

安捷伦元素分析创新技术和应用摘要

应用文集



前言

本文集以安捷伦 ICP 系列仪器为核心，通过融合先进的硬件技术、模块化的联用平台、自动化的附件和智能化的软件，为不同领域元素的检测和研究提供前沿定制化思路和高效检测方案，安捷伦以持续不断的技术创新和深入理解行业的需求为出发点，全力支持客户在原子光谱领域挑战检测的极限、开拓研究的边界。

先进材料/新能源/石油化工

以半导体、新能源等为代表的高端制造业集成了每个细分领域最尖端的技术，在成分研究和品质控制上，需要全方面的元素分析解决方案，不仅包括元素主量和杂质的检测，还扩展到颗粒物的检测，安捷伦 ICP-MS/MS 和 ICP-OES 在该行业元素分析领域成为不二之选。在半导体领域，高纯试剂、光刻胶、晶圆及原料通过 ICP-MS/MS 可以实现痕量金属杂质和纳米颗粒的检测；模块化联用比如在线 VPD-ICP-MS/MS 系统可以构建全天候的晶圆污染监控体系，激光剥蚀 - 气体交换装置 (LA-GED-ICP-MS/MS) 实现了 SiC/GaN 晶圆金属杂质的直接分析。在高纯金属和稀土等资源矿产领域，ICP-MS/MS 技术通过卓越的干扰消除技术，无需去除基体即可直接准确定量 5N 或 6N 级别以上的超痕量杂质，确保国家在战略材料相关领域的检测可靠性。新能源材料方向，智能 ICP-OES 联合自动稀释系统 (ADS 2) 可以实现固态电解质 LATP、磷酸铁锂正极材料等多元素精准高效检测。ICP-MS 还可以用于电池安全性相关的铁价态及电化学相关的硫同位素分异等行业前沿研究。石油化工方面，单颗粒分析技术，GPC 联用技术可应用于沥青质样品，石油馏分样品的总量、形态和颗粒态分析，进一步服务于炼化工艺改进，展现了从原材料到终端产品的全流程质量控制能力。

生命科学与临床研究

ICP-MS 数据采集速度的突破和大数据算法的成熟使得在生命科学和临床研究领域可以使用安捷伦 scICP-MS 技术直接对单个细胞中元素组成和含量进行分析。目前主要聚焦单细胞、生物大分子分析、颗粒物表征等前沿方向，包括成熟的联用平台 (CE/capLC) 以及定制化的微滴发生器、螺旋通道微流控芯片、三维螺旋螺旋管阵列等技术。capLC-ICP-MS/MS 在线同位素稀释法可以做到生物大分子绝对定量，实现蛋白和多肽的精准检测。毛细管电泳 -ICP-MS (CE-ICP-MS) 联用技术在硒纳米颗粒表征、有机锡化合物相互作用研究等方面表现卓越；微流控流质谱联用、激光诱导荧光 -ICP-MS 二维测量等创新技术，可以实现单细胞金属含量定量、生物标志物多重分析及癌症干细胞识别；安捷伦 scICP-MS 检测体系为生命科学研究提供了从细胞水平到分子层面的完整技术支撑体系。

制药

原子光谱在制药行业已经不再局限于药物研发与质量控制中有害元素的品质控制，技术的进步使原子光谱在药物递送、药物代谢、

生物成像等领域都可以发挥重要作用。在药物递送系统研究中采用铕 (III) 穴状配合物标记联合 LA-ICP-MS 成像技术，可视化追踪曲妥珠单抗体内分布，金纳米颗粒靶向递送系统结合 CE-ICP-MS/MS 评估药物结合效率。寡核苷酸药物可使用 ICP-MS/MS 建立磷酸二酯键 / 硫代磷酸酯键比值测定方法，放射性药物分析及金属药物积累模式研究为创新药物开发提供关键技术保障。体现了安捷伦原子光谱技术从药物设计到质量控制的完整解决方案。

食品

食品从安全到品质的全面需求，促进了 ICP-MS 联用技术在食品品质控体系中的应用。安捷伦通过 LC/IC-ICP-MS、CE-ICP-MS、GC-ICP-MS 等联用技术，实现多聚磷酸盐、农药残留及重金属形态（如砷、铅、铬、锡等）的多维度检测。在线固相萃取与 HPLC-ICP-MS 联用，简化了分析流程可以精准分析谷物中超痕量元素形态。针对新兴污染物，创新性建立 ICP-MS/MS 总氟检测分析体系。通过单颗粒 ICP-MS (spICP-MS) 技术实现食品中纳米颗粒物的快速筛查与定量。安捷伦这些技术为风险评估、污染物溯源及营养强化提供技术支撑。

环境

近些年，包括纳米颗粒物检测在内的新污染物检测技术的开发和应用备受瞩目。采用 spICP-MS 技术，分析海湾、土壤、大气中金属纳米颗粒及微塑料的粒径与分布，可以更精准地对其环境健康风险进行分析。开发 ICP-MS/MS 方法检测环境中 PFAS 的总氟含量及全氟化合物降解产物，以及通过时间分辨 ICP-MS 定量紫外线和氯对微塑料的影响，为环境污染物的迁移转化和相关材料研究提供技术支撑。此外，CE-ICP-MS 联用可以高效地同步分析砷和硒形态，探究腐殖酸对镉、铀等元素的络合作用。

地质

安捷伦 ICP-MS/MS 技术以灵活的干扰去除手段和优异的干扰去除效果，扩展了地质领域同位素分析的类别，科研工作者结合激光剥蚀进样技术，开发出多项 ICP-MS/MS 高精度同位素分析技术。通过质量转移模式使用 ICP-MS/MS 精确测定岩石中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值；灵活的化学反应模式消除各种干扰，实现 ICP-MS/MS 准确进行 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分析。采用 ICP-MS/MS 的核素检测技术涵盖海洋生物样本中铈和钐同位素同步测定，并采用反应模式解决同质异位素在定量检测时的干扰问题。采用 LA-ICP-MS/MS 可以实现地质材料中氟分布原位分析，也可以完成珍稀样品（如嫦娥六号月壤）中的微量、痕量元素定量分析。新分析方法的开发展现了 ICP-MS/MS 在地质研究和环境监测领域的技术优势。此外，利用基于空气运行的微波等离子体原子发射光谱 (MP-AES) 在野外、矿区对地质样品常量元素进行定量分析，可以更好地服务于行业现场快速分析需求。

目录

技术概述

题目	应用方向	页码
使用 Agilent 7900 ICP-MS 对纳米材料进行单颗粒分析	单颗粒	6
使用 spICP-MS 测量纳米颗粒中的多种元素	单颗粒/多元素	6
使用 Agilent 7900 ICP-MS 测量单细胞的元素含量	单细胞	6
通过 ICP-MS 和微流自动进样系统进行单细胞和微塑料分析	单细胞/微塑料	7
使用 ICP-MS/MS 测定氟的可行性研究	氟的测定	7
双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM)	碰撞反应池技术	7
配备双池耦合碰撞反应系统的 Agilent 9500 ICP-MS/MS 空气反应模式	碰撞反应池技术	8
利用 ICP-MS 和短驻留时间提高单纳米颗粒的分辨率	单细胞	8

先进材料/新能源/石油化工

题目	应用方向	页码
利用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 准确检测高纯度酸和溶剂中的不溶性 SiO ₂ NPs	半导体/高纯试剂	9
使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 对两种等级的 NMP 中的溶解态和颗粒无机杂质进行分析	半导体/高纯试剂	9
使用 ICP-MS/MS 测定半导体光刻胶中的超痕量杂质元素	半导体/光刻胶	10
使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 分析高纯度铜中的超痕量杂质	半导体/靶材, 前驱体	10
使用 ICP-MS/MS 对半导体前驱体材料三甲基铝中的痕量杂质元素进行测定	半导体/金属前驱体	11
利用安捷伦 ICP-MS 对三氯硅烷进行痕量元素分析	半导体/特气	11
使用气体交换装置 (GED)-ICP-MS 分析特种半导体气体中的金属杂质	半导体/GED-特气	12
使用 Agilent 7900 ICP-MS 测定高纯石英砂中的痕量杂质元素	半导体/硅基	12
在线 VPD-8900 ICP-MS/MS 为晶圆污染控制 (全天候 24/7) 保驾护航	半导体/VPD-晶圆	13
通过 LA-GED-MSAG-ICP-MS/MS 直接分析 SiC 和 GaN 晶圆中的金属杂质	三代半导体	13
利用飞秒激光剥蚀 (LA-)ICP-MS 对高纯金属和合金进行元素分析	金属材料	14
使用 ICP-MS 半质量数模式分析钕铁硼中的稀土杂质元素	永磁材料	14
直接测定高纯镧系 REE 氧化物中难分析的痕量稀土元素	高纯稀土	15
使用 Agilent 1260 II LC-7850 ICP-MS 分析锂离子电池中二价铁和三价铁	锂电池/LC-ICP-MS	15
使用 ICP-OES 测定磷酸铁锂 (LiFePO ₄) 正极材料中的常量元素	锂电池/磷酸铁锂	16
稳定硫同位素与锂的电化学研究	锂电池/电化学	16
利用 ICP-OES 测定固态硫化物电解质中的元素	固态电池	17
智能 ICP-OES 联合 ADS 2, 协同赋能 固体电解质磷酸钛铝锂 (LATP) 高效精准检测	锂电池/固态电池	17
使用 ICP-MS/MS 对沥青质溶液进行单纳米颗粒分析	沥青/单颗粒	18
ICP-MS/MS 及 GPC-ICP-MS/MS 在石油馏分总量及形态分析中的应用潜力研究	石油/GPC-ICP-MS	18
利用 Agilent 9500 ICP-MS/MS 分析高纯钛	9500 金属材料	19
使用配备 m 透镜的 Agilent 9500 ICP-MS/MS 进行高纯度试剂超痕量分析	9500 半导体/高纯试剂	19

生命科学与临床研究

题目	应用方向	页码
铜驱动透明细胞肾细胞癌代谢状态的重塑和进展	单细胞/多技术平台	20
利用微流控流式细胞仪和质谱技术对单个细胞中的生物标志物及药物摄取进行多重分析	单细胞	21
通过双同位素电感耦合等离子体质谱法进行单细胞表型分析以识别癌症干细胞	单细胞	22

生命科学与临床研究

题目	应用方向	页码
使用激光诱导荧光和 ICP-MS 进行单粒子/细胞分析的二维细胞计数平台	单细胞	22
采用电感耦合等离子体质谱联用微滴发生器对人白血病 K562 单细胞进行元素定量分析	单细胞	23
使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 测定单个酵母、绿藻和 血红细胞中的 Mg、P、Fe 和 Zn	单细胞	23
汞对微囊藻毒性作用的研究：单细胞水平内汞含量与藻类生理反应之间的关联	单细胞	24
使用毛细管单细胞电感耦合等离子体质谱在线系统追踪单个四膜虫中的汞	单细胞	24
通过单槽 ICP-MS 准确定量单个集胞藻 PCC 6803 细胞中的金属：双重校准和样品稳定策略	单细胞	25
基于琼脂糖微滴的数字 LAMP 检测法用于单颗粒 ICP-MS 中病毒 DNA 的计数	单细胞	26
通过单细胞电感耦合等离子体质谱法检测大肠杆菌中的组氨酸标签蛋白	单细胞	26
采用 LA-ICP-MS 技术定位组织薄切片上的内源性金属：基于安捷伦 ICP-MS 用激光剥蚀技术对生物样本进行多元素分析	LA-ICP-MS 成像	27
采用 Agilent 8800 电感耦合等离子体串联质谱仪通过 capLC-ICP-MS 联机同时测定多肽和磷酸肽	多肽绝对定量/LC-ICP-MS	27
蛇毒中蛋白质的绝对定量分析 — 使用 capLC-ICP-MS/MS 和在线同位素稀释法分析	蛋白绝对定量/LC-ICP-MS	28
采用体积排阻色谱-电感耦合等离子体质谱法测定人血清中的铜蓝蛋白	蛋白定量/SEC-ICP-MS	28
CE-ICP-MS 和 capLC -ICP-MS 用于研究含镉、铜和锌的金属蛋白的对比	蛋白定量/CE-ICP-MS	29
使用电感耦合等离子体质谱联用的毛细管电泳定量 DNA 中的磷	CE-ICP-MS 联机	29
采用毛细管电泳/电感耦合等离子体质谱联用技术 (CE/ICP-MS/MS) 对脂质体阿霉素制剂中的脂质体内部和外部硫酸盐进行直接同步测定	CE-ICP-MS 联机	30
基于元素螯合标记和毛细管电泳-感耦合质谱法的溶菌酶超灵敏定量分析	CE-ICP-MS 联机	30
通过毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用技术分析人血浆中的硒纳米颗粒	CE-ICP-MS 联机	31
通过毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用表征对有机锡化合物与人血清白蛋白之间的相互作用	CE-ICP-MS 联机	31
毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱法研究羧化核壳磁性纳米粒子与多粘菌素 B 之间的相互作用	CE-ICP-MS 联机	32

制药

题目	应用方向	页码
利用单细胞和电感耦合等离子体质谱 ICP-MS 技术研究顺铂敏感和耐药细胞模型中铂基金属药物的积累模式	单细胞/金属药物	33
利用铈 (III) 穴状配合物对曲妥珠单抗进行体内生物分布的质谱成像 (LA-ICP-MS) 与定量分析	LA-ICP-MS 质谱成像	33
ICP-MS 在放射性药物分析中的应用	放射性药物	34
开发一种用于治疗性寡核苷酸的绝对定量和磷酸二酯与硫代磷酸酯比率测定的 ICP-MS/MS 方法	寡核苷酸绝对定量	34
金纳米颗粒靶向递送顺铂：通过 CE-ICP-MS/MS 研究纳米载体表面修饰类型对药物结合效率的影响	CE-ICP-MS/单颗粒靶向药物	35
毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱 (CE-ICP-MS) 在生物形态分析研究与应用中的最新进展：从抗癌药物到纳米颗粒及其他领域	CE-ICP-MS/金属药物	35

食品

题目	应用方向	页码
使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 对矿泉水进行硫同位素分馏分析	同位素比值	36
使用单颗粒 ICP-MS 定量分析植物叶中的铜纳米颗粒	单颗粒表征	36
质量转移-串联电感耦合等离子体质谱法测定食品中总氟的方法开发	新污染物/总氟化物	37
海产品中丁基锡、苯基锡及辛基锡类化合物的稳健、高灵敏分析方法开发	新污染物/有机锡	37
使用配备 Quick Change 快速切换阀头的 HPLC-ICP-MS 实现元素形态分析方法的自动序列分析	LC-ICP-MS 联机	38
双硫腺功能化 C18 在线固相萃取-HPLC-ICP-MS 用于谷物和环境样品中超痕量有机和无机汞的形态分析	LC-ICP-MS 联机	38
利用 IC-ICP-MS 测定水产中的多聚磷酸盐	IC-ICP-MS 联机	39
利用基于 GC-ICP-MS/MS 的磷和硫检测方法测定食品中的农药	GC-ICP-MS 联机	39
利用钨螯合物标记和毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱法同时超灵敏定量检测多种肽类物质	CE-ICP-MS 联机	40

食品

题目	应用方向	页码
CE-ICP-MS 法测定农药残留：卷心菜叶中福美锌和代森锌	CE-ICP-MS 联机	40
CE-ICP-MS：用于膳食补充剂中纳米材料尺寸表征的高分辨率分析的开发与优化	CE-ICP-MS 联机	41
采用新型接口将毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用，对砷化合物进行形态分析	CE-ICP-MS 联机	41
采用 CE-ICP-MS 对海洋动物中的铅进行形态分析	CE-ICP-MS 联机	42
利用 CE-ICP-MS 同时分析食品中的三价铬、六价铬和吡啶甲酸铬	CE-ICP-MS 联机	42
采用配备不连续进样和自动稀释功能的 ICP-MS/MS 对食品进行自动化分析	9500 自动化分析	43

环境

题目	应用方向	页码
海湾环境中金属基纳米颗粒的位置依赖性出现和分布	单颗粒	44
通过单颗粒电感耦合等离子体质谱法对盐度极高的环境中生物生成的硒纳米颗粒的特性进行研究：以地中海嗜盐菌为例	单颗粒	44
使用单颗粒电感耦合等离子质谱 (spICP-MS) 法分析土壤中的硫化汞纳米颗粒物	单颗粒	45
通过 spICP-MS 研究聚四氟乙烯分解为微粒的过程：一种用于检测含氟颗粒的系统性开发方法	单颗粒/氟化物	45
利用 ICP-MS/MS 和 HPLC-ICP-MS/MS 对氟化合物进行新颖的非靶向分析	氟化物及形态	46
利用 ICP-MS 进行氟特异性检测有助于在非靶向分析中识别全氟和多氟烷基物质的降解产物	全氟及多氟烷基化合物 (PFAS)	46
应用 ICP-MS/MS 测定土壤中可提取有机氟 (EOF) 的总氟含量	有机氟 (EOF)	47
利用单颗粒模式下运行的电感耦合等离子体质谱法检测微塑料	微塑料	48
通过时间分辨电感耦合等离子体质谱法定量氯消毒对微塑料的影响	微塑料	49
追踪纳米塑料从土壤向植物的转移过程：不同分析技术的比较	微塑料	50
单颗粒电感耦合等离子体质谱法中用于非破坏性微塑料采样的激光消融技术	LA-ICP-MS	50
毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用的高效接口及其在砷和硒形态同时分析中的应用	CE-ICP-MS	51
通过毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱法分析腐殖酸对铈和铀的络合作用	CE-ICP-MS	52
使用配备双池耦合碰撞反应系统和不连续进样的 ICP-MS/MS 分析环境水样	9500 水体分析	52
利用 ICP-MS 结合先进样品引入装置分析土壤和沉积物	9500 土壤分析	53
使用配备创新碰撞 / 反应池的 ICP-MS 对土壤和沉积物进行快速可靠分析	9500 土壤分析	53
利用 ICP-MS/MS 和集成式快速阀进样系统直接分析海水	9500 海水分析	54

地质

题目	应用方向	页码
南极-艾特肯盆地玄武岩的超贫化地幔来源	LA-ICP-MS/月球土壤	55
利用 X 射线荧光和飞秒激光烧蚀电感耦合等离子体质谱法对嫦娥六号月球土壤样本进行串联元素分析	LA-ICP-MS/月球土壤	56
通过激光-电感耦合等离子体串联质谱技术进行氟元素分析：在生物和地质样本中的应用概念验证	LA-ICP-MS/氟元素	57
4200 微波等离子体原子发射光谱仪 (MP-AES) 测定地质样品中的常量和微量元素	MP-AES/地质样品	57
使用 ICP-MS/MS 在 MS/MS 模式下消除 ¹⁷⁶ Yb 和 ¹⁷⁶ Lu 对 ¹⁷⁶ Hf 的干扰，以实现准确的 ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf 同位素比分析	同位素比值	58
利用 ICP-MS/MS 在质量转移模式下测量岩石中的 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr 同位素比值	同位素比值	58
海洋生物样本中 ⁹⁰ 锶和钐同位素的同步测定	核素	59
利用串联四极杆电感耦合等离子体质谱仪氧气反应模式消除钼的同质异位素对钨测定的干扰	核素	59

安捷伦原子光谱技术简介

技术概述

使用 Agilent 7900 ICP-MS 对纳米材料进行单颗粒分析

AN 号： 5991-4401CHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本应用简报系统阐述了使用 Agilent 7900 ICP-MS 进行纳米颗粒单颗粒分析的方法与性能验证。spICP-MS 通过时间分辨采集模式实现单颗粒信号分离，结合低流速进样与背景扣除算法，可同时测定颗粒数量、粒径分布及元素浓度。本研究采用 NIST 8013 金纳米颗粒和银纳米颗粒作为标准物质，使用不同的积分时间（3 ms/100 μ s）都得到和标物证书一致的结果，在 100 μ s 积分时间下，信号强度的立方根与粒径呈指数关系（ $R^2=0.999$ ），验证了 7900 ICP-MS 在 10-100 nm 粒径范围内的分析能力。实验表明，7900 的新型正交检测器灵敏度更高，可检测低至 7-9 nm 级纳米颗粒。该方法解决了传统 ICP-MS 仅能测定元素总浓度的局限，为纳米材料环境暴露评估和毒理学研究提供了关键工具。

使用 spICP-MS 测量纳米颗粒中的多种元素

AN 号： 5994-0310ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本文系统阐述了基于安捷伦 7900 ICP-MS 创新的 spICP-MS 多元素采集程序，突破传统单颗粒测试中元素分析数量的局限，首次实现单次进样同时检测 16 种元素的纳米颗粒。研究选取了防晒霜样品和游泳池水样，验证了该方法在成分鉴定、粒径分布分析及环境风险评估中的优势。本研究使用无需稳定时间的快速时间分辨分析模式，驻留时间缩短至 100 μ s；通过单纳米颗粒应用模块实现多元素数据同步采集与整合；所有分析元素只需一次样品提升和冲洗时间，降低了样品污染的风险。实验表明，该方法测得防晒霜中 $Al(OH)_3$ 、 TiO_2 、 ZnO 的浓度与消解法结果高度一致，且能有效区分不同来源的纳米颗粒。在环境监测中，发现室外游泳池水样中 TiO_2 和 ZnO 纳米颗粒浓度显著高于室内泳池，儿童泳池中纳米颗粒浓度最高达 1610 ng/L，揭示了防晒霜使用对水环境的潜在污染风险。该方法能够在一次采集中提供多种元素的粒径、颗粒浓度和颗粒分布并显著缩短了样品运行时间。该技术为纳米材料的快速筛查、环境暴露评估及监管提供了高效工具。

