术人员、实验室管理者乃至更高层面的政策制定者中，对其深刻内涵、战略价值及具体实施路径的理解仍然不够深入。许多人仍将GAC视为一种可有可无的“锦上添花”，而非分析化学发展的必然要求。同时，现有的分析化学高等教育体系未能及时将GAC的前沿理念、评价工具和核心技术全面、系统地融入课程教学，导致新一代分析化学从业者缺乏必要的绿色思维训练和实践经验，这从人才储备的源头上限制了GAC的普及与发展。

4 未来展望

面对上述挑战，绿色分析化学的未来发展路径清晰而坚定。首先，智能化与自动化的深度融合将成为关键驱动力。通过将人工智能（AI）和机器学习（ML）算法嵌入分析流程，可以实现对实验参数的自主优化、最佳萃取条件的智能预测以及干扰信号的自动识别与校正，这不仅能大幅提升方法的效率、稳健性和重现性，还能进一步减少人为操作带来的资源浪费和误差。其次，新材料的突破将是技术创新的核心引擎。金属有机框架（MOFs）、共价有机框架（COFs）以及分子印迹聚合物（MIPs）等新型功能材料，凭借其可设计的孔道结构、超高比表面积和特异性的识别位点，有望实现对特定污染物的“靶向”捕获与富集，从而在保证高灵敏度的同时，实现极致的绿色化。再者，未来的GAC研究将超越单一的分析步骤，迈向对整个分析流程乃至分析仪器本身的全生命周期绿色化考量。这包括采用可再生或可降解材料制造仪器部件、设计易于回收再利用的一

次性耗材，以及开发能将分析废物转化为有用资源的闭环技术。最后，构建一个开放共享的全球性GAC知识库与加速其标准化进程至关重要。通过建立统一的方法数据库和验证平台，促进全球科研人员的经验交流与技术共享，并积极推动与国际标准化组织的合作，将成熟的GAC方法尽快纳入官方标准体系，为其大规模、规范化应用扫清制度障碍。

5 结语

绿色分析化学代表了环境分析化学未来发展的必然方向。它不仅是对传统分析范式的深刻变革，更是对可持续发展理念在科学实践层面的具体响应。通过在样品前处理和仪器分析等关键环节引入微型化、自动化、无溶剂化及绿色试剂等策略，GAC已在水、土、气、生等各类环境样品的检测中展现出巨大的应用潜力和显著的环境效益。然而，技术普适性、标准化缺失、成本考量及认知鸿沟等问题仍是其迈向广泛应用道路上必须跨越的障碍。未来，唯有通过持续的技术创新、跨学科的协同攻关、健全的标准体系建设以及全社会绿色意识的提升，才能真正实现分析化学的绿色转型，使其在守护地球生态环境的征程中发挥更加清洁、高效、可靠的作用。绿色分析化学的终极理想，是让每一次对环境的“审视”，都不再给环境带来一丝额外的负担。

参考文献

- [1]常婷婷.绿色化学技术在环境污染治理中的应用分析[J].生态与资源,2025,(06):175-177.
- [2]徐丹丹,秦巍.绿色化学技术在环境污染治理中的运用分析[J].中国战略新兴产业,2024,(20):115-117.
- [3]郭晓艳.绿色化学技术在环境污染治理中的应用研究[J].化纤与纺织技术,2024,53(02):37-39.
- [4]张良.探析绿色化学技术在环境污染治理中的应用[J].皮革制作与环保科技,2023,4(13):6-8.