使用 Agilent 7900 ICP-MS 测量单细胞的元素含量

AN 号： 5994-0845ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本研究基于 Agilent 7900 ICP-MS 开发了一种单细胞电感耦合等离子体质谱分析方法，通过 scICP-MS 模式实现对单个酵母细胞中四种关键元素的高灵敏度定量分析。极高的灵敏度对于检测单个细胞中的阿克 (ag, 1.0×10^{-18} g) 级分析物至关重要。该方法突破了传统细胞元素全定量分析技术的局限性，实现完整酵母细胞的单细胞多元素分析，解决了传统方法因样品前处理导致的细胞结构破坏和结果平均化问题。本研究在 240 秒内完成 4 种元素分析，样品量需求降低至 100 μ L，较传统方法效率提升 2.67 倍；Fe 和 Zn 含量达到亚飞克级检测限，P/S 元素 RSD 值分别达 2.4% 和 16.1%；将 ICP-MS 计算得出的细胞数量除以通过显微镜计数得出的细胞数量，得出的细胞传输效率为 25%。安捷伦多元素 scICP-MS 方法能够用于详细测量和研究多种金属在细胞生物学中的作用。该技术提供了有关单个细胞中固有金属含量和金属络合物的有价值的信息。scICP-MS 还可用于研究细胞对金属和含金属纳米颗粒的吸收、累积和释放。该技术可扩展应用于金属纳米颗粒与细胞相互作用的动态监测，为金属组学研究开辟了新路径。

通过 ICP-MS 和微流自动进样系统进行单细胞和微塑料分析

AN 号： [5994-6822ZHCN \(点击下载全文\)](#)

安捷伦解读： 本文系统阐述了基于 ICP-MS 与微量自动进样系统的单细胞及微塑料元素分析技术。研究通过 Agilent 8900 ICP-MS/MS 结合 ESI microFAST 单细胞自动进样器，实现了酵母细胞中 C、P、Fe、Se 四种元素及聚苯乙烯微球中 ^{13}C 的高灵敏度检测。ESI 微量进样系统与安捷伦 ICP-MS 或 ICP-MS/MS 结合可轻松高效地分析单细胞或颗粒；更短的 ICP-MS 驻留时间 (0.1 ms) 可确保更高的颗粒信号 - 离子（噪声）背景比 (S/N)；安捷伦 ICP-MS 具有高灵敏度和宽动态范围，可检测不同粒径范围的细胞或颗粒；通过 Agilent ICP-MS MassHunter 软件中的安捷伦快速多元素纳米颗粒分析模块实现多元素分析，该软件可检测细胞或颗粒中不限数量的待测元素。实验验证显示，该方法可准确区分 1、2、5 μm 聚苯乙烯微球信号，检测限低至 0.1ppm 浓度水平，且粒径测量误差 <5%。ESI microFAST 单细胞自动进样器和进样系统与 Agilent 8900 ICP-MS/MS 无缝结合，为单细胞或微塑料 (MPs) 的元素分析提供了全自动解决方案。Agilent ICP-MS MassHunter 软件中的纳米颗粒分析模块自动

执行对单细胞或 MPs 进行多元素分析所需的所有计算，提供了一种完全集成的方法。该技术可有效补充传统 LDIR 方法在亚微米级颗粒检测的不足，为环境微塑料污染监测和细胞元素组学研究提供了全自动、高通量的解决方案。

使用 ICP-MS/MS 测定氟的可行性研究

AN 号： [5991-2802ZHCN \(点击下载全文\)](#)

第 221-223 页

安捷伦解读： 本研究针对传统 ICP-MS 无法直接测定氟元素的技术瓶颈，首次提出基于 ICP-MS/MS 的新型分析方法。核心挑战在于氟原子电离能高于氩等离子体的电离能力且 m/z 19 处存在水基质产生的 $^1\text{H}^{16}\text{O}^+$ 和 $^1\text{H}^{18}\text{O}^+$ 严重干扰。研究者通过热化学分析筛选出钡作为反应载体，利用其与氟形成的含氟多原子离子 (BaF^+) 进行间接测定。实验采用 Agilent 8800 ICP-MS/MS 系统，通过优化等离子体条件 (RF 功率 1500W、载气流速 1.00L/min 等) 和反应气体参数 (O_2 流速 1mL/min、 NH_3 流速 8.5mL/min)，成功实现 BaF^+ 的稳定生成并测定。研究创新性地应用 MS/MS 模式消除干扰：在 O_2 模式下通过质量转移消除 $^{138}\text{Ba}^{18}\text{O}^+\text{H}^+$ 干扰，检测限达 27ppb；在 NH_3 模式下通过氨气质量转移生成 $\text{BaF}(\text{NH}_3)_4^+$ ，获得更低的背景等效浓度 (87ppb)。实验结果表明，该方法在检测限和灵敏度方面可与传统 HR-ICP-MS 相媲美，同时反映出 ICP-MS/MS 在监测特定反应产物 (如 $\text{BaF}(\text{NH}_3)_3^+$ 、 $\text{BaF}(\text{NH}_3)_4^+$) 展现出方法开发的灵活性。研究为复杂基质中氟元素的高灵敏度分析提供了新思路，尤其适用于环境、地质和材料科学领域中痕量氟的定量分析。

双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM)

AN 号： [5994-8985ZHCN \(点击下载全文\)](#)

安捷伦解读： 本技术概述介绍了 Agilent 9500 ICP-MS/MS 配备的双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和高性能氦气碰撞模式 (AHM)，阐述了 DCS 与 AHM 性能提升的机制。与传统 He-KED 相比，AHM 模式使低质量数元素 (例如铍 (Be) 和硼 (B)) 的灵敏度提升约 20 倍，中、高质量数元素的灵敏度提升约 2 倍。另外，在保持优异检出限 (DL) 的前提下，使数据采集时间缩短 33% 以上，从而加快了分析速度。DCS 基于对离子行为和碰撞动力学的深入理解而开发，能够在宽质量范围内提供出色的干扰消除能力和高灵敏度。当使用 He 以外的池气体 (例如 O_2 或 NH_3) 时，在前、后离子导杆施加相同的偏置电压，使系统能够像传统的单离子导杆一样运行。

双离子导杆设计和双机制方法 (KED + CID) 突破了传统高能 HEHe 和 He-KED 模式的局限，实现了更广泛的应用和更出色的丰度灵敏度。AHM 模式可简化工作流程，缩短分析时间，并提高数据质量。DCS 与 AHM 结合使用，为 ICP-MS 的性能、效率和易用性树立了新标杆。这些创新使用户能够更快速地获得更准确、更可靠的结果。

配备双池耦合碰撞反应系统的 Agilent 9500 ICP-MS/MS 空气反应模式

AN 号： [5994-8987ZHCN \(点击下载全文\)](#)

安捷伦解读： 本文阐述了配备双池耦合碰撞反应系统的 Agilent 9500 ICP-MS/MS 使用空气模式进行简单、有效的干扰消除的原理和应用示例。9500 ICP-MS/MS 配备独特的双池耦合碰撞反应系统 (DCS)，既可以在高性能氦气碰撞模式 (AHM) 下运行，也可以在空气反应模式下运行。其中，在空气反应模式下，无需使用其他反应池气体即可大大减少干扰。该模式利用实验室环境空气，无需外部气体供应，简化了操作，且不影响干扰消除的稳定性或有效性。DCS 配备空气池气体过滤器，可在空气进入池之前有效去除其中的活性污染物，以防止 DCS 中发生不受控制的反应，从而确保结果可靠。安装在过滤器之前的自动控制阀可大幅减少过滤器与环境空气的接触，延长过滤器的使用寿命。空气反应模式既可有效消除稀土元素双电荷对砷和硒的干扰，也可以有效消除稀土双电荷对锆的干扰以及稀土氧化物对钽的干扰。另外，在原位质量模式下，可以消除钽对金的干扰。空气反应模式还可以消除食品和环境类样品中钼和钨对镉和汞的干扰。将 AHM 与空气反应模式整合于标准多调谐方法中，使 9500 ICP-MS/MS 能够对复杂基质中的多种元素进行简单、可靠且无干扰的分析。9500 提供了多调谐预设方法，无需外部反应池气体即可运行，从而简化了分析流程，能够作为传统单四极杆 ICP-MS 系统的无缝、高性能替代方案。

利用 ICP-MS 和短驻留时间提高单纳米颗粒的分辨率

AN 号： [5994-9127ZHCN \(点击下载全文\)](#)

安捷伦解读： 本文阐述了利用 9500 ICP-MS/MS 和 50 μ s 驻留时间对单纳米颗粒信号峰形的改善。实验采用 9500 ICP-MS/MS 对金 (Au)、二氧化硅 (SiO₂) 和铂 (Pt) 纳米颗粒进行分析，并将结果与 100 μ s 驻留时间下获得的结果进行比较。结果表明，在 50 μ s 驻留时间下获得的纳米颗粒信号峰更尖锐，分辨率更高。缩短驻留时间可以有效地缓解峰重叠问题，更易于实现单纳米颗粒事件的有效区分。但驻留时间缩短后，峰强度和背景信号的采样时长同步缩减，会造成信噪比 (S/N) 下降，导致原本在较长驻留时间下能够观测到的小峰的检出效率降低。采用 9500 ICP-MS/MS 对来自 nanoComposix 的 7 种 Au、Pt 和 SiO₂ 纳米颗粒悬浮液进行分析。结果表明，在 50 μ s 驻留时间与 100 μ s 驻留时间下获得的结果一致，且与制造商提供的标准值（通过 TEM 获得）一致。尽管对于许多 sNP 分析而言，可能并非必须采用 50 μ s 的驻留时间，但该功能选项提供了更高的灵活性。

利用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 准确检测高纯度酸和溶剂中的不溶性 SiO₂ NPs

AN 号： 5994-5866ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 在集成电路（IC）向更小体积、更高密度和更优性能发展的趋势下，超高纯度材料与试剂的质量控制成为提升器件良率的关键。尽管制程化学品中溶解态元素的监测已较为成熟，但 50–60 nm 的二氧化硅（SiO₂）纳米颗粒（NPs）因不溶于盐酸（HCl）、硫酸（H₂SO₄）等强酸及异丙醇（IPA）等有机溶剂，易在清洗过程中与芯片直接接触并导致电路缺陷，其精准检测成为半导体行业的迫切需求。传统单颗粒电感耦合等离子体质谱（spICP-MS）分析 SiO₂ NPs 面临多重挑战，包括 N₂ 和 CO 对 ²⁸Si 同位素的严重干扰、仪器及配套设施带来的 Si 背景干扰，以及 Si 电离能高导致的灵敏度不足等问题。

本研究创新性地采用 Agilent 8900 ICP-MS/MS（串联四极杆电感耦合等离子体质谱仪）在 spICP-MS 模式下开展分析，通过核心技术创新突破传统方法瓶颈。该仪器依托八极杆反应池系统（ORS 4）两侧的双重四极杆质量过滤器，以氢气（H₂）为反应池气体，使 N₂ 和 CO 等干扰离子与 H₂ 快速反应，而 Si 离子几乎不反应，从而高效消除 *m/z* 28 处的多原子干扰；搭配半导体专用气体流量系统降低 Ar 气供应带来的 Si 背景，凭借仪器固有高灵敏度弥补 Si 电离效率低的缺陷。实验中，超纯级 HCl、H₂SO₄ 按需求经超纯水稀释，IPA 直接进样，采用 nanoComposix Inc. 的 SiO₂ NPs 标准品校准，借助 ICP-MS MassHunter 软件的单纳米颗粒应用模块实现自动化数据分析。

研究结果证实，该方法在超纯水中可有效分离 50 nm 与 100 nm SiO₂ NPs，在 7.2% HCl 和 1% H₂SO₄ 中对 50 nm SiO₂ NPs 的检测回收率优异，且 100 nm SiO₂ NPs 在稀释 200 倍的 H₂SO₄ 中 10 小时内浓度与粒径保持稳定，验证了方法的准确性与稳定性；在未经稀释的 IPA 中成功检测到 60 nm SiO₂ NPs，凸显了干扰消除能力。该技术通过创新性的 MS/MS 干扰去除机制与高灵敏度检测设计，实现了半导体级酸和溶剂中 50–60 nm SiO₂ NPs 的精准定量与表征，为半导体行业提供了可整合至常规 QC/QA 计划的高效检测方案，对保障高性能 IC 制造质量具有重要应用价值。

使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 对两种等级的NMP中的溶解态和颗粒无机杂质进行分析

AN 号： 5994-5365ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 随着集成电路（IC）线宽持续缩减，半导体制造对制程化学品的纯度管控提出了更为严苛的要求，N-甲基-2-吡咯烷酮（NMP）作为关键试剂，其溶解态元素与金属纳米颗粒（NPs）等无机杂质直接影响器件良率。尽管 SEMI C33-0213 标准规定了 NMP 的纯度指标，但传统检测技术存在明显局限：激光颗粒计数器仅能测定颗粒数量，无法识别金属种类；常规分析方法难以同时实现多元素精准定量与 NPs 特性表征，且易受 NMP 基质中碳基多原子离子的严重干扰。因此，开发一种能同步检测溶解态元素与多元素 NPs 的高效分析技术，成为半导体行业质量控制（QC）的迫切需求。

本研究创新性地采用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 串联四极杆质谱仪，通过技术革新突破传统方法瓶颈。其核心创新点在于：一是采用多重调谐方法，整合 NH₃、H₂、He、O₂ 等多种反应池气体，结合单四极杆（SQ）与 MS/MS 模式自动切换功能，高效消除碳基多原子离子等干扰，实现 54 种溶解元素的超低检出限分析；二是依托 ICP-MS MassHunter 5.2 及以上版本软件的快速多元素纳米颗粒分析模块，支持单次进样采集不限数量元素的 NPs 数据，无需酸化或稀释样品，简化了分析流程；三是通过 200 nm SiO₂ 标准物质校准雾化效率、25 nm Fe₃O₄ NPs 验证方法准确度，确保 NPs 粒径、浓度测量的精准性。实验针对电子级（EL 级）和超纯级（SP 级）两种 NMP 样品，完成了溶解态元素定量与 14 种元素 NPs 表征。

结果表明，两种等级 NMP 均满足 SEMI C33-0213 标准要求，且 SP 级 NMP 中多数元素的检测限与实测浓度显著低于 EL 级，证实其更高纯度；成功鉴定出 Fe、Cr、Ni 等源于加工设备或原料的 NPs，SP 级 NMP 中 NPs 浓度更低（如 EL 级 Fe 颗粒浓度为 2.7 ng/L，SP 级仅 69 pg/L）且以小粒径颗粒为主。该方法实现了溶解态元素与多元素 NPs 的同步精准分析，其高灵敏度、强干扰消除能力及一站式检测设计，为半导体级 NMP 的质量控制提供了高效解决方案，对先进 IC 制造的杂质管控具有重要应用价值。

使用 ICP-MS/MS 测定半导体光刻胶中的超痕量杂质元素

AN 号： 5994-6089ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 随着集成电路（IC）制程节点向 7 nm、5 nm 乃至 2 nm 演进，器件密度持续提升，对制造材料的纯度要求愈发严苛。光刻胶（PR）作为光刻工艺的核心材料，直接涂覆于晶圆表面，其含有的超痕量金属杂质会严重影响半导体器件的电学性能与可靠性。当前行业对 IC 级光刻胶中金属杂质的允许含量已降至 1–10 ppb，未来将进一步低于 1 ppb，而光刻胶中的树脂、硫等组分易产生多原子离子干扰，传统分析技术难以实现超痕量杂质的精准检测，因此开发高效、高灵敏度的分析方法成为行业迫切需求。

本研究采用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 串联四极杆质谱仪，建立了半导体光刻胶中 20 种关键杂质元素的超痕量分析方法，核心思路与创新点突出。样品前处理采用丙二醇甲醚乙酸酯（PGMEA）溶剂简单稀释 10 倍，无需复杂前处理，有效降低污染风险；校准曲线以 PGMEA 为基质配制，采用外标法定量，避免了内标添加带来的操作繁琐问题。仪器方面，创新性地采用“warm”等离子体条件（1000 W 功率），结合 NH_3 、 H_2 、 O_2 等多种反应池气体的多重调谐方法，可自动切换单四极杆与 MS/MS 模式，高效消除碳基质、硫等带来的多原子离子干扰，同时通过添加 O_2/Ar 混合气防止有机基质积碳，保障分析稳定性。

实验结果表明，该方法对 20 种杂质元素的检出限（DL）多低于 1 ppt，多数元素背景等效浓度（BEC）低于 0.5 ppt，展现出优异的灵敏度；加标回收率均在 $\pm 10\%$ 范围内，不同稀释倍数（10 倍、20 倍）下的检测结果一致性良好，验证了方法的准确性与基质耐受性；1 小时内重复测量的相对标准偏差（RSD） $\leq 12\%$ ，稳定性出色。三个 IC 级光刻胶样品的检测结果显示，所有杂质元素含量均满足当前行业要求，部分样品可达到未来 < 1 ppb 的严苛标准。该方法通过简化前处理、优化干扰消除策略，实现了光刻胶中超痕量杂质的高效精准检测，为半导体行业光刻胶质量控制提供了可靠技术支撑，契合先进制程的检测需求。

使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 分析高纯度铜中的超痕量杂质

AN 号： 5994-0383ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 高纯度铜作为半导体器件互连布线的核心材料，其纯度直接影响器件性能与良率，行业对其纯度要求已达 5N 至 9N 甚至更高等级，单种杂质元素含量需控制在 ppb 级以下。传统检测方法存在明显局限：辉光放电质谱（GD-MS）成本高、样品通量低且依赖固体校准标样；常规 ICP-MS 在高铜基质下易受干扰，冷等离子体模式虽能降低部分背景干扰，但基质耐受性差，难以满足超痕量杂质的精准检测需求。因此，开发一种高效、高灵敏度且耐受高基质的分析方法成为半导体行业的关键诉求。

本研究创新性地采用配备可选“m 透镜”的 Agilent 8900 ICP-MS/MS，建立了高纯度铜中 49 种超痕量杂质元素的分析方法，核心思路与创新点突出。样品前处理采用 5% 半导体级硝酸消解高纯度铜样品，稀释 1000 倍后得到 0.1% 铜基质溶液，无需复杂基质匹配，简化操作流程；通过添加 Be、Sc、In 三种内标元素，有效补偿基质差异与信号漂移。仪器方面，创新引入“m 透镜”优化离子传输结构，最大程度降低易电离元素（EIE）的背景信号；采用 1550 W 热等离子体条件，兼顾高基质耐受性与元素电离效率；结合 MS/MS 模式与 O_2+H_2 混合反应池气体，通过原位质量与质量转移模式组合，高效消除 ArCu^+ 、 N_2^+ 等多原子离子干扰。

实验结果表明，该方法性能优异：49 种杂质元素的背景等效浓度（BEC）多数低于 1 ppt，碱金属元素（Li、Na、K）BEC 低至 ppt 级，难电离元素（P、S）也实现数十至数百 ppt 级检测；加标回收率介于 84%–112% 之间，多数元素在 90%–110% 范围内，准确性良好；0.1% 高纯度铜样品中多数杂质元素浓度低于 1 ppt，相当于固体铜中含量低于 1 µg/kg，满足 9N 级高纯度铜的检测要求。该方法通过硬件创新与方法优化，突破了高基质样品中超痕量杂质检测的技术瓶颈，具有快速、灵敏、稳定的特点，为半导体用高纯度铜的质量控制提供了可靠技术支撑。

使用 ICP-MS/MS 对半导体前驱体材料三甲基铝中的痕量杂质元素进行测定

AN 号： [5994-5876ZHCHN（点击下载全文）](#)

安捷伦解读： 三甲基铝（TMA）作为半导体薄膜沉积工艺的核心前驱体材料，广泛应用于 DRAM 电容器、high-k 栅极电介质等高端芯片制造，其纯度直接影响薄膜质量与器件性能。作为 6N 级（99.9999%）高纯材料，TMA 中痕量杂质元素的精准管控至关重要，但由于其基体为高浓度铝，分析时易产生强烈基体效应，导致信号抑制，传统检测方法难以实现低检测限下的稳定定量，给半导体行业质量控制带来挑战。

本研究基于 Agilent 8900 ICP-MS/MS 建立了三甲基铝中痕量杂质的分析方法，核心思路与创新点突出。样品前处理采用惰性环境下将 TMA 转化为氧化铝酸溶液，经 2% 硝酸稀释 375 倍后直接进样，使溶液中铝含量控制在 1000 ppm 左右，简化操作同时降低基体强度。核心创新在于仪器配置与方法优化：配备专用 m 透镜及 Pt 采样锥、Ni 基座截取锥，针对性消除高铝基体带来的信号抑制与背景干扰；采用全热焰模式（1550 W RF 功率），结合无气体、H₂、NH₃+H₂、O₂ 四种分析模式，根据元素特性选择最优检测方案，有效消除多原子离子干扰。方法采用外标法定量，无需复杂的标准加入法，大幅提升分析效率。

实验结果表明，该方法性能优异：外标法与标准加入法的定量结果基本一致，证实其能有效克服高铝基体效应；26 种目标元素（含 Si、P、S、Cl 等难分析非金属元素）的加标回收率均在 75%–110% 范围内，准确度良好；连续 5 次重复检测的结果重现性优异，展现出稳定的分析性能。该方法通过硬件创新与方法简化的结合，成功解决了三甲基铝等高基体半导体前驱体的痕量杂质检测难题，无需基质匹配即可实现精准定量，兼具高灵敏度、高稳定性与高分析效率的特点，为半导体前驱体材料的质量管控提供了可靠技术支撑，契合高端芯片制造的严苛纯度要求。

利用安捷伦 ICP-MS 对三氯硅烷进行痕量元素分析

AN 号： [5990-8175ZHCHN（点击下载全文）](#)

安捷伦解读： 三氯硅烷（TCS）是生产光伏（PV）级高纯度硅的关键中间体，其金属杂质含量直接影响太阳能电池的转换效率，因此需严格控制。传统分析面临诸多挑战：TCS 挥发性强、易水解生成 SiO₂，易沉积在仪器组件中造成污染；且痕量元素易受多原子离子干扰，硼、磷等元素的精准检测难度较大。现有检测手段难以高效解决这些问题，开发可靠的前处理与分析方法成为光伏行业的迫切需求。

本研究提出创新解决方案，核心思路与创新点鲜明。样品前处理采用惰性气氛温和水解 TCS 生成 SiO₂，经 HF 溶解后加热去除 Si（以 SiF₄ 气体形式），残留物重溶于 0.4% HCl 溶液，避免了基质干扰与仪器污染；校准标样以 0.4% HCl 为基质配制，不使用内标以降低污染风险。分析仪器选用配备八极杆反应池系统（ORS）的 Agilent 7700s ICP-MS，创新采用四步自动化数据采集方案，结合冷等离子体、无气体、He 碰撞及优化 He 碰撞四种模式，根据元素特性切换干扰去除方式，ORS 的优化设计提升了碰撞与反应效率，实现对多原子离子干扰的高效消除。

实验结果表明，该方法性能优异：33 种目标元素的原始样品检测限均低于 1 ppb，其中磷的检测限达 0.7 ppb，有效解决了 NO/NOH 干扰问题；加标回收率在 80%–120% 范围内，证实了前处理过程无挥发性元素损失。对两种 TCS 样品的分析显示，不锈钢容器运输的样品因污染导致 Fe、Ni、Cr 等元素浓度显著高于玻璃瓶装样品。该方法通过创新前处理流程与多模式干扰去除技术，实现了 TCS 中痕量杂质的精准检测，为光伏级硅的质量溯源与控制提供了可靠技术支撑。

使用气体交换装置 (GED)-ICP-MS 分析特种半导体气体中的金属杂质

AN 号： 5994-5321ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 随着集成电路（IC）向更小线宽、更高集成密度发展，特种半导体气体（如氟化氢 HF、氯气 Cl₂）中的金属杂质（含气态杂质和纳米颗粒 NPs）对器件性能与良率的影响愈发显著。传统 ICP-MS 难以直接分析气体样品，一方面腐蚀性气体易熄灭氩等离子体，另一方面缺乏气体颗粒定量标准品，且无法同时实现气态杂质与 NPs 的同步检测。因此，开发一种高效、可靠的特种气体杂质分析技术，成为半导体行业质量控制的关键需求。

本研究创新性地构建了 GED-MSAG-ICP-MS 联用系统，核心思路与创新点突出。系统整合气体交换装置（GED_LAB）、金属标准气溶胶发生装置（MSAG）与 Agilent 8900 ICP-MS/MS，GED 采用电解抛光不锈钢池封装膜，可耐受 HF、Cl 等腐蚀性气体，通过 > 99.99% 的氩气交换实现颗粒与气体分离，颗粒随氩气流进入 ICP-MS 检测，避免等离子体熄灭；MSAG 可精准生成金属标准气溶胶，通过软件计算灵敏度因子，解决气体颗粒定量无标准品的难题。分析策略上，采用两种模式互补：单颗粒（sp）ICP-MS 模式（1 ms 驻留时间）检测 NPs，直接气体引入模式分析气态杂质，借助多重调谐方法与 NH₂/He、O₂ 等反应池气体，自动切换检测模式以消除干扰。

实验结果表明，该系统性能优异：在 HF 气体中成功检测到 Fe、Ni、Cr 等多种 NPs，浓度低至 ng/kg 级，且验证了气瓶气液平衡对气态杂质分析的重要性；在 Cl₂ 气体中检出 Ca、Fe、Sn 等颗粒杂质，同时识别出 P、As 等挥发性氯化物气态杂质。加标校准与过滤验证证实了方法的准确性与可靠性，系统可有效区分颗粒与气态杂质，且适用于 NH₃、HCl 等多种特种气体。该联用技术通过硬件创新与双模式分析设计，突破了特种气体杂质检测的技术瓶颈，实现了气态金属与 NPs 的同步精准分析，为半导体特种气体的质量控制提供了全面解决方案，契合先进 IC 制造的严苛要求。

使用 Agilent 7900 ICP-MS 测定高纯石英砂中的痕量杂质元素

AN 号： 5994-7349ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 高纯石英砂作为半导体、光伏等高端制造行业的核心原料，其纯度直接影响器件性能与生产良率，天然石英砂纯度通常为 4N5-5N2，人工合成石英砂可达 5N-7N 级别。其中，碱金属、过渡金属、硼、铝及放射性元素等杂质会引发热稳定性下降、导电性异常等问题，因此需对痕量杂质进行精准管控。传统检测方法面临高硅基体带来的信号抑制难题，且高纯石英砂中杂质含量极低，常规消解与检测方案易导致定量偏差，开发高效稳定的分析方法成为行业关键需求。

本研究基于 Agilent 7900 ICP-MS 建立了高纯石英砂中 31 种痕量杂质元素的分析方法，核心思路与创新点突出。样品前处理采用 HF 消解结合赶硅操作，通过 150℃加热使样品完全溶解，挥干硅后用 2% HNO₃ 重溶，有效降低硅基体干扰；标准曲线以 2% HNO₃ 为基质配制，采用外标法定量，避免内标添加带来的污染风险。仪器方面，创新采用温等离子体模式，搭配无气体、He 碰撞模式，通过优化 RF 功率、采样深度等参数，显著提升基体耐受性与干扰消除能力；配备 PFA 惰性样品引入系统及 Pt 采样锥、截取锥，减少样品吸附与污染，保障检测灵敏度。

实验结果表明，该方法性能优异：14 种关键杂质元素的标准曲线相关系数（R）均大于 0.999，除 P 元素外检出限均低于 3 ppt，灵敏度出色；加标回收率在 75.1%-137.1% 之间，其中 28 种元素回收率控制在 100%±25% 范围内，准确度良好；对 4N8 天然石英砂与 6N 人工合成石英砂样品的分析显示，所有杂质元素含量均符合对应纯度规格。该方法通过优化前处理流程与仪器参数，成功解决了高硅基体带来的技术瓶颈，兼具高灵敏度、高准确度与良好的基体耐受性，为高纯石英砂的质量控制提供了可靠技术支撑，满足半导体与光伏行业的严苛检测需求。

Automated Surface Analysis of Metal Contaminants in Silicon Wafers by Online VPD-ICP-MS/MS (在线 VPD-8900ICP-MS/MS 为晶圆污染控制 (全天候 24/7) 保驾护航)

AN 号： 5994-6135EN (点击下载全文)

安捷伦解读： 硅片作为集成电路（IC）制造的核心基底，其表面金属污染物（如过渡金属、碱金属等）会严重影响器件良率与可靠性，需将杂质含量控制在极低水平（固体硅中总污染物低于 10 ng/g）。这些污染物可能源于原料提纯、切片抛光、化学机械平坦化等制程环节，且在硅片表面氧化层中分布不均。传统检测技术存在明显局限：全反射 X 射线荧光光谱（TRXRF）检测限较高，对轻质量元素灵敏度不足；手动气相分解（VPD）流程繁琐，易引入污染。因此，开发自动化、高灵敏度的表面污染物分析技术成为半导体工厂（FAB）的迫切需求。

本研究创新性地构建了集成 IAS Expert PS 自动化 VPD 系统与 Agilent 8900 ICP-MS/MS 的联用平台，核心思路与创新点突出。分析流程采用全自动化设计：硅片经 FOUP/FOSB 容器直接转运至 VPD 腔室，通过 HF 蒸汽分解表面氧化层（天然氧化层 < 2 nm 或热氧化层可达 100 nm），再用 3% HF/4% H₂O₂ 扫描液（贵金属采用王水扫描液）收集污染物，无需人工干预，大幅降低污染风险。系统配备双自动标准加入系统（ASAS），分别实现外标校准与内标（Be、In）在线添加，自动完成标准曲线制备与基体校正，简化操作流程。仪器方面，采用多调谐模式（冷 / 温 / 热等离子体）与 He、O₂、H₂ 等反应池气体组合，借助 MS/MS 技术高效消除谱图干扰，结合 8900 ICP-MS/MS 固有的高灵敏度（背景 < 0.1 cps），实现超痕量检测。

实验结果表明，该系统性能优异：28 种目标元素的检测限低至 $1.2 \times 10^5 - 1.8 \times 10^7$ atoms/cm²，轻质量元素（Li、Mg 等）灵敏度显著优于传统方法；加标回收率多数在 95%–105% 范围内，仅 Cu（81%）因与硅片表面强吸附略有偏低，贵金属回收率在 86%–96% 之间，准确度良好。系统可与半导体工厂的计算机集成制造（CIM）系统无缝对接，支持 24/7 无人值守运行，适配 300 mm 硅片批量分析。该自动化联用技术通过流程集成与方法优化，突破了硅片表面超痕量污染物检测的效率与灵敏度瓶颈，为先进 IC 制造的污染管控提供了可靠技术支撑，契合半导体行业的严苛质量控制需求。

通过 LA-GED-MSAG-ICP-MS/MS 直接分析 SiC 和 GaN 晶圆中的金属杂质

AN 号： 5994-6670ZHNC (点击下载全文)

安捷伦解读： 碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）等宽带隙材料因优异的电气性能，成为功率半导体器件的核心衬底，其纯度直接决定器件可靠性与性能。传统检测技术存在显著局限：全反射 X 射线荧光光谱（TRXRF）检测限较高且仅能分析表面；气相分解 - ICP-MS（VPD-ICP-MS）无法分解 SiC、GaN 等材料；传统激光剥蚀 - ICP-MS（LA-ICP-MS）受剥蚀室尺寸限制，难以分析 12 英寸晶圆，且缺乏基质匹配固体标准品导致定量困难。因此，开发适用于非硅晶圆的高灵敏度、自动化分析技术成为半导体行业的迫切需求。

本研究创新性地构建了 LA-GED-MSAG-ICP-MS/MS 联用系统，核心思路与创新点突出。系统整合飞秒激光剥蚀（LA）、气体交换装置（GED）、双通道金属标准气溶胶发生装置（MSAG_DS）与 Agilent 8900 ICP-MS/MS，无需密闭剥蚀室，晶圆在洁净空气环境中剥蚀，剥蚀产物经 GED 将空气置换为氦气后引入 ICP-MS，突破了晶圆尺寸限制。定量校准通过 MSAG_DS 实现，双通道设计可同步输送 1% HNO₃ 空白与标准溶液，总流速固定为 3 μL/min 确保完全气化，通过标准加入法（MSA）校准，无需基质匹配固体标准品，有效补偿剥蚀差异与基质效应。仪器采用多重调谐方法，结合 NH₃、H₂ 等反应池气体，自动切换检测模式，高效消除质谱干扰，搭配 m 透镜降低背景信号。

实验结果表明，该系统性能优异：成功实现 12 英寸 Si、SiC、GaN 晶圆的自动化分析，可检测 30 种金属杂质，包括离散颗粒与薄膜深度分析；加标回收率良好，能准确区分研究级与测试级晶圆的杂质差异（如测试级 SiC 晶圆 Fe 浓度 172 wt. ppb，研究级 153 wt. ppb）；单纳米颗粒模式下，Pb 检测限可达 10 nm 级别，空间分辨能力突出。该技术通过硬件集成与校准方法创新，突破了非硅晶圆杂质分析的技术瓶颈，兼具自动化、高灵敏度与宽适用性，为 SiC、GaN 功率半导体的质量控制提供了可靠解决方案，契合先进半导体制造的严苛需求。

利用飞秒激光剥蚀 (LA-)ICP-MS 对纯金属和合金进行元素分析

AN 号： 5994-5540ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 激光剥蚀 - 电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 是固体样品直接元素分析的成熟技术，尤其适用于耐酸陶瓷、合金等难消解样品，可避免样品消解带来的污染风险与元素损失，还能提供元素分布信息。但该技术的广泛应用受限于基质匹配固体校准标样的缺乏，非基质匹配标样易因剥蚀特征差异导致定量误差，这一问题在纯金属和合金分析中尤为突出。传统纳秒激光剥蚀还存在热效应引发的元素分馏问题，进一步影响分析准确性，因此开发无需基质匹配标样且高效准确的 LA-ICP-MS 分析方法成为行业关键需求。

本研究创新性地 将飞秒激光剥蚀系统与 Agilent 8900 ICP-MS/MS 联用，核心思路与创新点突出。采用脉冲宽度 290 fs 的飞秒激光，其脉冲持续时间短于热传导时间，可避免样品受热熔解，减少元素分馏，生成更均匀的颗粒，提升传输效率与信号稳定性，降低非基质匹配标样的剥蚀差异影响。核心创新在于运用 ICP-MS MassHunter 软件的 100% 归一化功能，通过将所有测量元素浓度之和校正至 100%，自动补偿标准品与样品间的剥蚀率差异，无需基质匹配标样即可实现准确定量；软件还支持化合物校正与双电荷离子干扰校正，进一步提升分析准确度。实验以 NIST 612 玻璃标准品 (非基质匹配) 为校准标样，采用栅格扫描模式对 BAM 310 Al/Mg 合金、NIST 1249 镍合金、ERM-EB385 纯铜三种有证标准物质进行分析。

实验结果表明，该方法性能优异：多数元素回收率在 80%–120% 范围内，BAM 310 Al/Mg 合金和 NIST 1249 镍合金的分析精度 (SD) 分别低于 2% 和 1%，纯铜中痕量元素 SD 约为 5%，准确度与精密度良好；成功校正了 NIST 1249 镍合金中 Ti^{++} 对 Mg^{+} 的干扰，解决了常见质谱干扰问题。该方法通过飞秒激光技术与 100% 归一化校准功能的结合，突破了基质匹配标样缺乏的技术瓶颈，简化了校准流程，实现了纯金属与合金从痕量到常量元素的精准分析，为固体样品的直接元素分析提供了灵活高效的解决方案，具有广泛的应用前景。

使用 ICP-MS 半质量数模式分析钕铁硼中的稀土杂质元素

AN 号： 5994-8782ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 钕铁硼永磁材料凭借高磁能积特性，广泛应用于新能源汽车、风力发电等高端领域，其磁性能与稀土元素的精准管控密切相关。重稀土元素 (如 Dy、Tb) 的掺杂可提升磁稳定性，而 La、Ce 等稀土杂质含量超标则会显著劣化性能，因此需建立高效准确的稀土杂质分析方法。传统检测技术存在局限：ICP-OES 和 XRF 检出限较高，难以满足超痕量杂质检测需求；常规 ICP-MS 虽灵敏度优异，但主量元素钕的同位素易形成氧化物、氢氧化物，对 Tb、Dy、Ho、Er 等目标元素产生严重质谱重叠干扰，即使采用 He 碰撞 KED 模式也无法完全消除，影响定量准确性。

本研究创新性地采用 Agilent 7900 ICP-MS 的半质量数测量模式，核心思路与创新点突出。样品前处理采用王水 (硝酸与盐酸体积比 1:3) 在 150°C 加热消解钕铁硼样品，经超纯水定容并以 2% 硝酸稀释 10 倍后直接进样，简化操作流程并降低基质效应。核心创新在于通过半质量数模式避开干扰：将目标元素的测量质量数调整为非整数 (如 $^{79.5}Tb^{+}$ 、 $^{81.5}Dy^{+}$ 、 $^{82.5}Ho^{+}$ 、 $^{83.5}Er^{+}$)，从根源上规避钕氧化物 (如 ^{143}NdO) 与氢氧化物 (如 $^{146}NdOH$) 的质谱重叠干扰；仪器采用 1600 W 射频功率、5.5 mL/min 氦气流速的优化参数，进一步提升干扰去除效果与检测灵敏度。

实验结果表明，该方法性能优异：钕对 Tb 的氧化物干扰降低至 1/50 以下，对 Dy、Ho、Er 的氢氧化物干扰平均降低至 1/10，总干扰比例小于 0.004%；13 种目标稀土元素的方法检出限均小于 0.035 $\mu g/g$ ，仪器检出限低于 0.01 $\mu g/L$ ，灵敏度出色；七份平行样品的相对标准偏差 (RSD) 均小于 10%，加标回收率介于 80%–100% 之间，精密度与准确度良好。该方法通过半质量数模式的创新应用，成功解决了钕铁硼中稀土杂质分析的质谱干扰难题，兼具高灵敏度、高准确性与操作简便性，为钕铁硼材料的质量管控提供了可靠技术支撑，满足行业对稀土杂质精准分析的严苛需求。

直接测定高纯镧系 REE 氧化物中难分析的痕量稀土元素

AN 号： 5991-2802ZHCN (点击下载全文)
直接测定高纯镧系 REE 氧化物中难分析的痕量稀土元素 109-111 页

安捷伦解读： 高纯稀土氧化物 (REE) 材料在高端制造领域应用广泛，其痕量稀土杂质含量直接影响产品性能，因此精准检测至关重要。然而，该类材料的分析面临严峻挑战：基质中的稀土元素易形成 REEO、REEOH、REEH 等多原子离子，与目标痕量杂质产生严重质谱重叠干扰；传统螯合树脂分离法虽能在一定程度上分离基质与分析物，但操作耗时且需针对不同分析物和基质定制分离方案，通用性差，难以满足高效检测需求。常规 ICP-MS 技术受限于干扰消除能力，无法实现痕量杂质的准确定量，亟需开发高效、通用的分析方法。

本研究以 Agilent 8900 ICP-MS/MS 为核心分析平台，创新性地构建了基于多反应池气体模式的干扰消除策略，核心思路与技术路径清晰。样品前处理流程简化高效：将 10 种高纯 (5N) 稀土氧化物 (Ce₂O₃、Pr₆O₁₁、Nd₂O₃ 等) 用半导体级 HNO₃ 消解，Ce₂O₃ 和 Tb₄O₇ 样品添加 H₂O₂ 辅助溶解，最终稀释为 500 ppm (以 REE 氧化物计) 的样品溶液直接进样，避免复杂基质分离步骤。实验考察无气体、He、O₂、NH₃ 原位质量、NH₃ 质量转移五种反应池模式，通过 MS/MS 模式的产物离子扫描功能筛选丰度最高的目标产物离子，结合反应池轴向加速技术，在高效消除多原子干扰的同时提升检测灵敏度。

该方法成功解决了高纯稀土氧化物中痕量杂质分析的核心难题：与无气体模式相比，O₂ 和 NH₃ 反应池模式可使背景等效浓度 (BEC) 改善 1-4 个数量级，其中 Nd₂O₃ 中 Tb 的干扰消除改善因子超 10⁴ 倍，Gd₂O₃ 中 Yb 的 BEC 从 3420 ppb 降至 0.444 ppb，有效克服了基质多原子离子的严重干扰。方法无需定制化分离流程，通用性强，可直接分析高浓度稀土基质下的痕量稀土杂质，覆盖 Pr、Gd、Tb、Dy 等关键目标元素。该研究为高纯稀土氧化物材料的质量控制提供了高效、精准、通用的技术支撑，满足了行业对痕量杂质检测的严苛要求。

Analysis of ferric (Fe³⁺) and ferrous (Fe²⁺) iron in lithium-ion battery cathode by Agilent 1260 Infinity II LC coupled to an Agilent 7850 ICP-MS (使用 Agilent 1260 II LC-7850 ICP-MS 分析锂离子电池中二价铁和三价铁)

AN 号： 5994-6947EN (点击下载全文)

安捷伦解读： 磷酸铁锂 (LFP) 作为无钴锂电池 cathode 材料，因成本低、热稳定性好等优势，在电动汽车等领域应用广泛。其性能与铁的价态密切相关，三价铁 (Fe³⁺) 作为杂质会导致电池自放电增加、比容量下降，而二价铁 (Fe²⁺) 是发挥电化学性能的关键，因此精准测定 LFP 中 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 的含量至关重要。传统检测方法存在明显局限：滴定法操作复杂、耗时且试剂消耗量大；毛细管电泳 (CE) 需添加缓冲溶液，易引发络合干扰，难以满足高效精准的检测需求。

本研究创新性地构建了 Agilent 1260 Infinity II 液相色谱 (LC) 与 7850 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 联用系统，核心思路与创新点突出。样品前处理简化高效：LFP 样品经 10% 盐酸超声消解 (60°C, 30 分钟)，过滤后用 0.1% 盐酸与 2 nM 抗坏血酸稀释 2000 倍直接进样，避免复杂前处理带来的铁价态氧化还原变化。核心创新在于分离与检测策略：采用 Bio SAX 离子交换色谱柱，以 4 mM 吡啶 - 2,6 - 二羧酸 (PDCA) 和 20 mM 硝酸铵为流动相 (pH 调至 5)，实现 Fe²⁺ 与 Fe³⁺ 的高效分离；ICP-MS 采用 He 碰撞池 KED 模式，有效消除质谱干扰，同时借助 Plasma Chromatographic 软件实现联用系统的一体化控制与数据处理。

实验结果表明，该方法性能优异：Fe²⁺ 与 Fe³⁺ 的校准曲线相关系数均大于 0.9996，分离效果良好；加标回收率介于 91.4%-101.2% 之间，13 次平行样品分析的相对标准偏差 (RSD) 均小于 2%，精密度与准确度出色；联用系统测得的总铁含量与传统 ICP-OES 方法结果偏差小于 2%，验证了方法的可靠性。该方法通过 LC 与 ICP-MS 的优势互补，成功解决了 LFP 中铁形态分析的技术难题，兼具操作简便、分离高效、检测精准的特点，不仅实现了 Fe²⁺ 与 Fe³⁺ 的同步定量，还可单独作为 ICP-MS 用于电池组件中其他痕量杂质的分析，为 LFP cathode 材料的质量控制提供了灵活高效的解决方案，契合锂电池行业的严苛检测需求。

使用 ICP-OES 测定磷酸铁锂 (LiFePO₄) 正极材料中的常量元素

AN 号： 5994-4535ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 磷酸铁锂 (LiFePO₄) 作为锂电池正极材料，凭借高安全性、低成本优势，广泛应用于新能源汽车与储能系统，其 Li、Fe、P 三种常量元素的精准定量对生产质量控制、工艺优化及性能研究至关重要。传统检测方法存在明显局限：Fe 采用氧化还原滴定法、P 采用重量法，操作繁琐且分析周期长；Li 采用火焰光度法，无法多元素同时分析，且线性范围窄、易受电离干扰，影响检测准确性与稳定性。因此，开发高效、同步的常量元素分析方法成为行业迫切需求。

本研究基于 Agilent 5800 ICP-OES 系统，核心思路与创新点突出。样品前处理简化高效：称取 0.1 g 样品，用 1:1 盐酸在 150°C 加热消解 1 小时，过滤后经 1% 硝酸稀释定容直接进样，避免复杂前处理带来的误差。核心创新在于优化检测策略：采用垂直双向观测模式，Li、Fe 元素选择径向观测，P 元素采用轴向观测以提升灵敏度；针对性选择特征波长 (Li 670.783 nm、Fe 259.940 nm、P 213.618 nm)，并引入 Y、Sc 双内标实时校正，有效抵消基质效应与仪器漂移影响；通过优化射频功率、气流量等参数，进一步保障检测稳定性与准确性。

实验结果表明，该方法性能优异：三种元素校准曲线相关系数均 ≥ 0.99995，线性关系良好；方法检测限低至 0.0019%–0.0028%，灵敏度满足常量分析要求；4 小时长期稳定性测试中，元素加标回收率介于 99.7%–100.4% 之间，相对标准偏差 (RSD) 均小于 0.30%，精密度出色；对两种市售样品的分析结果显示，Li、Fe、P 含量均符合国家标准要求。该方法通过内标校正与观测模式优化的创新结合，实现了三种常量元素的同步快速检测，兼具操作简便、高效精准的特点，分析效率显著优于传统化学方法，为磷酸铁锂正极材料的质量管控提供了可靠技术支撑，契合锂电池行业规模化生产的检测需求。

The electrochemistry of stable sulfur isotopes versus lithium (稳定硫同位素与锂的电化学研究)

期刊信息： 期刊： PNAS
期刊介绍： 最新影响因子 9.1 最新中科院分区：综合期刊 1 区
期刊编号： PNAS 2024 Vol. 121 No. 14

安捷伦技术： 8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 锂-硫 (Li-S) 电池是一种以金属锂 (Li) 为负极、硫 (S) 为正极的二次电池。与传统的锂离子电池相比，Li-S 电池具有更高的理论能量密度，因此被认为是下一代高能量储能系统的候选技术之一。尽管 Li-S 电池具有高能量密度的潜力，但仍面临着一些挑战，例如多硫化物的“穿梭效应”：在充放电过程中，硫会转化为可溶性多硫化物，在电解液中迁移到负极并与锂反应，从而影响循环寿命。硫在自然界中有两种主要同位素，即硫-32 和硫-34。这两种同位素在化学性质上非常相似，但由于质量不同，它们在某些物理和化学过程中的行为可能会有所不同，这种现象称为“同位素效应”。

本研究基于锂-硫电池进行了模型研究，以揭示两种硫同位素在电化学性质上的变化。在具有相同的八原子环结构的情况下，环状 ³⁴S₈ 分子形成的 S-S 键强于环状 ³²S₈ 中的 S-S 键，并且更倾向于与锂反应。由 Li-³⁴S 转换反应生成的可溶性锂多硫化物显示出比基于 Li-³²S 的生成物更强的阳离子-溶剂相互作用，以及较弱的阳离子-阴离子相互作用，这有助于多硫化物快速溶解，但阻碍了它们从阴极迁移到阳极。因此，Li-³⁴S 电池在固液界面的阴极反应动力学得到改善，同时抑制了多硫化物通过电解液的穿梭，与 Li-³²S 电池相比具有更出色的循环性能。本文基于同位素硫基多硫化物的不同穿梭动力学，提出了一种 ³⁴S/³²S 同位素的电化学分离方法。该方法与传统的化学交换或蒸馏分离方法相比，可实现更高的分离因子，并为重硫属元素同位素的低成本制造、利用和研究带来了机遇。实验采用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 作为 S-34 和 S-32 的表征工具。传统单四极杆 ICP-MS 在测定 S 元素时，存在灵敏度低以及 O-O、N-O 等多原子离子分别干扰 S-34 和 S-32 的问题；而 8900 ICP-MS/MS 利用串联四极杆的优势，可以有效消除所有多原子离子带来的干扰问题，实现对 ppb 级及更低含量 S-34 和 S-32 的测定。

Determination of Elements in a Solid Sulfide Electrolyte using ICP-OES (利用 ICP-OES 测定固态硫化物电解质中的元素)

AN 号：5994-8287EN (点击下载全文)

安捷伦解读： 固态锂电池因能量密度高、安全性佳等优势，成为下一代储能技术的重要发展方向， $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) 作为高离子导电性的无机固态电解质，其纯度与杂质含量直接影响电池晶格结构稳定性、循环寿命及安全性能。然而，目前缺乏针对 LGPS 电解质的成熟分析方法，传统检测技术难以满足多元素同步测定、基质耐受性及检测效率的综合需求。电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 凭借快速、高灵敏度及高溶解固体 (TDS) 耐受性等特点，成为复杂材料中痕量元素分析的理想技术，亟需开发基于 ICP-OES 的 LGPS 电解质多元素分析方法。

本研究采用 Agilent 5800 垂直双向观测 (VDV) ICP-OES 系统，结合微波消解技术，核心思路与创新点突出。样品前处理采用反向王水 (硝酸与盐酸体积比 3:1) 作为消解介质，有效适配 LGPS 高硫化物含量的特性，称取 0.1 g 样品经微波消解 (200°C，保温 10 分钟) 后稀释定容，避免硫化物与空气反应生成硫化氢气体，保障样品完整性。核心创新在于整合仪器智能软件功能优化分析流程：通过 IntelliQuant Screening 功能快速筛查样品元素组成，自动筛选最优分析波长并确定校准范围，简化方法开发；借助 Intelligent Rinse 功能根据元素洗出速率动态调整冲洗时间，分析 100 个样品可节省逾 1 小时，大幅提升效率；Early Maintenance Feedback (EMF) 功能实时监测仪器状态，及时提醒维护，保障长期运行稳定性。此外，采用 Y、Rb 双内标在线校正基质效应与电离干扰，结合轴向 / 径向双向观测模式，实现 29 种元素 (含主量元素 Li、Ge、P、S 及痕量杂质) 的同步测定。

实验结果表明，该方法性能优异：所有元素校准曲线相关系数介于 0.99900–1.00000，线性关系良好；加标回收率均在 94%–100% 范围内，多数元素相对标准偏差 (RSD) $\leq 2.5\%$ ，准确度与精密度出色；8 小时连续运行中，质控样品回收率稳定在 95%–105%，展现出极强的长期稳定性；方法检测限低，可满足痕量杂质与主量元素的同时分析需求。该方法通过智能软件功能与样品前处理的创新结合，突破了 LGPS 电解质无成熟分析方法的瓶颈，实现了多元素高效、精准测定，为固态锂电池电解质材料的质量控制提供了可靠技术支撑，契合新能源行业对新型储能材料的检测需求。

智能 ICP-OES 联合 ADS 2, 协同赋能 固体电解质磷酸钛铝锂 (LATP) 高效精准检测

AN 号：5994-8454ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 磷酸钛铝锂 (LATP) 作为全固态电池 (ASSB) 的核心固体电解质材料，凭借高离子导电性、良好化学稳定性及优良加工性能，在新能源领域应用潜力巨大。其性能与主量元素 (Li、Al、Ti、P) 的配比及杂质元素 (Fe、Cu、Cr 等) 的含量密切相关，主量元素配比失衡会影响离子电导率，杂质元素积累则可能导致电池性能劣化甚至引发安全风险，因此精准测定相关元素含量是 LATP 质量控制的关键。传统检测方法存在流程繁琐、人工操作误差大、主量与杂质元素难以同步分析等局限，难以满足高效质控需求。

本研究创新性地构建了 Agilent 5800 ICP-OES 联用 AVS 7 快速阀与 ADS 2 智能稀释系统的分析平台，核心思路与创新点突出。样品前处理采用王水与氢氟酸混合体系，经微波消解 (220°C，保温 30 分钟) 后赶酸定容，有效溶解 LATP 材料并避免基质干扰。核心创新在于全流程智能化设计：ADS 2 系统可自动完成校准曲线配制，根据预设浓度范围智能换算稀释倍数，还能对超标样品自动调整稀释因子，无需人工干预；借助 ICP Expert 软件的 IntelliQuant 功能，可快速筛查元素含量并智能推荐最优分析波长，精准避开高含量元素干扰；AVS/ADS 时间监控功能实时追踪信号变化，助力高效优化仪器参数。系统采用径向观测模式，同步实现 4 种主量元素与 16 种杂质元素的一站式检测。

实验结果表明，该方法性能优异：20 种目标元素的校准曲线相关系数均高于 0.999，线性关系良好；方法检出限低至 0.01–63 mg/kg，灵敏度满足痕量杂质与主量元素检测需求；16 种杂质元素加标回收率介于 91.0%–103.7% 之间，准确度可靠；2 小时稳定性测试中，主量元素相对标准偏差 (RSD) 均小于 1%，稳定性出色。该方法通过智能化系统集成与流程优化，突破了传统检测的效率与精度瓶颈，实现了 LATP 中元素的高效、精准同步分析，显著降低人工误差，为全固态电池电解质材料的研发与产业化质量控制提供了可靠技术支撑。

使用 ICP-MS/MS 对沥青质溶液进行单纳米颗粒分析

AN 号：5991-9498ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 沥青质作为原油中的重质馏分，其含有的金属元素（如 V、Ni、Fe、Mo）及纳米颗粒（NPs）会引发设备沉积、催化剂中毒等炼油行业关键问题，精准区分金属的溶解态与纳米颗粒态对工艺优化至关重要。传统检测技术难以实现烃类基质中纳米颗粒与溶解态金属的同步表征，而单颗粒 ICP-MS（spICP-MS）虽适用于水性介质中纳米颗粒分析，但在复杂烃类基质的干扰控制、金属形态区分等方面仍面临挑战。因此，开发针对沥青质等烃类样品的高效纳米颗粒分析方法具有重要行业价值。

本研究创新性地采用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 的 spICP-MS 模式，建立了沥青质中多元素纳米颗粒与溶解态金属的同步分析方法，核心思路与创新点突出。样品前处理采用正庚烷提取沥青质，经邻二甲苯稀释（稀释倍数 2100–2700 倍）并超声分散，避免纳米颗粒团聚，无需复杂消解流程。核心创新在于仪器与软件的协同优化：利用 ICP-MS/MS 的 MS/MS 模式，以 He 为反应池气体，高效消除 ArO 等多原子干扰，实现 Fe (m/z 56)、Mo (m/z 95) 等元素的高灵敏度检测；借助 ICP-MS MassHunter 软件的单纳米颗粒应用模块，通过方法向导简化参数设置、数据采集与结果解析，自动计算纳米颗粒的粒径分布、浓度及溶解态金属含量。此外，采用 60 nm Ag 纳米颗粒标准物质校准雾化效率（实测为 6.5%），确保定量准确性。

实验结果表明，该方法性能优异：成功在三种不同来源的沥青质样品中检测到 Fe₂O₃、FeS 形式的 Fe 纳米颗粒及 MoS₂ 形式的 Mo 纳米颗粒，Fe 纳米颗粒平均粒径因样品而异，Mo 纳米颗粒平均粒径集中在 70–80 nm；明确 V、Ni 主要以溶解态有机金属配合物（如卟啉）存在，而 Fe 在样品 A、B 中以纳米颗粒态为主（占比 76%、91%），Mo 则以溶解态为主（占比 60%–99%）；总金属含量与湿法酸消解法结果一致性良好，验证了方法可靠性。该方法通过 MS/MS 干扰消除与智能化软件功能的创新结合，突破了烃类基质中纳米颗粒分析的技术瓶颈，实现了金属形态的精准区分，不仅适用于沥青质样品，还可拓展至 NMP、PGMEA 等其他有机基质的纳米颗粒检测，为炼油及半导体行业的杂质管控提供了高效解决方案。

Investigation of the potential of the ICP-MS/MS for total and speciation analysis in petroleum fractions (ICP-MS/MS 及 GPC-ICP-MS/MS 在石油馏分总量及形态分析中的应用潜力研究)

期刊信息： 期刊：Fuel Processing Technology
期刊介绍：最新影响因子为 7.7 最新中科院分区：工程技术 2 区
期刊编号：Fuel Processing Technology 188 (2019) 60–69

安捷伦技术： GPC-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 石油馏分中的痕量金属（如 V、Ni、S、Fe 等）会引发催化剂中毒、设备腐蚀等问题，其总量与化学形态的精准分析对石油炼制工艺优化至关重要。传统检测技术存在明显局限：高分辨 ICP-MS（HR-ICP-MS）虽能解决部分干扰问题，但设备昂贵且需多次进样才能完成多元素形态分析；单四极杆 ICP-MS 易受碳、氧、硫等基质产生的多原子离子干扰，难以满足超痕量分析需求。因此，开发高效、低成本且能同步实现总量与形态分析的技术，成为石油行业的迫切需求。

本研究采用安捷伦 8800 ICP-MS/MS 系统，通过溶剂稀释后直接进样的方式，成功实现了石油馏分中元素总量与形态的精准分析，其核心优势与应用价值突出。仪器方面，借助串联四极杆与八极杆碰撞 / 反应池（ORC）的协同作用，灵活选用 He、H₂、O₂ 等反应池气体，高效消除多原子干扰，对 Si、S、Fe 等易受干扰元素的检测性能优于或等同于 HR-ICP-MS；搭配 1.0 mm 内径炬管，对原子量小于 30 的轻元素灵敏度提升显著，检测限低至 0.004 µg/kg (V) 至 0.9 µg/kg (Al)，处于同类研究领先水平。应用场景上，该系统展现出强大通用性：在重整原料中，以 O₂ 模式 (³²S → ⁴⁸SO) 成功监测超痕量硫，背景等效浓度（BEC）源于溶剂污染，经紫外荧光法验证准确；在沥青质样品中，精准测定 14 种元素，Ni、V 含量与波长色散 X 射线荧光（WDXRF）法结果高度一致，还检出 Fe、Mo 等痕量元素；在重质石油馏分形态分析中，与凝胶渗透色谱（GPC）联用，仅需单次进样即可同步完成 Ni、V、S 的形态分布分析，无需切换检测模式，大幅提升分析效率。

研究结论表明，安捷伦 8800 ICP-MS/MS 为石油行业提供了高效可靠的分析解决方案。相较于 HR-ICP-MS，该仪器对轻元素（Z<40）和易干扰元素的检测灵敏度相当或更优，且设备成本更低、操作更简便；直接进样模式简化了样品前处理流程，避免了消解带来的耗时与误差；GPC-ICP-MS/MS 联用模式无需多次进样，显著提升样品通量。该系统不仅适用于石油馏分中元素总量与形态分析，还为复杂有机基质中痕量元素分析提供了新路径，在石油炼制、石化产品质量控制等领域具有重要应用价值。

利用 Agilent 9500 ICP-MS/MS 分析高纯钛

AN 号： 5994-9024ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 高纯钛作为半导体制造和航空航天工程的关键材料，其纯度直接影响薄膜均匀性、电性能和器件可靠性，即使是痕量杂质也可能损害部件的机械完整性。传统分析技术（例如 XRF、ICP-OES 和 GD-MS）在灵敏度和检出限方面难以满足严苛的质量控制需求，而 Agilent 9500 ICP-MS/MS 凭借串联质谱架构有效克服了这一瓶颈。

该仪器配备 m 透镜和双池耦合碰撞反应系统 (DCS)，采用 H_2 和 $NH_3 + H_2$ 这两种反应模式。通过 Q1 筛选进入反应池的离子，并通过 Q2 筛选反应后离子的双重过滤机制，从而有效消除了 Ti^{2+} 和 TiO^+ 等钛相关质谱干扰，实现对 Na、Mg、Cu 和 Zn 等元素的准确定量。质量转移模式可使 Cu^+ 转化为 $Cu(NH_3)_2^+$ ，然后对其进行检测，从而显著降低背景干扰。

实验采用 99.99% 高纯钛粉配制 200 ppm 钛溶液，通过标准加入法校准，对 25 种元素进行分析。结果显示，方法检出限达到亚 ppm 级；所有元素的加标回收率的偏差均在 $\pm 10\%$ 以内，RSD 小于 5%；且大多数元素的 RSD 在 1%–3% 的范围内。在 3 小时连续测试中，内标信号稳定在 90%–120%；且 QC 样品回收率一致性良好，证实该方法具有优异的准确度、重现性和长期稳定性。

经验证，样品中的主要金属杂质总含量低于 0.01%，且与材料标注纯度相符。该方法为半导体和航空航天等对高纯钛中的杂质含量管控严苛的领域提供了有力的技术支撑，证明配备 m 透镜的 9500 ICP-MS/MS 是一种强大、可靠的高纯钛质量控制分析工具。

使用配备 m 透镜的 Agilent 9500 ICP-MS/MS 进行高纯度试剂超痕量分析

AN 号： 5994-9062ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 在半导体制造领域，高纯化学品（例如硝酸和硫酸）和高纯金属中超痕量杂质的控制至关重要。分析流程需要达到亚 ppt 级检出限，同时具备出色的稳健性和重现性。Agilent 9500 ICP-MS/MS 配备双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和 m 透镜，能够在热等离子体条件下实现低背景值和可靠的检测性能。m 透镜经过精心设计，可有效抑制包括易电离元素（例如，Na 和 K）的背景信号。这些易电离元素在热等离子体条件下通常表现出较高的背景等效浓度 (BEC)。与追求超高灵敏度的 8900 半导体型号不同，9500 适用于对数据质量和结果重现性要求较高的常规痕量检测应用。

本研究采用仪器软件中预置的 UPW 方法（适用于硝酸和过氧化氢）和 H_2SO_4 专用方法，分别对基质 1% HNO_3 和 9.8% H_2SO_4 进行分析。实验使用配备 m 透镜和 I-AS 自动进样器的 9500 ICP-MS/MS；样品引入系统包括 MicroFlow PFA 雾化器、温控石英雾化室和 2.5 mm 内径石英炬管。采用以下五种调谐模式运行：无气体模式、高性能氦气碰撞模式 (AHM)、 O_2 模式、 NH_3 模式和 H_2 模式。针对 H_2SO_4 样品，还增加了 Pt 和 Zn 的专属调谐模式。

结果显示，两种酸性基质中所有目标元素在校准区间内均表现出优异的线性，相关系数 $r > 0.99$ 。大多数元素获得了亚 ppt 级检出限 (DL) 和 BEC。特别值得关注的是 H_2SO_4 中 Zn 的检测性能。由于存在 $^{32}S^{32}S$ 、 $^{32}S^{34}S$ 和 $^{34}S^{34}S$ 等多原子离子的干扰，Zn 的检测难度较高。本研究利用 DCS 下的 AHM 和 Zn 专属调谐参数，获得了 0.64 ppt 的检出限和 0.89 ppt 的 BEC，充分证明了该方法在热等离子体条件下的强大的背景抑制和干扰消除能力。

研究表明，配备 m 透镜的 9500 ICP-MS/MS 以及便捷的预置方法，能够为半导体级试剂的超痕量杂质分析提供高灵敏度、低背景的检测数据；同时为要求严苛的金属基样品分析提供可靠的技术支持，为刚接触超痕量分析的实验室提供一套易于上手的入门方案。

Copper drives remodeling of metabolic state and progression of clear cell renal cell carcinoma (铜驱动透明细胞肾细胞癌的代谢状态重塑及疾病进展)

期刊信息： 期刊： Cancer Discovery

期刊介绍： 最新影响因子 33.3 最新中科院分区：医学 1 区

期刊编号： Cancer Discov (2025) 15 (2): 401–426.

安捷伦技术： 1260 SEC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 铜 (Cu) 是细胞色素 C 氧化酶 (CuCOX) 的辅因子，对有线粒体呼吸是必不可少的。这项研究表明，晚期透明细胞肾细胞癌 (ccRCC) 会积累 Cu，将其分配给 CuCOX。研究人员采用多种正交方法，包括对肿瘤样本、细胞系、异种移植瘤及患者来源异种移植模型进行代谢组学、脂质组学、同位素标记葡萄糖和谷氨酰胺流量分析及转录组学分析，并结合遗传和药物干预，探究了铜在透明细胞肾细胞癌中的作用。Cu 含量升高会刺激 CuCOX 生物发生，提供促进肿瘤生长的生物能量和生物合成益处。葡萄糖依赖性谷胱甘肽的产生补充了这种作用，它促进解毒并减轻 Cu-H₂O₂ 毒性。单细胞 RNA 测和空间转录组学显示，在透明细胞肾细胞癌进展过程中，氧化代谢增加，谷胱甘肽和铜代谢改变，缺氧诱导转录因子活性降低。因此，Cu 驱动生物能量学、生物合成和氧化还原稳态的综合致癌重塑，促进 ccRCC 生长，这可以成为新治疗方法的靶向。

在该研究中，Agilent 8900 ICP-MS/MS 和 SEC ICP-MS/MS 是实现“裂解肿瘤或细胞系中的总铜和铜形态分析”的核心检测工具，直接支撑了研究中关于“Cu 在透明细胞肾细胞癌 (ccRCC) 进展中积累及分配”的关键结论，具体作用表现在以下两方面：

1. 定量检测 ccRCC 样本中总 Cu 含量，建立 Cu 与肿瘤进展的关联

该文需明确“不同分期 ccRCC 肿瘤、患者血清及移植瘤模型中 Cu 的总量差异”，而 Agilent 8900 ICP-MS/MS 凭借其高灵敏度（痕量 / 超痕量检测能力）和准确性，成为总 Cu 定量的核心手段，该文通过外标法校准和标准参比物质 (NIST SRM 1577c) 质控，确保了 Agilent 8900 ICP-MS/MS 检测结果的准确性，为“Cu 含量与 ccRCC 进展关联”的结论提供了可靠数据支撑。

2. 结合 SEC 分离技术，分析 Cu 在 ccRCC 样本中的形态（分配），揭示 Cu 的功能靶点

研究不仅关注 Cu 总量，更关键在于明确“Cu 在肿瘤中优先分配到哪个分子靶点”——最终发现 Cu 优先分配给细胞色素 c 氧化酶 (CuCOX)，而这一结论依赖于“体积排阻色谱 (SEC) 与 Agilent 8900 ICP-MS/MS 联用”的形态分析能力。

Multiplex Profiling of Biomarker and Drug Uptake in Single Cells Using Microfluidic Flow Cytometry and Mass Spectrometry (利用微流控流式细胞仪和质谱技术对单个细胞中的生物标志物及药物摄取进行多重分析)

期刊信息： 期刊： ACS Nano
期刊介绍： 最新影响因子 16.1 最新中科院分区：材料科学 1 区
期刊编号： ACS Nano 2024, 18, 8, 6612–6622

安捷伦技术： 8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 为了对单个细胞进行多重分析，并消除离心操作可能导致的潜在样本损失风险，本文开发了一种微流控流式细胞技术和质谱联用分析系统 (μCytoMS)，用于在单细胞水平上评估药物摄取和诱导的蛋白质表达情况。该系统包含一块用于单细胞对齐与纯化的微流控芯片，随后通过激光诱导荧光 (LIF) 与电感耦合等离子体质谱 (Agilent 8900, ICP-MS/MS) 进行检测。经过生物功能化处理的纳米探针 (BioNPs)，在单个金纳米粒子 (AuNP) 表面偶联了约 3000 个 6-FAM-Sgc8 适配体 (解离常数 $K_d = 0.23$ nM)，以实现靶细胞上蛋白酪氨酸激酶 7 (PTK7) 的特异性结合。通过 LIF 测定由奥沙利铂 (OXA) 摄取引起的 PTK7 表达，同时通过 ICP-MS 测量 ^{195}Pt 可以检测到药物在单个细胞中的摄取情况，进而为药物摄取与 PTK7 表达的关联分析提供更深入的信息。

在超低流速约 0.043 dyn/cm^2 ($20 \text{ }\mu\text{L/min}$) 下，该芯片能够使标记有纳米探针的单个细胞快速聚焦，无需离心纯化。与之前的研究相比，该芯片能够以每分钟 500 个细胞的速度实现单个细胞的多重分析，而之前的速度为每分钟 40 个细胞。通过使用机器学习算法对肿瘤细胞系中的药物摄取和标记表达进行初步分析，μCytoMS 系统成功以单细胞分辨率对 10 例乳腺癌患者临床样本中 PTK7 对奥沙利铂的响应进行了原位表征。该系统为单细胞多重表型分析及临床诊断提供了巨大应用潜力。

ICP-MS/MS (Agilent 8900) 是构建“微流控流式细胞仪-质谱联用系统 (μCytoMS)”的核心检测模块，核心作用是在单细胞水平实现药物摄取量与生物标志物关联的高灵敏度、无背景干扰定量分析，直接支撑“单细胞多参数表征”的研究目标，具体作用如下：

- 通过靶向检测奥沙利铂 (OXA) 中的特征同位素，实现药物摄取量的精准定量
ICP-MS/MS 凭借高灵敏度 (痕量同位素检测) 和低基质干扰，避免细胞内复杂有机物对药物定量的影响，确保单细胞水平药物含量检测的准确性
- 辅助验证生物标志物探针的结合效率
该文中构建的生物功能化纳米探针 (BioNPs) 由金纳米颗粒 (AuNP) 偶联 Sgc8 适配体组成，可特异性结合肿瘤细胞表面的 PTK7 蛋白。ICP-MS/MS 通过检测 AuNP 的特征同位素，辅助验证探针与细胞的结合情况
- 适配微流控系统，实现无离心、高通量检测
ICP-MS/MS 通过水平毛细管与微流控芯片 (OS-Chip) 连接，适配“无离心预处理”的单细胞采样模式，解决传统方法的样品损失问题

Single Cell Phenotypic Analysis for Cancer Stem Cell Identification by Dual-Isotope ICP-QMS (通过双同位素电感耦合等离子体质谱法进行单细胞表型分析以识别癌症干细胞)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2023, 95, 14447 – 14454

安捷伦技术： SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 单细胞表型分析对于癌症的临床诊断、治疗及预后具有重要意义。准确地从大量癌细胞中分离出癌干细胞 (CSC) 的群体或许能成为一种癌症监测工具，并为开发针对癌干细胞的新治疗策略提供重要启示。本文研究了一种基于双同位素电感耦合等离子体质谱 (ICP-QMS) 的单细胞表型分析的新方法。

通过螺旋通道微流控芯片实现了高通量的单细胞采样，以实现细胞聚焦和对齐，并通过时间分辨 ICP-MS 进行单细胞分析，通过识别高度特异性的探针来完成。这使得能够在单细胞水平上监测三种细胞类型（海拉细胞 HeLa、人乳腺癌细胞 MCF-7、人肝癌细胞 HepG2）的两种表面蛋白标志物 — 上皮细胞黏附分子 (EpCAM) 和黏蛋白 1 (MUC1) 进行监测。

对乳腺癌干细胞的分析进一步证实了其在区分罕见细胞表型方面的能力。研究表明，ICP-QMS 在生物医学研究中具有广阔应用前景，可用于细胞分型、肿瘤细胞干性鉴定及细胞异质性分析等领域。

Agilent 8900 ICP-MS/MS 在该研究中的核心价值是实现“双标志物 - 双同位素”的单细胞精准表征：通过靶向检测 ^{197}Au 和 ^{107}Ag ，同步量化单细胞表面两种生物标志物的表达，既解决了流式细胞术背景干扰高、分辨率不足的问题，又实现了传统单同位素 ICP-MS 无法完成的多参数同步分析；结合微流控高通量采样，成功应用于细胞分型与稀有 CSC 亚群鉴定，为癌症干细胞研究、临床诊断及靶向治疗评估提供了关键技术支撑。

Two-Dimensional Cytometry Platform for Single-Particle/Cell Analysis with Laser-Induced Fluorescence and ICP-MS (使用激光诱导荧光和 ICP-MS 进行单粒子/细胞分析的二维细胞计数平台)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2021, 93, 8203 – 8209

安捷伦技术： 单细胞 SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该研究开发了一种具有高灵敏度和高时间分辨率的二维细胞计数平台 (CytoLM)，用于单粒子和单细胞采样和分析。首先，Dean 流辅助涡旋毛细管细胞采样 (VCCS) 单元将样品流限制在弯曲流中，并驱动以聚焦和对齐小探针体积中的颗粒或细胞。通过将 VCCS 与具有数据采集和处理能力的激光诱导荧光 (LIF) 检测器耦合，建立了高通量单粒子 / 细胞分析系统 (VCCS-LIF)。荧光颗粒密度为 $9.16 \times 10^4/\text{mL}$ 时，颗粒分析通量为 119.42/s，检测回收率为 $78.20\% \pm 1.75\%$ ，细胞分析通量为 48.20/s，密度为 $1.5 \times 10^5/\text{mL}$ 。其次，CytoLM 平台是通过将 VCCS-LIF 与电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 连接起来而构建的。在用 Ag^+ 分析 HepG2 细胞时孵育和 AO 染色，在 240 秒内观察到 10760 次荧光爆发和 3068 次 MS 事件。由于未分散细胞导致的无效信号被控制在 LIF 的 3.80% 和 MS 的 1.01%，有效信号的比例 $> 96.20\%$ 。对原始数据进行峰识别和积分处理后，同时得到峰面积、峰高、峰宽、峰间距等统计结果，并对单细胞的浓度和元素定量信息进行评价。CytoLM 有助于对粒子和细胞进行高通量、多维和多参数表征，并可能在生命科学分析中提供巨大的潜力。

在该研究中，Agilent 8900 ICP-MS/MS 是构建“二维流式细胞分析平台 (CytoLM)”的核心质谱模块，与激光诱导荧光 (LIF) 联用，实现单细胞“形态 / 荧光特征 + 元素定量”的双维度同步分析，具体作用如下：

- 单细胞元素定量检测，靶向分析细胞内特征元素，研究以 HepG2 细胞为模型，细胞经硝酸银 (Ag^+) 孵育和吖啶橙 (AO) 染色后，Agilent 8900 ICP-MS/MS 通过时间分辨分析 (TRA) 模式靶向检测 ^{107}Ag 同位素信号，实现单细胞内 Ag 元素的定量
- 与 LIF 联用构建双维度平台，互补获取单细胞多参数信息。LIF 负责获取细胞形态 / 荧光信息：通过 AO 染色检测细胞核酸特征，240 秒内获得 10760 个荧光脉冲，有效信号比例 96.20%，通量 43.13 个 / 秒，反映细胞整体状态；ICP-MS 负责获取元素定量信息：通过 ^{107}Ag 信号反映单细胞对 Ag^+ 的摄取量，两种技术同步检测到 29.44% 的单细胞信号，实现“荧光特征 - 元素含量”的关联分析
- 适配微流控采样，保障单细胞完整性与检测稳定性，Agilent 8900 ICP-MS/MS 通过雾化器与 VCCS 微流控单元直接连接，适配低损伤单细胞采样

Quantitative elemental analysis of human leukemia K562 single cells by inductively coupled plasma mass spectrometry in combination with a microdroplet generator (采用电感耦合等离子体质谱联用微滴发生器对人白血病 K562 单细胞进行元素定量分析)

期刊信息： 期刊： Journal Of Analytical Atomic Spectrometry
期刊介绍： 最新影响因子 3.2 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2025, 40, 216–225

安捷伦技术： SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章着力于解决传统电感耦合等离子体质谱（ICP-MS/MS）在哺乳动物单细胞元素分析中存在的细胞运输效率低、易受损等问题。研究团队将压电致动器驱动的微滴发生器（μDG）与 ICP-MS/MS 联用，建立了高效、无损的单细胞 ICP-MS（scICP-MS）分析系统，并成功应用于人类慢性粒细胞白血病 K562 细胞的五种必需元素定量分析。

传统 ICP-MS 采用气动雾化器和全消耗喷雾室，K562 细胞因无细胞壁、物理脆弱，在雾化过程中易受损，运输效率仅约 0.1%。为解决此问题，研究构建了含 μDG 的样品引入系统，以 He 为鞘气辅助脱溶剂，无需加热装置或膜脱溶剂器即可实现元素高效电离。通过分析由微滴发生器产生的离子标准溶液微滴绘制校准曲线，结合信号强度与元素质量的换算关系，实现了元素定量，并经银纳米颗粒、二氧化钛纳米颗粒及酵母细胞验证了方法的准确性。最终成功测定 K562 单细胞中 Mg、Zn、P、S、Fe 的平均质量分别为 270±100 fg、23.0±2.0 fg、7684±675 fg、2136±165 fg、14.4±1.2 fg，结果与酸消化后的分析结果一致。

Agilent 8800 ICP-MS/MS 在该文中发挥核心作用：其一，采用快速时间分辨分析模式，将单细胞中微量元素转化为瞬态信号，实现单个细胞中的元素检测；其二，通过碰撞 / 反应池技术减少多原子离子干扰，保障检测结果的准确性；其三，结合 μDG 实现低损伤样品引入，K562 细胞运输效率提升至 10.5%，远高于传统雾化器；其四，通过标准溶液校准与灵敏度漂移校正，确保元素定量的精准性，为单细胞水平的元素组成分析提供了可靠的检测方法，推动了 scICP-MS 在医学和生物学领域的应用。该方法为哺乳动物细胞的元素分析提供了新方案，具有高灵敏度、高通量、无损性等优势。

使用Agilent 8900 ICP-MS/MS测定单个酵母、绿藻和 血红细胞中的 Mg、P、Fe 和 Zn

AN 号： 5994-4460ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 该文利用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 的单细胞（scICP-MS）技术，测定单个酵母、绿藻和红细胞中 Mg、P、Fe、Zn 四种生物必需元素的含量。单颗粒 / 单细胞 ICP-MS 技术凭借快速时间分辨分析（TRA）模式，能检测单个颗粒或细胞中的元素信号，所需细胞数量少，适用于样品量有限的生物和临床研究。生物样品基质复杂，易产生多原子干扰，且部分元素（如 P）电离势高导致灵敏度低，Agilent 8900 ICP-MS/MS 的 MS/MS 模式可通过化学反应消除干扰，解决上述问题。该文将 scICP-MS 法和常规消解 -ICP-MS 测试的数据进行对比，结果表明：

- 三种细胞的元素含量存在显著差异：绿藻 Mg 含量较高（与叶绿素相关），红细胞因去核导致 P、Zn 含量较低，而 Fe 含量较高（与血红蛋白相关）。
- 酵母和绿藻的 scICP-MS 与整体 ICP-MS 分析结果基本一致；红细胞的 scICP-MS 结果中，Fe 含量与认证参考值相符，且避免了整体分析中裂解细胞或血清的干扰，准确性更高。

Agilent 8900 ICP-MS/MS 的 scICP-MS 技术具有高灵敏度、低背景、强干扰消除能力，能准确定量单个细胞中的多元素含量。该技术所需样品量少、结果可靠，为单细胞元素代谢研究提供了实用且强大的工具，适用于生物、临床等多个领域。

Investigation of toxic effect of mercury on *Microcystis aeruginosa*:Correlation between intracellular mercury content at single cells level and algae physiological responses (汞对微囊藻毒性作用的研究：单细胞水平内汞含量与藻类生理反应之间的关联)

期刊信息： 期刊： Science of the Total Environment
期刊介绍： 最新影响因子 8 最新中科院分区：环境科学与生态学 2 区
期刊编号： Science of the Total Environment 858 (2023) 159894

安捷伦技术： SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 鉴于细胞异质性的存在，单细胞研究有助于揭示细胞个体差异并获取非典型细胞特征。本文通过液滴芯片-时间分辨电感耦合等离子体质谱分析系统研究了单个藻类细胞中汞 (Hg) 的积累情况，并探讨了 Hg 积累与藻类细胞生理反应之间的关系。在暴露实验中使用低浓度的 Hg^{2+} (5-20 $\mu g/L$) 时，单细胞中的 Hg 含量在最初 2 小时内增加，随着暴露时间延长至 96 小时而减少，这可能是由于藻类生长稀释效应所致。当暴露于 30 $\mu g/L$ Hg^{2+} 时，单个细胞对汞的摄取量随时间推移持续增加，这与细胞膜通透性升高相关。 Hg^{2+} (5-30 $\mu g/L$) 的暴露以浓度依赖的方式抑制藻类生长，在 30 $\mu g/L$ 的暴露浓度下出现严重的生长抑制。而当暴露浓度低于 20 $\mu g/L$ 时，由于藻类细胞的自我保护机制，藻类细胞表现出恢复的趋势。双变量分析结果显示，细胞内汞积累量与藻类生长相关指标 (680 nm 吸光度 OD680、光合色素含量) 及光合性能指标 (光系统 II 最大光化学效率 F_v/F_m 、绝对光合性能指数 PI_{abs}) 均呈显著负相关；相反，细胞内活性氧 (ROS) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性及细胞膜通透性与细胞内汞积累量呈显著正相关。这些结果为深入理解汞对藻类的毒性效应提供了重要依据。

在该研究中，Agilent 8900 ICP-MS/MS 通过与 droplet 芯片联用，实现两大核心功能：

- 单细胞胞内 Hg 的精准定量，以 HgS 纳米颗粒为外标构建校准曲线，结合优化后的仪器参数，实现单细胞内 Hg 含量的定量计算，检出限满足痕量 Hg (ng/L 级暴露浓度) 的检测需求。单细胞分析结果与传统酸消解-ICP-MS bulk 分析结果一致，证实定量准确性，可精准获取不同暴露条件下单细胞 Hg 积累量
- 细胞群体 Hg 积累异质性表征。通过检测单个细胞的 ^{202}Hg 信号峰，发现微囊藻对 Hg 的摄取呈高斯分布，且暴露浓度越高，信号分布越宽，直观揭示细胞群体内的 Hg 积累异质性 — 这是传统 bulk 分析无法实现的核心优势。同时，含 Hg 细胞比例统计：通过顺序检测 ^{202}Hg (胞内 Hg) 与 ^{63}Cu (细胞内源性元素，用于表征总细胞数)，精准计算不同暴露条件下“摄取 Hg 的细胞比例”

Tracking Mercury in Individual *Tetrahymena* Using a Capillary Single-Cell Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Online System (使用毛细管单细胞电感耦合等离子体质谱在线系统追踪单个四膜虫中的汞)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2020, 92, 622 — 627

安捷伦技术： SC-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 汞作为有毒优先污染物，具有高毒性、生物累积性等特性，其在食物链中的富集对人类健康构成威胁。四膜虫作为水生食物链底部的单细胞真核原生动动物，在汞的生物累积中起关键作用，但传统方法仅能测定其汞平均含量，无法反映个体差异。

该研究开发了毛细管单细胞电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 在线系统，优化了实验和仪器条件：选用 100 μm 石英毛细管，将四膜虫密度控制在 3×10^4 个/mL，以 20 $\mu L/min$ 的流速进样，采用 3 ms 停留时间确保单个细胞信号可区分；通过超纯水清洗三次的优化流程，避免表面吸附汞的干扰，样本引入效率达 10.2%。

该方法以 Hg^{2+} 标准溶液建立定量校准曲线，定量限约为 $3.8 \times 10^{-15} g$ Hg/细胞，四膜虫汞暴露的检出限为 0.05 $\mu g/L$ 。与传统平均含量分析方法对比，两者结果一致性良好，验证了方法的可靠性。同时，该方法能有效揭示个体差异：随着汞暴露浓度升高，信号峰宽增加，表明高浓度暴露下不同四膜虫的汞累积差异更为显著。

该方法具有高灵敏度、实时在线检测、样本消耗量低等优势，突破了传统方法无法捕捉单细胞水平汞累积异质性的局限，不仅为汞的单细胞分析提供了新手段，还可推广应用于其他金属的单细胞检测，对研究细胞异质性、金属生物累积机制及毒理学评估具有重要意义。

在该研究中，Agilent 8800 ICP-MS/MS 发挥的核心作用为：借高灵敏度完成汞含量定量，定量限低至 $3.8 \times 10^{-15} \text{g Hg/细胞}$ ，检出限 $0.05 \mu\text{g/L}$ ；捕捉不同四膜虫个体的汞累积差异，尤其凸显高浓度暴露下的异质性；结果与传统方法一致性良好，且可扩展至其他金属的单细胞检测，为相关研究提供技术支撑。

Accurate Quantification of Metals in Individual Synechocystis sp. PCC 6803 Cells by Single-Cell ICP-MS: Dual-Calibration and Sample Stabilization Strategies (通过单槽 ICP-MS 准确定量单个集胞藻 PCC 6803 细胞中的金属: 双重校准和样品稳定策略)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2025, 97, 10867 – 10876

安捷伦技术： SC-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该研究聚焦单细胞电感耦合等离子体质谱（scICP-MS）在微藻金属分析中的精准定量难题，提出双校准策略与样品稳定化预处理方法，以集胞藻 PCC 6803 为模型实现单个细胞中金属含量及异质性分布的准确检测。

研究针对传统 scICP-MS 存在的校准偏差和细胞稳定性问题，开发双重解决方案：一是双校准策略，通过金纳米颗粒（AuNPs）校准单细胞金属含量，利用细胞内源性镁（Mg）检测实际的传输效率，避免 AuNPs 估算细胞数量时 13.6%-63.1% 的低估偏差；二是优化预处理流程，采用 2.5% 戊二醛固定细胞 1 小时，结合半胱氨酸冲洗去除细胞壁吸附金属，确保细胞结构与金属含量稳定，细胞数量回收率达 98.4%。

Agilent 8800 ICP-MS/MS 在该研究中发挥的核心作用：1. 实现高灵敏检测，对 Mg、Hg、Cd、Co 的检出限低至 0.14-0.53 fg/细胞，细胞浓度检出限为 $5.5 \times 10^3 \text{ cells/mL}$ ，精准捕捉单细胞内低含量金属信号；2. 量化金属分布异质性，通过时间分辨信号分析，清晰呈现不同金属在细胞内的累积差异及种群异质性；3. 支持多金属同步分析，成功区分 Hg、Co、Cd 在微藻中的吸附与吸收过程，为金属生物累积机制研究提供数据支撑。

该方法解决了单细胞金属分析的关键技术瓶颈，为微藻金属毒理学、生物地球化学循环研究提供了可靠工具。

Agarose-Droplet-Based Digital LAMP Assay for Counting Virus DNA in Single-Particle ICP-MS (基于琼脂糖微滴的数字 LAMP 检测法用于单颗粒 ICP-MS 中病毒 DNA 的计数)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2022, 94, 6582 – 6590

安捷伦技术： SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该研究结合琼脂糖液滴数字环介导等温扩增 (LAMP) 与单颗粒电感耦合等离子体质谱 (spICP-MS) 的检测方法，实现乙肝病毒 (HBV) DNA 的绝对定量，解决了传统 ICP-MS 需校准曲线、低浓度定量难的问题。

研究核心设计如下：将 HBV DNA 样本、LAMP 试剂、含 ^{153}Eu 聚苯乙烯微球 (内标) 与琼脂糖混合，通过自制离心式液滴发生器制备琼脂糖液滴；65°C 下完成 LAMP 扩增后，4°C 冷却使液滴凝胶化，利用聚丙烯酰胺修饰引物将扩增子固定于凝胶内，避免泄漏；经清洗去除多余试剂后，加入 $[\text{Ru}(\text{bpy})_2\text{dppz}]^{2+}$ 标记双链扩增子，最终通过 spICP-MS 检测 ^{101}Ru (阳性信号) 与 ^{153}Eu (总液滴信号)。

Agilent 8900 ICP-MS/MS 在研究中发挥关键作用：1. 实现双信号同步计数，通过时间分辨模式分别捕捉 ^{101}Ru 和 ^{153}Eu 的脉冲信号，精准区分阳性液滴与总液滴，无需校准曲线即可通过两者比值计算病毒 DNA 浓度；2. 保障高灵敏度检测，凭借元素特异性检测优势，有效抵抗基质干扰，最低定量限达 25 copy/ μL ，线性范围覆盖 25-10,000 copy/ μL ；3. 确保定量准确性，内标 ^{153}Eu 的信号稳定，补偿了液滴损失和传输效率波动带来的误差，血清样本检测回收率达 85%-107%；4. 支持数字化分析，通过单颗粒检测能力区分单个液滴的正负信号，契合数字检测的核心需求，避免传统荧光检测的局限。

该方法兼具低成本、高通量、抗干扰性强等优势，无需复杂微流控芯片，可扩展至多种核酸靶标检测，为痕量病毒 DNA 定量提供了新路径，也拓展了 ICP-MS 在数字化生物检测领域的应用场景。

Detection of Histidine-Tagged Protein in Escherichia coli by Single-Cell Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (通过单细胞电感耦合等离子体质谱法检测大肠杆菌中的组氨酸标签蛋白)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Anal. Chem. 2022, 94, 7952 – 7959

安捷伦技术： SC-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该研究开发了一种利用单细胞电感耦合等离子体质谱 (scICP-MS) 快速精准定量大肠杆菌中组氨酸 (His) 标签重组蛋白的方法，解决了传统方法需复杂提取纯化、无法实时监测可溶性蛋白的难题。

研究核心流程如下：将含增强型绿色荧光蛋白 (EGFP) 或红色荧光蛋白 (mCherry) 基因的 His 标签质粒转入大肠杆菌，经 IPTG 诱导表达后，暴露于氯化镍或氯化钴溶液中，使金属离子与 His 标签特异性结合；通过 scICP-MS 检测细胞内金属信号，实现目标蛋白的定量，并与流式细胞术 (FCM)、考马斯亮蓝 (CBB) 染色等方法对比验证。结果表明，钴离子与 His 标签的结合特异性优于镍离子，成为优选标记剂。

Agilent 8900 ICP-MS/MS 在研究中发挥关键作用：1. 实现特异性定量检测，通过时间分辨分析模式捕捉单个大肠杆菌细胞中 ^{59}Co 的瞬态信号，精准区分 His 标签蛋白与非标签蛋白的金属结合差异，避免非特异性干扰；2. 反映可溶性蛋白含量，6 小时内钴含量随蛋白诱导表达持续升高，与荧光强度趋势一致，而 24 小时后因过表达蛋白形成包涵体无法结合钴离子，钴含量下降或趋于稳定，可特异性表征活性可溶性蛋白；3. 同步完成细胞计数，通过检测细胞内源性磷信号量化细胞数量，与显微镜计数、OD₆₀₀ 检测结果一致性良好，为总蛋白含量计算提供基础；4. 具备高灵敏度与快速性，无需蛋白提取纯化，可实时监测蛋白表达动态，检测精度达 0.1 fg (以钴计)，满足单细胞水平微量蛋白定量需求。

该方法为重组蛋白的高效表征提供了新工具，尤其适用于非荧光蛋白的定量分析，在分子生物学研究与生物制药领域具有重要应用价值。

采用 LA-ICP-MS 技术定位组织薄切片上的内源性金属: 基于安捷伦 ICP-MS 用激光剥蚀技术对生物样本 进行多元素分析

AN 号： 5994-7575ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 在生物成像与金属组学研究领域，探索分析物与金属在生物系统中的分布及功能至关重要。生物成像能直观呈现组织、细胞等的存在状态，金属组学则聚焦金属的生物功能，而激光剥蚀 - 电感耦合等离子体质谱（LA-ICP-MS）技术的出现，为两者的深度融合提供了强大支撑，成为生物样本多元素分析的核心手段。

该研究采用安捷伦 8900 ICP-MS/MS、7900 ICP-MS 与激光剥蚀系统联机，通过 ICP-MS MassHunter ActiveView2 (AV2) 插件实现完全集成化控制，确保样品分析的高效与精准。

在心脏组织研究中，LA-ICP-MS 展现出独特价值。心肌梗塞慢性期会出现心肌纤维化，Azan 染色显示为蓝色区域。而安捷伦 8900 ICP-MS/MS 在 O₂ 质量转移模式下通过 LA-ICP-MS 检测发现，纤维化区域的 ³¹P、⁴⁴Ca 和 ⁵⁶Fe 浓度显著低于其他区域。由两种互补技术所得到的结果表明，通过 LA-ICP-MS 获得的金属分布信息可作为组织细胞活力的有效指标，为心肌梗塞相关研究提供了全新的检测视角。

在小鼠肝脏分析中，LA-ICP-MS 同样表现出色。在 H₂ 和 He 模式下，LA-ICP-MS 成功检测到 ⁹⁵Mo、⁹⁸Mo 和 ⁵⁶Fe 的分布。其中，两种钼同位素呈现相似分布模式，验证了方法的可靠性，且钼信号表明其以亚钼蝶呤辅因子形式在肝脏积聚；⁵⁶Fe 信号围绕血管分布，与红细胞分布吻合，提示存在血红素铁。通过叠加图像，还发现 ⁵⁶Fe 和 ⁹⁵Mo 在不同区域的特异性分布，为金属蛋白质在组织中的定位研究提供了关键数据。

综上，ICP-MS 作为核心检测技术，与激光剥蚀系统联用后，凭借高灵敏度、高分辨率的优势，实现了生物样本薄切片上内源性金属的精准定位与定量分析，为组织病变相关的金属累积研究及金属蛋白质、辅因子的特异性定位提供了重要技术支撑，推动了生物成像与金属组学领域的研究进展。

采用 Agilent 8800 电感耦合等离子体串联质谱仪通过 capLC-ICP-MS 联机同时测定多肽和磷酸肽

AN 号： 5991-1461CHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 该文聚焦蛋白组学领域的定量分析需求，提出了毛细管液相色谱（capLC）与电感耦合等离子体串联质谱仪（ICP-MS/MS）联用的创新方案，为含硫多肽和磷酸肽的高灵敏度检测提供了高效解决方案。

传统 LC-MS/MS 定量需依赖同位素标记内标，成本高且操作复杂，而单四极杆 ICP-MS 等技术因硫、磷电离能高及多原子干扰，检测限难以满足需求。该文采用 Agilent 8800 ICP-MS/MS，搭配 capLC 分离系统，通过 MS/MS 质量转移模式，实现了对硫、磷的特异性检测。

实验中，以蛋氨酸、对硝基苯酚磷酸二酯（BNPP）为标样，配制系列浓度校准溶液，经 capLC 分离后，通过专用接口导入 ICP-MS/MS 检测。结果显示，该系统对硫、磷的绝对检测限分别低至 11 fmol 和 6.6 fmol，为目前已报道的 LC-ICP-MS 分析最低值；硫同位素比值测定结果与理论值高度吻合，证实干扰消除效果显著，且校准曲线线性优异，相对标准偏差（RSD）小于 4%。在实际样品分析中，成功实现了 LRRapSLG、ACTPERMAE 等多肽和磷酸肽的同时定量，峰形与信噪比表现出色。

ICP-MS/MS 在研究中发挥核心作用：一是通过独特的串联质谱模式，突破传统仪器的干扰局限，实现硫、磷的无干扰精准检测；二是凭借高灵敏度特性，大幅降低检测限，满足痕量分析需求；三是支持通用标样定量，无需同位素标记内标，简化操作流程并降低成本。该技术不仅拓展了 LC-ICP-MS 在蛋白组学中的应用，还为药物研究、环境分析等领域的含硫、磷化合物检测提供了新工具，具有广阔的应用前景。

蛇毒中蛋白质的绝对定量分析 — 使用 capLC-ICP-MS/MS 和在线同位素稀释法分析

AN 号： 5991-9016EN (点击下载全文)

或者见第 4 版《Agilent 8800 和 8900 ICP-MS/MS 应用手册》316-321 页

安捷伦解读： 蛇毒作为复杂的生物流体，含独特的肽类和蛋白质混合物，其成分的鉴定与定量对毒理学研究、治疗方法开发及药物研发意义重大。在该研究中，将适用于完整蛋白质直接定量的绝对定量分析方法应用于莫桑比克射毒眼镜蛇 (*Naja mossambica*) 的毒液分析。这种眼镜蛇是非洲最危险的蛇之一。眼镜蛇毒液主要对细胞产生毒性（细胞毒性），导致咬伤处肿胀，可能演变成组织坏死和坏疽。

该研究采用毛细管液相色谱（capLC）与三重四极杆电感耦合等离子体质谱（ICP-MS/MS）联用技术，结合在线同位素稀释分析（IDA），实现了完整蛋白质的绝对定量。实验以蛋氨酸、牛血清白蛋白等为标准品，通过 Agilent 1200 系列高效液相色谱系统进行分离，借助 Agilent 8800 ICP-MS/MS 完成硫同位素检测，采用氧质量转移方法消除光谱干扰，并以富集的 ^{34}S 作为同位素稀释剂、BOCMet-OH 为内标校正进样误差。

ICP-MS/MS 在该研究中发挥核心作用：其一，解决了传统单四极杆 ICP-MS 检测硫元素的难题，通过 MS/MS 模式有效去除多原子离子的光谱干扰，同时利用高灵敏度和低背景特性，实现三种主要硫同位素的精准测量；其二，无需化合物特异性校准标准，借助 IDA 技术通过检测蛋白质中蛋氨酸和半胱氨酸残基含有的硫元素，即可完成蛋白质定量，简化了实验流程；其三，结合 capLC 的分离能力，成功实现蛇毒复杂样品中蛋白质的高效分离与准确定量。

研究结果显示，该方法对蛋白质标准品的定量结果与制造商提供的纯度数据高度吻合，色谱回收率超 98%。应用于莫桑比克射毒眼镜蛇毒液分析时，成功鉴定并定量了 27 种蛋白质，涵盖 3FTx、PLA2 等主要毒素家族及核酸内切酶、蛇毒金属蛋白酶（SVMP）等成分，为蛇毒蛋白质组学研究提供了可靠数据。综上，ICP-MS/MS 联用技术为复杂生物样品中蛋白质的绝对定量提供了高效解决方案，推动了毒理学及药物研发领域的相关研究。

Determination of ceruloplasmin in human serum by SEC-ICP-MS

(采用体积排阻色谱-电感耦合等离子体质谱法测定人血清中的铜蓝蛋白)

期刊信息： 期刊： Analytical and Bioanalytical Chemistry

期刊介绍： 最新影响因子 3.8 最新中科院分区：化学 2 区

期刊编号： Anal Bioanal Chem (2006) 386: 180–187

安捷伦技术： 1100 LC+7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 该文开发了一种测定人血清中铜蓝蛋白（Cp）含量的分析方法。该方法采用免疫亲和层析和尺寸排阻层析（SEC）技术对血清样本进行“净化”，然后使用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）通过分析 Cu 进行测试。

研究针对传统 Cp 检测方法存在的干扰多、无标准化参考等问题，设计了两步净化流程：先通过免疫亲和色谱去除血清中白蛋白、IgG 等六种高丰度蛋白，再利用 SEC 分离 Cp 结合铜与游离铜离子，最终以 ICP-MS 检测 ^{63}Cu 和 ^{65}Cu 同位素信号。该方法以 Cp 标准品保留时间匹配及 2.2 ± 0.1 的 $^{63}\text{Cu}/^{65}\text{Cu}$ 比值为鉴定依据，成功分析了 ERM DA470 标准血清、47 份疾病患者（心肌梗死、类风湿关节炎等）及健康人血清样本。

ICP-MS 可特异性识别目标信号，精准捕捉铜同位素信号，不受血清复杂基质干扰，清晰区分 Cp 结合铜与游离铜；同时通过外标校准实现 Cp 的精准定量，检测限达 0.01 mg/mL，回收率 100%，重现性变异系数 < 10%；其次，该方法可以辅助验证分子特性，结合检测数据推算出 Cp 分子含 6-7 个铜原子，与已知结论一致。该方法为血清中金属蛋白的检测提供了标准化路径，也彰显了 ICP-MS 在复杂基质中元素特异性分析的独特优势。

Direct comparison of capillary electrophoresis and capillary liquid chromatography hyphenated to collision-cell inductively coupled plasma mass spectrometry for the investigation of Cd-, Cu- and Zn-containing metalloproteins
(CE-ICP-MS 和 capLC -ICP-MS 用于研究含镉、铜和锌的金属蛋白的对比)

期刊信息： 期刊： Journal of Chromatography A
期刊介绍： 最新影响因子 4 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Journal of Chromatography A, 1114 (2006) 138–144

安捷伦技术： CE-7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 在医学和生物医学研究中，了解组织或体液中的蛋白质和肽含量非常重要。传统的二维聚丙烯酰胺凝胶电泳结合质谱分析有局限性，而毛细管分离技术与质谱联用是发展趋势。cap-LC 和 CE 是蛋白质组学中常用的毛细管分离技术，与 ICP-MS 联用能获取更多信息。本文对比这两种联用系统对金属蛋白的分析能力。相较于 cap-LC，CE 具有以下优势：

分离特性良好：在分离金属硫蛋白 (MT) 时，CE-ICP-MS 能在约 18 分钟内完成，MT-II 在 9.5 分钟出峰。且计算得到的理论塔板数约为 30000 块塔板，表明其分离效率较高，能有效分离蛋白质。

检出限低且稳定：CE-ICP-MS 对超氧化物歧化酶 (SOD) 中铜和锌的检出限 (LODs)：铜约为 0.4 ng/mL，锌约为 1–2 ng/mL，展现出良好的检测灵敏度，能够检测到低浓度的金属元素。并且，该技术在检测过程中，保留时间和峰面积的精密度良好，说明其检测结果稳定可靠。同时，检测结果不受样品基质中金属残留的干扰。

具备在线预浓缩能力：CE-ICP-MS 可实现生物化合物的在线预浓缩和净化，这一过程能有效去除样品中的杂质，提高检测的准确性和灵敏度。在分析金属硫蛋白 (MTs) 时，无论是商业标准品还是鳗鱼胞质样品，都能成功进行在线预浓缩，证明了该技术在实际应用中的有效性。

元素选择性检测优势：ICP-MS 检测能够连续监测金属蛋白复合物中的金属，选择性跟踪与肽/蛋白质部分共价结合的杂原子，在蛋白质/肽定量分析方面具有高灵敏度和低基质依赖性的特点。例如在分析含 Cd、Cu 和 Zn 的金属蛋白时，能有效检测这些金属元素，为研究金属蛋白的组成和结构提供重要信息。

Quantification of phosphorus in DNA using capillary electrophoresis hyphenated with inductively coupled plasma mass spectrometry
(使用电感耦合等离子体质谱联用的毛细管电泳定量 DNA 中的磷)

期刊信息： 期刊： Journal of Chromatography A
期刊介绍： 最新影响因子 4 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Journal of Chromatography A, 1217 (2010) 7921–7925

安捷伦技术： CE-7500a ICP-MS

安捷伦解读： 该文采用毛细管电泳 (CE) 与电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 联用技术，对酶解的 DNA 分子中的磷进行了分析。通过在 CE-ICP-MS 分析中获得的磷值对 DNA 浓度进行定量。CE-ICP-MS 测量采用了配备三层雾化器的 AIF-01 接口装置，实现了每分钟微升级的低流量雾化，且样品在蒸发室中无损失。

在该研究中，CE-ICP-MS 核心作用是实现 DNA 中磷元素的精准分离与定量：通过结合毛细管电泳 (CE) 的高效分离能力与电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的元素特异性检测，将酶解后的四种脱氧核苷酸 (dAMP、dGMP、dCMP、dTTP) 及游离磷酸盐实现基线分离，通过监测 ³¹P 信号精准量化磷含量，进而基于磷在 DNA 中的固定化学计量比计算 DNA 浓度，无需完整 DNA 标准品，且检测限 (3.1-26 ng/mL) 与传统荧光检测相当、精密度更优 (dNMP 浓度 RSD 3.6%)；同时，该技术还能同步获取核苷酸组、酶解反应效果及磷污染杂质等数据，简化了样本前处理流程 (酶解后无需额外纯化即可直接进样)，仅需约 10 nL 微量样本，为 DNA 定量分析提供了更全面、准确的解决方案。

Direct and simultaneous determination of intra-liposomal and external sulfate in liposomal doxorubicin formulations by capillary electrophoresis/inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry (CE/ICP-MS/MS) (采用毛细管电泳/电感耦合等离子体质谱联用技术 (CE/ICP-MS/MS) 对脂质体阿霉素制剂中的脂质体内部和外部硫酸盐进行直接同步测定)

期刊信息： 期刊： International Journal of Pharmaceutics
期刊介绍： 最新影响因子 5.2 最新中科院分区：医学 2 区
期刊编号： International Journal of Pharmaceutics 561 (2019) 283–288

安捷伦技术： 7100CE+8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 本文建立并验证了一种毛细管电泳与电感耦合等离子体串联质谱 (CE/ICP-MS/MS) 联用方法，用于测定阿霉素脂质体制剂中脂质体外和脂质体内的硫酸盐。硫酸铵是脂质体的关键成分，在药物载入及在脂质体内空间的维持中发挥重要作用。采用毛细管电泳可实现脂质体外与脂质体内硫酸盐的完全分离，且对脂质体的破坏极小。现有的过滤技术会因脂质体破裂，导致分离过程中脂质体内硫酸盐泄漏。毛细管电泳与串联四极杆 ICP-MS 检测联用，无需裂解脂质体即可直接对脂质体内硫酸盐进行定量。对 3 种 FDA 批准的品牌药及仿制药阿霉素脂质体制剂的总硫酸盐和外部硫酸盐进行了比较。此外，通过比较品牌药制剂的总硫酸盐和外部硫酸盐，分析了其批间产品质量一致性。结果显示，不同制剂的总硫酸盐存在轻微差异，而品牌药不同批次间的总硫酸盐保持一致。然而，所有受试阿霉素脂质体制剂的外部硫酸盐浓度存在显著差异。尽管如此，脂质体内部硫酸盐浓度高于外部，通过维持离子梯度来保持阿霉素的包封状态。这种快速、直接的硫分析方法有望用于脂质体制剂的定量分析，以实现质量控制。

该 CE-ICP-MS/MS 方法所需的样品前处理步骤较少，这对于在分析过程中尽量减少脂质体破裂、提高分析准确性至关重要。离子色谱法 (IC) 做为测定临床样本中包括硫酸盐的常用工具，需要分别进行两次检测，以测定外部硫酸盐和总硫酸盐含量，耗时较长。

此外，ICP-MS/MS 不仅提供了迁移/保留时间信息，还具备分析物特异性，而这是诸如电导检测和紫外-可见检测等通用检测方法所不具备的。

Ultra-sensitive quantification of lysozyme based on element chelate labeling and capillary electrophoresis-inductively coupled plasmamass spectrometry (基于元素螯合标记和毛细管电泳-电感耦合质谱法的溶菌酶超灵敏定量分析)

期刊信息： 期刊： Analytica Chimica Acta
期刊介绍： 最新影响因子 6 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Analytica Chimica Acta 812 (2014) 12–17

安捷伦技术： CE-7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 蛋白质的超灵敏定量分析意义重大，溶菌酶作为一种广泛存在且具有多种功能的蛋白质，其在生物样品和食品中的含量检测至关重要。目前已有多种溶菌酶定量方法，但均存在不足，如基于适配体的生物传感器选择性和稳定性差，ESI-MS 及相关无标记方法成本高、分析时间长，ELISA 灵敏度低、成本高且稳定性差。ICP-MS 虽适合元素检测，但对蛋白质主要成分检测灵敏度低，需金属标记。

在基于 Gd^{3+} 螯合标记和毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱 (CE-ICP-MS) 测定溶菌酶的研究中，CE-ICP-MS 展现出多方面优势：

- 超高灵敏度：该方法对溶菌酶的检出限极低，仅为 3.89 amol (3.89×10^{-11} mol/L，进样量 100 nL)，相较于其他检测方法，如适配体生物传感器、基于电喷雾电离质谱 (ESI-MS) 的方法等，具有更高或相似的灵敏度，能够检测出极低含量的溶菌酶，满足对低丰度蛋白质检测的需求。
- 分析速度快：在优化的实验条件下，溶菌酶可在 12 分钟内完成分离和检测，大大缩短了分析时间，提高了检测效率，适用于临床诊断等对检测速度有要求的场景。
- 良好的稳定性和重现性：实验重现性良好，峰面积的相对标准偏差 (RSD) 小于 6% ($n = 5$)，保证了检测结果的可靠性和准确性，使实验数据更具说服力。
- 抗复杂基质干扰能力强：能有效将唾液等生物样品中的溶菌酶与其他蛋白质分离，准确测定溶菌酶含量，生物样品的复杂基质不干扰检测过程，在复杂生物样品检测方面具有明显优势。
- 检测成本低且无需特殊标记：与 ESI-MS 等方法相比，该方法无需使用同位素和抗体，降低了检测成本，简化了实验流程，避免了同位素标记的复杂性和高成本问题。

Analysis of selenium nanoparticles in human plasma by capillary electrophoresis hyphenated to inductively coupled plasma mass spectrometry (通过毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用技术分析人血浆中的硒纳米颗粒)

期刊信息： 期刊： Analytical and Bioanalytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 3.8 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Analytical and Bioanalytical Chemistry (2021) 413:2247–2255

安捷伦技术： 7100CE-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 纳米粒子 (NPs) 在新疗法的研究与开发中得到了越来越广泛的应用。纳米粒子系统的特性通常包括尺寸、形状、尺寸分布和电荷等，但关于纳米粒子的化学稳定性以及溶解物质的存在情况的信息，在疗效研究中往往因缺乏合适的检测方法而缺失。该研究中，建立了一种基于毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱 (CE-ICP-MS/MS) 相结合的方法，用于分析水溶液中的硒 (Se) 纳米粒子和溶解的硒物质，获得了 1.4%–3.0% 的峰面积精度和 1.0%–2.6% 的迁移时间精度 (RSD)。对市售的硒纳米粒子悬浮液 (Q-SeNP) 进行 CE-ICP-MS 分析，结果显示存在大量的硒酸盐，其含量相当于悬浮液中总硒含量的 32%，这表明纳米粒子在储存过程中发生了显著降解。通过在涂覆的熔融石英毛细管中对 CE-ICP-MS 方法进行改进，以分析人血浆中的硒纳米粒子。获得了 3.3%–10.7% 的峰面积精度和 0.8%–2.8% 的迁移时间精度 (RSD)。使用改进的方法证实了聚乙烯醇 (PVA) 包覆的硒纳米颗粒在人体血浆中会降解为硒离子。通过一个针对 PVA-硒纳米颗粒和溶解硒的电感耦合等离子体质谱信号的校正因子，来估算硒纳米颗粒和硒离子的含量。这是首次使用 CE-ICP-MS 对硒纳米颗粒进行研究，并突显了 CE-ICP-MS 在定量表征硒纳米颗粒在生物介质中的行为方面的潜力。

Characterization of interactions between organotin compounds and human serum albumin by capillary electrophoresis coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry (通过毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用表征对有机锡化合物与人血清白蛋白之间的相互作用)

期刊信息： 期刊： Talanta
期刊介绍： 最新影响因子 6.1 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Talanta 93 (2012) 239–244

安捷伦技术： CE + 7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 热力学数据 (例如结合常数) 是描述生化特性建模中外来微量化合物与生物分子之间相互作用的重要参数。在本研究中，使用毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱法 (CE-ICP-MS) 来研究有机金属化合物和蛋白质复合物的稳定性常数，因为该方法具有较低的检出限和较低的样品需求。四种有机锡化合物 (三甲基锡 (TMT)、三丙基锡 (TPrT)、三丁基锡 (TBT)、三苯基锡 (TPhT)) 和人血清白蛋白 (HSA) 分别用作模型有机金属化合物和蛋白质。进行了亲和毛细管电泳 (ACE) 和平衡混合物的非平衡毛细管电泳测定 (NECEEM)，并使用 ICP-MS 作为检测器来确定在 1:1 摩尔比假设下有机锡化合物与 HSA 的结合常数。两种方法的恒定测量都很简单，但是，考虑到 NECEEM 方法的误差，ACE 测定更准确且更适用于恒定测定有机锡-HAS 络合物。通过不同的数学计算证明了使用 ACE 方法对结合常数 ($\log K(b)$) 的良好精确度，其值分别为 6.13 ± 0.51 (TMT)、 5.72 ± 0.38 (TPrT)、 5.68 ± 0.34 (TBT)，每个有机锡-HSA 复合物分别为 6.05 ± 0.38 (TPhT)，显示出有机锡化合物与 HSA 之间的非共价相互作用。同时，本研究采用 CE-ICP-MS 方法适用于进一步研究有机金属络合物，其优势如下：凭借低检测限优势，精准捕捉痕量水平下有机锡化合物与 HSA 形成的复合物；结合毛细管电泳的分离能力与 ICP-MS 的元素特异性检测，实现对游离有机锡化合物、复合物的有效分离和同步定量，直接监测电泳迁移率变化以反映相互作用；通过监测锡的四种同位素 (^{117}Sn 、 ^{118}Sn 、 ^{119}Sn 、 ^{120}Sn)，减少检测误差，为结合常数的准确计算提供稳定的信号支持，验证了 ACE 法在金属化合物-生物分子相互作用研究中的适用性。

Study of interactions between carboxylated core shell magnetic nanoparticles and polymyxin B by capillary electrophoresis with inductively coupled plasma mass spectrometry (毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱法研究羧化核壳磁性纳米粒子与多粘菌素 B 之间的相互作用)

期刊信息： 期刊： Journal of Chromatography A
期刊介绍： 最新影响因子 4 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Journal of Chromatography A, 1609 (2020) 460433

安捷伦技术： 7100CE+7700x ICP-MS

安捷伦解读： 在本研究中，通过将毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱法相结合，研究了羧基化核壳磁性纳米粒子与硫酸多粘菌素 B 的相互作用。通过在生理 pH 值下使用 25 mM 磷酸盐缓冲液的毛细管电泳亲和模式来探究这种相互作用。使用 ⁵⁴Fe、⁵⁶Fe、⁵⁷Fe、³⁴S 和 ¹²C 同位素来监测电渗流标记物的迁移以及纳米粒子与多粘菌素 B 的相互作用。相互作用数据的分析显示了两个不同的相互作用区域，一个区域多粘菌素 B 浓度较低，另一个区域多粘菌素 B 浓度较高。这些区域的相互作用强度分别为 $1.49 \times 10^7 \text{ M}^{-1}$ 和 $1.60 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$ ，化学计量分别为 0.7 和 3.5。这些差异可以通过多粘菌素 B 引起的纳米粒子之间静电排斥力的降低来解释。这也与纳米粒子的峰形一致：低多粘菌素 B 浓度时峰形尖锐，高多粘菌素 B 浓度时峰形则宽广。

在本研究中，CE-ICP-MS 的优势如下：

- 元素特异性检测：能特异性检测低浓度金属基物质，可准确测定相互作用物种的迁移时间。相较于非特异性的 CE-DAD 检测（其产生的峰形会发生扭曲），CE-ICP-MS 能更精准地分析纳米颗粒与硫酸多粘菌素 B 相互作用过程中各物质的迁移情况，为研究相互作用机制提供可靠数据。
- 多元素同时测定与宽动态范围：ICP-MS 可实现对超痕量浓度水平的含金属和类金属化合物的多元素测定，线性动态范围大，能在相同样品稀释度下同时检测主要成分和痕量成分。这一特性在研究纳米颗粒与生物分子相互作用时，有助于全面了解体系中各种元素的变化，进而深入探究相互作用的本质。
- 提供多种信息：CE 与 ICP-MS 联用，不仅能提供相互作用的化学计量信息，还能给出热力学和动力学信息。通过对这些信息的综合分析，可深入研究金属物种与（生物）分子之间相互作用的细节，如结合位点、结合强度随时间的变化等，为进一步理解纳米颗粒在生物体系中的行为提供依据。
- 复杂介质直接分析：CE 与 ICP-MS 联用在直接分析复杂介质中的纳米材料时，无需进行萃取或大量的样品前处理步骤，减少了样品处理过程中的误差和损失，提高了分析效率和准确性，适用于多种实际样品的分析，拓展了其在复杂生物和环境样品研究中的应用范围。

利用单细胞和电感耦合等离子体质谱ICP-MS技术研究顺铂敏感和耐药细胞模型中铂基金属药物的积累模式

期刊信息： 期刊： Metallomics

期刊介绍： 最新影响因子 2.9 最新中科院分区：生物学类 3 区

期刊编号： Metallomics, 14, 2022, mfac085

安捷伦技术： 8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 在助力铂类金属药物临床前研发，以及深入理解此类药物在具有获得性耐药性的癌细胞中作用机制的研究中，细胞内铂 (Pt) 的积累可被视为关键生物标志物与核心分析靶点。本研究采用运行于快速时间分辨分析模式下的电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) — 即业界熟知的单细胞电感耦合等离子体质谱 (scICP-MS) 技术，精准界定了癌细胞中铂的积累模式，具体包括含铂细胞数量与单细胞内铂的质量这两个关键维度。

通过应用这一新兴且经验证的 scICP-MS 技术，研究得以在顺铂敏感型 (A2780) 与耐药型 (A2780cis) 卵巢癌细胞模型中，对顺铂、卡铂、奥沙利铂三种铂类药物的作用效果展开对比分析。在此基础上，研究推测出除被动扩散作用与药物自身生物活性外，转运蛋白可能在铂类药物的细胞内积累过程中发挥额外作用。同时，基于 scICP-MS 的结果，还为已有的铂类药物耐药机制研究结论提供了交叉验证依据，进一步强化了相关研究发现的可靠性。

此外，研究借助 ICP-MS 技术对细胞内源性元素进行直接分析，进而提出了关于硫 (S) 与铁 (Fe) 代谢的推测 — 这一分析维度为理解铂类药物与细胞内生理过程的相互作用提供了新视角。综上，本研究不仅证实了 scICP-MS 技术在铂类金属药物研究中的实用价值，更为后续拓展 ICP-MS 相关分析能力、深化化疗药物作用机制研究奠定了基础。

Mass spectrometric imaging and quantitative analysis of the in vivo biodistribution of trastuzumab using a rhodium(III) sarcophagine complex (利用铑 (III) 穴状配合物对曲妥珠单抗进行体内生物分布的质谱成像 (LA-ICP-MS) 与定量分析)

期刊信息： 期刊： Inorganic Chemistry Frontiers

期刊介绍： 最新影响因子 6.4 最新中科院分区：化学大类 2 区

期刊编号： Inorg. Chem. Front., 2025, 12, 5688

安捷伦技术： LA-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 采用稳定金属同位素标记抗体的质谱流式细胞术，能够对生物样本中蛋白质的表达进行灵敏成像与定量分析。通常情况下，这类样本在采集后需在体外与一组标记抗体接触。本研究中，作者研发了一种靶向人表皮生长因子受体 2 (HER2) 的治疗性免疫球蛋白 G1 (IgG1) 抗体 — 曲妥珠单抗的铑标记免疫偶联物，并运用质谱流式细胞术对其体内生物分布展开评估。

作者首先将大环双环穴状配体 (sar) 与三价铑离子 (Rh^{3+}) 形成配合物，再连接二溴哒嗪二酮 (DBPD)，制备出一种新型二硫键标记分子 “Rh-sar-DBPD”。该分子通过曲妥珠单抗自身 4 个可接触溶剂的天然二硫键，实现了位点特异性偶联，最终生成近均质、结构明确且稳定的哒嗪二酮 (PD) 免疫偶联物 “Rh-sar-PD-曲妥珠单抗”，每个曲妥珠单抗分子上连接有 4 个 Rh-sar-PD 基团。

在体外和体内研究中，作者分别采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 检测 ^{103}Rh 的含量，以此间接反映 Rh-sar-PD- 曲妥珠单抗的蓄积情况。体外 ICP-MS 研究表明，在表达 HER2 的乳腺癌细胞中，Rh-sar-PD-曲妥珠单抗的摄取呈 HER2 介导依赖性；而 LA-ICP-MS 成像结果显示，该免疫偶联物在细胞内的摄取存在异质性。

为探究 Rh-sar-PD- 曲妥珠单抗在生物体内的分布，作者向携带原位 HCC1954 乳腺癌肿瘤的雌性 NSG 小鼠体内注射该免疫偶联物。对解剖组织中 ^{103}Rh 信号的定量 ICP-MS 分析显示，肿瘤中存在受体特异性 HER2 介导的摄取过程，同时该偶联物在脾脏和肝脏中也有蓄积。最后，对肿瘤和卵巢组织切片的 LA-ICP-MS 成像分析表明，在表达 HER2 的 HCC1954 肿瘤细胞以及已知表达生长因子受体的卵巢卵泡颗粒细胞中，该偶联物的摄取具有异质性。

据本文呈现，本研究首次报道将 ICP-MS 与 LA-ICP-MS 联合应用于体内接触金属标记抗体的组织分析，实现了在乳腺癌小鼠模型中对新型免疫偶联物 Rh-sar-PD-曲妥珠单抗生物分布的定量研究。

ICP-MS 在放射性药物分析中的应用

AN 号： 5994-7920ZHCN (点击下载全文)

Development of an ICP-MS/MS approach for absolute quantification and determination of phosphodiester to phosphorothioate ratio in therapeutic oligonucleotides (开发一种用于治疗性寡核苷酸的绝对定量和磷酸二酯与硫代磷酸酯比率测定的 ICP-MS/MS 方法)

期刊信息： 期刊： Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis

期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：医学分类 3 区

期刊编号： Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis 184 (2020) 113179

安捷伦技术： 8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心围绕治疗性寡核苷酸的质量控制展开研究，实验目的明确为开发一种基于 ICP-MS/MS 的分析方法：一方面实现寡核苷酸的绝对定量，且无需依赖复杂的寡核苷酸标准参照物；另一方面同步精准测定硫代磷酸酯寡核苷酸中磷酸二酯与硫代磷酸酯的比例（此比例是影响寡核苷酸药效与体内稳定性的关键质量属性），同时支持单次分析中可选测定钠等配对离子以完成质量平衡计算，满足 GMP 环境下的常规检测需求。其研究意义重大，既突破了传统定量技术的局限——如 UV 光谱法依赖消光系数（估算偏差约 10%）、酶解-色谱法精度不足、LC/MS 等相对定量法需标准品，也优化了关键比例测定手段——解决了 ^{31}P -NMR 法设备昂贵、操作复杂、难适配批量检测，以及强阴离子交换色谱易受杂质干扰的问题，为癌症、心血管疾病等领域的寡核苷酸药物研发与生产提供关键质量保障。

为达成目标，该研究通过微波消解处理样品以消除寡核苷酸分子大小对检测的影响，利用 ICP-MS/MS 的元素定量能力，基于磷含量推导寡核苷酸浓度实现绝对定量，同时通过测定磷与硫含量计算磷酸二酯/硫代磷酸酯比例。在模型物质（O,O-二乙基硫代磷酸酯钾盐）及多种含不同修饰的合成硫代磷酸酯寡核苷酸样品中验证显示，该方法性能优异：绝对定量回收率达 99.8%–102.4% (RSD 0.2%–0.4%)，比例测定准确度 99%–101.2% (RSD < 1%)，有效解决了传统方法依赖标准品、易受干扰、性能不足的技术问题；此外，方法还实现了单次分析完成多指标检测，含样品制备在内 1 天内即可出结果且仅需约 10 mg 样品，进一步解决了传统方法操作繁琐、周期长、难以批量应用的实际问题，为寡核苷酸药物质量控制提供了高效实用的技术方案。

Targeted Delivery of Cisplatin by Gold Nanoparticles: The Influence of Nanocarrier Surface Modification Type on the Efficiency of Drug Binding Examined by CE-ICP-MS/MS (金纳米颗粒靶向递送顺铂: 通过 CE-ICP-MS/MS 研究纳米载体表面修饰类型对药物结合效率的影响)

期刊信息： 期刊： International Journal of Molecular Sciences
期刊介绍： 最新影响因子 4.9 最新中科院分区：生物学 3 区
期刊编号： Int. J. Mol. Sci. 2022, 23, 2324

安捷伦技术： 7100CE-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 球形金纳米颗粒 (GNPs) 在生物医学应用方面的独特性能已得到广泛研究，目前其作为纳米载体在药物靶向递送系统 (DTDSs) 中的应用备受关注。金纳米颗粒具有表面功能化的可能性，尤其在延长其在血液中的半衰期和提高细胞摄取率方面的优势，为克服常用抗癌药物（如顺铂）的局限性提供了契机 — 这类药物因递送无选择性而会产生严重副作用。本文研究了金纳米颗粒 - 顺铂体系的形成过程（涉及反应动力学与平衡状态），结果表明该体系的形成效率和稳定性极大地依赖于纳米颗粒的表面功能化修饰。

本研究首次采用毛细管电泳-电感耦合等离子体串联质谱联用技术 (CE-ICP-MS/MS) 对金 - 药物纳米缀合物的形成过程进行监测，具体包括优化 CE 分离条件，并通过所建立的 CE-ICP-MS/MS 方法测定反应动力学。为表征纳米载体的特性及揭示表面修饰过程引发的纳米载体理化性质变化，研究还通过动态光散射 (DLS) 法对纳米载体的水合粒径和 ζ 电位进行了测定。

对三种功能化金纳米颗粒 (GNP-PEG-COOH、GNP-PEG-OCH₃ 和 GNP-PEG- 生物素) 的研究表明，不同表面修饰的金纳米颗粒在药物结合效率和纳米缀合物稳定性方面存在显著差异。

Recent development of CE-ICP-MS in biospeciation research and analysis: From anticancer drugs to nanoparticles and beyond 毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱 (CE-ICP-MS) 在生物形态分析研究与应用中的最新进展：从抗癌药物到纳米颗粒及其他领域

期刊信息： 期刊： Trends in Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 12.0 最新中科院分区：化学大类 1 区
期刊编号： Trends in Analytical Chemistry 180 (2024) 117967

安捷伦技术： CE-ICP-MS

安捷伦解读： 这篇综述聚焦毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱 (CE-ICP-MS) 在生物形态分析领域 2019 年至 2024 年初的最新研究进展，系统阐述该联用技术的核心优势、应用场景、技术趋势及现存局限。文章指出，CE-ICP-MS 自 1990 年代末实用化、接口系统商业化后，逐渐成为生物样品中元素形态分析的重要工具，其相比主流的 HPLC-ICP-MS，具备物种友好的分离条件（兼容生理环境与 ICP 操作）、良好的生物基质耐受性（样品多仅需稀释）、更高的电荷物种分辨率、适配微量样品分析及硬件简单易更新等显著优势，可有效解析痕量元素及其化合物的必需性、毒性、生物归宿与功能。

文章核心围绕三大应用领域展开：一是含金属药物形态分析，重点研究 Ru (III)、Pt (IV) 类抗癌药在体内的转化与作用机制，如通过 CE-ICP-MS/MS 监测奥沙利铂与 DNA 的相互作用，或用手性选择剂分离奥沙利铂对映异构体（人尿检出限 64 $\mu\text{g L}^{-1}$ ），但该领域因近 20 年无新金属药物上市，研究多局限于模拟生物体系，且需与 ESI-MS 等联用解决药物-蛋白结合鉴定难题；二是金属纳米颗粒形态分析，研究对象包括金属纳米颗粒（如 Au、Ag）与半导体纳米颗粒（如核壳结构量子点 CdSeS/ZnS），通过控制电解质 pH（如 pH 7.4 的 HEPES 缓冲液）防团聚，用四极杆 ICP-MS 或新兴的串联 ICP-MS 检测，探究其在生物流体中的转化与安全性，例如金纳米颗粒在人血清中与白蛋白的结合依赖颗粒尺寸；三是金属/类金属/非金属形态分析，优化样品前处理（如超声辅助酶解、纳米材料富集）与分离条件，定量检测 As、Fe、Se 等低分子量物种，如脑脊液中 Fe (II)/Fe (III) 检出限达 3 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。

此外，文章提及串联 ICP-MS（提升抗干扰性）与单颗粒 ICP-MS（检测单纳米颗粒）为主要技术趋势，但指出方法存在缺乏有证标准物质、真实生物样品应用不足、需跨学科协作解读结果等局限，未来需优化现有方案、完善质控机制，推动其向常规应用发展。

使用 Agilent 8900 ICP-MS/MS 对矿泉水进行硫同位素分馏分析

AN 号： 5991-7285ZHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： 8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 本研究基于 Agilent 8900 ICP-MS/MS，建立了一种适用于矿泉水等天然水样的硫同位素分析方法。该方法通过 MS/MS 质量转移模式结合 O₂ 反应池技术，将 ³²S⁺ 和 ³⁴S⁺ 转化为 ³²S¹⁶O⁺ 和 ³⁴S¹⁶O⁺ 进行检测，有效消除了 *m/z* 32 和 34 处 O 相关多原子离子的干扰，实现了对两种丰度最高的硫同位素的稳定测量。

针对同位素比分析中的质量歧视和基质效应问题，采用样品 / 标准品交叉进样进行校正，并通过一致的基质稀释减小样品基质组成差异。依托 8900 ICP-MS/MS 的高灵敏度和低硫背景，样品仅需简单稀释即可完成分析，无需复杂的基质去除或化学转化步骤。

在矿泉水、河水、海水、温泉水和高纯度硫酸中的应用结果表明，该方法可获得约 1‰ – 1.5‰ (2σ) 的同位素比精度，能够有效区分不同水体的硫同位素特征，展示了 ICP-MS/MS 在低浓度硫同位素分析中的应用潜力。

使用单颗粒 ICP-MS 定量分析植物叶中的铜纳米颗粒

AN 号： 5994-0214ZHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： 7900 ICP-MS 单颗粒技术

安捷伦解读： 随着纳米肥料和纳米农药的应用不断增加，其在农作物表面的吸附、残留及潜在暴露风险亟需可靠的分析手段进行评估。传统表征技术难以在复杂生物基质中同时获得纳米颗粒的粒径、数量和元素组成信息，限制了对纳米农用化学品行为的系统研究。

本研究基于 Agilent 7900 ICP-MS 的单颗粒 ICP-MS (spICP-MS) 技术，建立了一种用于定量分析植物叶片表面铜纳米颗粒的方法。以纳米 CuO 模拟铜基纳米农药，通过控制条件将其施用于生菜、羽衣甘蓝和甘蓝叶片表面，并对清洗水样进行 spICP-MS 分析，实现了对铜纳米颗粒粒径分布、颗粒浓度及溶解元素浓度的同步测定。

结果表明，不同叶片类型对铜纳米颗粒的吸附和保留行为存在显著差异。表面较粗糙、疏水性更强的甘蓝叶片在多次清洗后仍保留较多纳米颗粒，而表面光滑的生菜更易去除小粒径颗粒。多次清洗实验显示，大部分纳米颗粒可通过简单水洗去除，残留铜浓度均低于饮用水中铜的法规限值。spICP-MS 为研究纳米农药与植物相互作用提供了一种快速、定量且信息高度集成的分析工具，可用于评估纳米农用化学品在食品链中的潜在残留风险，并为其环境与健康影响研究提供重要的数据支撑。

Method Development for the Determination of Total Fluorine in Foods by Tandem Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with a Mass-Shift Strategy (质量转移-串联电感耦合等离子体质谱法测定食品中总氟的方法开发)

期刊信息： 期刊： Journal of Agricultural and Food Chemistry

期刊介绍： 最新影响因子 6.2 最新中科院分区：农林科学 1 区

期刊编号： J Agric Food Chem, 2017, 65(16): 3406-3412

安捷伦技术： 8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文建立了一种基于串联电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS/MS) 质量偏移策略测定食品和茶叶样品中总氟含量的方法。该方法包括四个步骤：

(1) 通过电感耦合等离子体将难以电离的氟原子转化为 BaF^+ ；(2) 使用第一四极杆 (Q1, 设置为 157) 确保只有 m/z 157 的离子 (即 $^{138}\text{Ba}^{19}\text{F}^+$ 、 $^{157}\text{Gd}^+$ 和 $^{138}\text{Ba}^{18}\text{OH}^+$) 进入反应室 (RC)；(3) 通过在 RC 中与 NH_3 反应将 $^{138}\text{Ba}^{19}\text{F}^+$ 转移到新的质量 $^{138}\text{Ba}^{19}\text{F}(^{14}\text{NH}_3)_3^+$, 以避免干扰离子 (即 $^{157}\text{Gd}^+$ 和 $^{138}\text{Ba}^{18}\text{OH}^+$)；(4) 将无干扰的 $^{138}\text{Ba}^{19}\text{F}(^{14}\text{NH}_3)_3^+$ 传递到第二四极杆 (Q2, 设置为 208) 由质谱检测器检测。

目标氟 (在 ICP 和 RC 中) 的质量转移过程遵循路径： $\text{F} + ^{138}\text{Ba}^+ \rightarrow ^{157}\text{BaF}^+ + 3\text{NH}_3 \rightarrow ^{208}\text{BaF}(\text{NH}_3)_3^+$, 而 RC 中主要的 $^{157}\text{Gd}^+$ 的反应路径建议为 $^{157}\text{Gd}^+ + \text{NH}_3 \rightarrow ^{157}\text{Gd}^{14}\text{N}^+\text{H} + n\text{NH}_3 \rightarrow ^{157}\text{Gd}^{14}\text{N}^+\text{H} (^{14}\text{N}^1\text{H}_3)_n^+ (n = 0-5)$ 。

在优化的串联质谱条件 ($\text{Q1} \rightarrow \text{Q2} = 157 \rightarrow 208$) 和反应池反应气流量 ($\text{NH}_3/\text{He} = 10:90$, 8.0 mL/min) 下, 该方法的背景等效浓度 (BEC) 为 0.021 $\mu\text{g/mL}$, 检出限 (LOD) 为 0.022 $\mu\text{g/mL}$ 。校准曲线在 0.1–10 $\mu\text{g/mL}$ 浓度范围内呈良好线性关系, 相关系数 $R^2 = 0.9999$ 。

对 14 种不同食品类标准参比物质 (SRMs) 的测定结果与标准值在 95% 置信水平下吻合良好。采用该方法对 13 个品牌的茶叶样品进行氟含量评估, 结果显示: 茶叶中总氟浓度范围为 39.2–93.2 $\mu\text{g/g}$; 茶汤中氟含量为 23.5–85.4 $\mu\text{g/g}$, 提取效率为 56.0%–91.6%; 某普洱砖茶经多次过滤后, 第 1 至第 4 次滤液中的水溶性氟含量分别为 58.7、21.4、3.82 和 1.41 $\mu\text{g/g}$ 。

Development of a Robust and Sensitive Method for Analyzing Butyltins, Phenyltins and Octyltins in Seafood (海产品中丁基锡、苯基锡及辛基锡类化合物的稳健且高灵敏分析方法开发)

期刊信息： 期刊： Food Analytical Methods

期刊介绍： 最新影响因子 3.0 最新中科院分区：农林科学 3 区

期刊编号： Food Analytical Methods, 2020, 13(2): 337-347

安捷伦技术： 7890 GC+7700 ICP-MS

安捷伦解读： 该文建立并验证了一种可测定海产品中 10 种有机锡化合物 (OTCs) 的新方法, 包括丁基锡、辛基锡、苯基锡和三环己基锡等, 这些化合物在海鲜中得以保留其各自的组成成分。优化后的方法流程如下: 首先通过酸性甲醇溶液提取 OTC, 然后用弗罗里硅土固相萃取 (SPE) 进行净化; 提取物中的 OTCs 用四乙基硼酸钠进行衍生化; 最终利用气相色谱与电感耦合等离子体质谱仪 (GC-ICP-MS) 进行测定。此外, 还研究并评估了气相色谱串联质谱法对 OTCs 的灵敏度。依据欧洲分析化学委员会 (Eurachem) 指南, 对包括鱼类、甲壳类动物和软体动物在内的各种海鲜样本进行了验证。结果表明: 在样品中目标物浓度范围为 0.125–12.5 $\mu\text{g Sn/kg}$ 时, 方法呈现良好的线性关系; 在 1.0、1.5、2.0 $\mu\text{g Sn/kg}$ 三个加标水平下, 样品的平均加标回收率为 70%–120%; 在上述加标水平下, 以相对标准偏差 (RSD) 表示的精密度均低于 10%; 方法的检出限 (LOD) 和定量限 (LOQ) 分别低于或等于 0.25 $\mu\text{g Sn/kg}$ 和 1.0 $\mu\text{g Sn/kg}$ 。此外, 本研究还采用标准参比物质对所建方法的准确性进行了评估。该方法已成功应用于实际样品中有机锡化合物的测定。

使用配备 Quick Change 快速切换阀头的 HPLC-ICP-MS 实现元素形态分析方法的自动序列分析

AN 号： 5994-2943ZHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： 1260 HPLC+7900 ICP-MS

安捷伦解读： 多种元素的迁移率、生物利用率和毒性取决于元素的化学形式或形态，因此砷、汞、铬、卤素等元素在食品与环境样品中的形态分析已成为法规合规与风险评估的关键技术需求。

本应用展示了一种基于 Agilent 1260 Infinity II HPLC 与 7900 ICP-MS 的集成方案，通过 Quick Change 快速切换阀头，在单一系统中实现多种元素形态分析方法的自动序列切换。系统可在无人干预条件下自动选择不同色谱柱与流动相，连续运行无机砷 As(III)/As(V)、甲基汞以及溴 / 碘多种形态分析方法，并在方法间插入清洗序列，有效避免交叉污染。

实验以三种形态分析方法在三天内以不同顺序运行，所有目标形态均表现出优异的线性 ($R > 0.9995$)、稳定的保留时间和峰面积重现性，回收率稳定在 90–110%，日内和日间精密密度均低于 10%。清洗序列可将方法间残留信号控制在极低水平，确保多方法连续运行的可靠性。

结果表明，配备 Quick Change 快速切换阀头的 HPLC-ICP-MS 系统显著提升了多元素形态分析的自动化程度和实验室通量，特别适用于食品安全与环境监测中需要同时开展多种形态分析的应用场景，为法规检测和高通量分析提供了一种高效、灵活且稳定的解决方案。

Dithizone-functionalized C 18 online solid-phase extraction-HPLC-ICP-MS for speciation of ultra-trace organic and inorganic mercury in cereals and environmental samples (双硫腙功能化 C18 在线固相萃取-HPLC-ICP-MS 用于谷物和环境样品中超痕量有机和无机汞的形态分析)

期刊信息： 期刊： Journal Of Environmental Sciences

期刊介绍： 最新影响因子 6.3 最新中科院分区：环境科学与生态学 2 区

期刊编号： Journal of Environmental Sciences, 2022, 34(5): 403-410

安捷伦技术： 7900 ICP-MS

安捷伦解读： 该文首次建立了一种简单高效的双硫腙功能化固相萃取 (SPE) 流程，将其与高效液相色谱 (HPLC)- 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 在线联用，用于谷物和环境样品中超痕量汞形态（无机二价汞 (Hg (II))、甲基汞 ($\text{CH}_3\text{Hg (II)}$) 和乙基汞 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg (II)}$)）的富集与测定。

在该方法中，利用双硫腙对商品化 C18 柱进行功能化修饰、对上述汞形态的富集及洗脱，均可通过所研发的 SPE 装置在线完成。仅需使用简单的 2- 巯基乙醇溶液 (1% (V/V))，即可同时作为 SPE 的洗脱液和 HPLC 分离汞形态的流动相，大幅简化了方法流程与仪器操作。

通过改变双硫腙用量、2- 巯基乙醇浓度及样品体积，对该在线 SPE 方法进行了优化；此外，还探讨了 pH 值、共存干扰离子及盐效应对富集效果的影响。在优化条件下，对于 5 mL 水样，各汞形态的检出限分别为：Hg (II) 0.15 ng/L、 $\text{CH}_3\text{Hg (II)}$ 0.07 ng/L、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg (II)}$ 0.04 ng/L，加标回收率范围为 85%–100%。

经双硫腙功能化修饰的 C18 SPE 柱，单次修饰后可重复使用，显著简化了富集操作步骤；同时，汞形态在 SPE 柱上富集后的稳定性表明其适用于现场采集汞形态以供后续实验室分析。这种环保方法为检测谷物和环境样本中的超痕量汞形态提供了一种可靠的工具。

利用 IC-ICP-MS 测定水产中的多聚磷酸盐

AN 号： 5994-9159ZHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： IC+ 7850 ICP-MS

安捷伦解读： 多聚磷酸盐常被用于水产品的保水和品质改善，但过量或违规使用会影响食品安全与公平贸易，因此其准确鉴别与定量对监管检测尤为重要。本应用建立了一种基于离子色谱 - 电感耦合等离子体质谱（IC-ICP-MS）的分析方法，实现了水产样品中正磷酸盐与多聚磷酸盐的分离与定量检测。方法利用离子色谱对不同聚合度磷酸盐的高分离能力，并结合 ICP-MS 对磷元素的高灵敏、选择性检测，有效避免了复杂基质对检测结果的干扰。

结果表明，该方法能够在一次分析中同时获得多种磷形态的信息，具有良好的线性、重复性和回收率，18 分钟即可分析五种磷酸盐，相对于国标方法 (60min)，时间缩短了 42min。样品的 RSD 在 1~2.6% 之间，加标回收率在 99~106% 之间。由此可见 IC-ICP-MS 为检测保水虾安全提供了有力手段，为守护大家的餐桌安全筑起一道坚固防线。

利用基于 GC-ICP-MS/MS 的磷和硫检测方法测定食品中的农药

AN 号： 5991-6260CHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： 7890 GC+8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 本研究建立了一种基于 GC-ICP-MS/MS 的杂原子特异检测策略，通过对农药分子中磷（P）和硫（S）元素的直接测量，实现了对有机磷和有机硫农药的高选择性分析。

该方法的核心在于将气相色谱分离与三重四极杆 ICP-MS 的 MS/MS 反应池质量转移模式相结合，利用 O₂ 作为反应气，将难电离、强干扰的 ³¹P⁺ 和 ³²S⁺ 转化为 ³¹PO⁺ (m/z 47) 和 ³²SO⁺ (m/z 48) 进行检测，有效消除了常规 ICP-MS 中长期存在的严重干扰问题，显著降低背景噪声并提升信噪比。该策略突破了磷、硫元素在等离子体中电离效率低、检测灵敏度受限的技术瓶颈，使 ICP-MS 在农药痕量分析中的适用性得到实质性扩展。

在婴幼儿食品水果泥及茶叶等复杂真实样品中，该 GC-ICP-MS/MS 方法在宽线性范围内表现出优异的定量性能（相关系数均高于 0.99），对多数有机磷农药的检出限和定量限达到或优于食品安全常规要求，且对多杂原子农药具有天然的识别优势。研究表明，基于元素特异响应的检测思路能够有效规避分子结构差异带来的定量不确定性，为复杂食品基质中农药残留的确认性分析提供了一种高度选择性的补充方案。

Simultaneous and ultra-sensitive quantification of multiple peptides by using europium chelate labeling and capillary electrophoresis-inductively coupled plasma mass spectrometry (利用铕螯合物标记和毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱法同时超灵敏定量检测多种肽类物质)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry
期刊介绍： 最新影响因子 3.2 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： JOURNAL OF ANALYTICAL ATOMIC SPECTROMETRY, 2012, 27(6): 946-951

安捷伦技术： CE + 7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 许多重要的肽和蛋白质在生物体内含量极低，其含量或丰度变化能反映生物系统状态，因此超灵敏定量分析意义重大。现有定量技术，如同位素标记结合 LC-MSⁿ 或 MALDI-TOF-MS 等，存在标记复杂、成本高、分析时间长等不足；LC-MS 或 CE-MS 灵敏度欠佳。ICP-MS 虽检测元素性能优越，但对肽和蛋白质主要成分检测灵敏度低，需金属离子标记。CE 分离效率高、样品消耗少。

本文基于 Eu³⁺ 螯合物标记和 CE-ICP-MS 开发了一种新型的超灵敏方法，可在 15 分钟内分析 3 个 β -CM，检出限极低，为 1.79–2.13 amol，检出限为 RSD < 6%。该方法成功用于分析真实奶酪样品中的 β -CM，回收率为 85%–103%，表明该方法可靠，灵敏度高，具备同时分析多种肽的能力、分析过程简单、耗时短、无需使用同位素和抗体、成本低等特点。该方法的成功也为同时检测低丰度蛋白质或多种生物标志物提供了新的可能性。

Simultaneous detection of zinc dimethyldithiocarbamate and zinc ethylenebisdithiocarbamate in cabbage leaves by capillary electrophoresis with inductively coupled plasma mass spectrometry (CE-ICP-MS法测定农药残留: 卷心菜叶中福美锌和代森锌)

期刊信息： 期刊： JOURNAL OF SEPARATION SCIENCE
期刊介绍： 最新影响因子 2.8 最新中科院分区：分析化学 3 区
期刊编号： Journal of Separation Science, 2017, 40(19): 3898-3904

安捷伦技术： CE+ 7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 福美锌和代森锌作为常见二硫代氨基甲酸酯类杀菌剂，广泛用于果蔬作物病害防治，但具有神经毒性、免疫毒性等危害，开发快速灵敏的检测方法至关重要。现有检测方法存在操作复杂、灵敏度低等缺点，本文利用 CE-ICP-MS 联用技术同时检测作物中痕量福美锌 (Ziram) 和代森锌 (Zineb)，为金属有机农药残留检测提供了新途径。

由于 Ziram 和 Zineb 呈电中性，未经任何处理时，它们很难通过 CE 实现分离。该文采用 α -环糊精为改性剂以提高分离度，12 min 内可实现基线分离；检出限分别为 1.9 ng Zn/mL (福美锌) 和 3.0 ng Zn/mL (代森锌)，灵敏度高；样品加标回收率为 95%–107%，RSD 小于 7%，方法可靠性好、回收率高，为作物中福美锌和代森锌检测及金属有机农药残留检测提供了可靠方法。

Capillary Electrophoresis/Inductively-Coupled Plasma-Mass Spectrometry: Development and Optimization of a High Resolution Analytical Tool for the Size-Based Characterization of Nanomaterials in Dietary Supplements (CE-ICP-MS: 用于膳食补充剂中纳米材料尺寸表征的高分辨率分析的开发与优化)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区
期刊编号： Analytical Chemistry, 2014, 86(23): 11620-7

安捷伦技术： 7100 CE+ 7700x ICP-MS

安捷伦解读： 纳米材料因独特性质在多领域广泛应用，但现有纳米材料尺寸表征技术存在局限性。如透射电子显微镜 (TEM) 统计意义有限、成本高且样品前处理复杂；差示离心沉降和动态光散射 (DLS) 在分散样品中易产生误差；不对称流动场 - 流动分级 (AF4) 存在分析物回收率低的问题；液相色谱 (LC) 与 ICP-MS 联用在分离多组分纳米颗粒混合物方面有待改进。本研究将 CE-ICP-MS 用于分离和表征膳食补充剂中的金属纳米颗粒，研究了多种因素，包括表面活性剂的类型和浓度、运行缓冲液的 pH 值以及施加的电压，以优化分离条件。该文结果表明，通过缓冲液中使用阴离子表面活性剂——十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)，分离效果得到了显著提高，从而能够轻松区分具有非常小尺寸差异（例如 5、15、20 和 30 nm）的金纳米颗粒混合物中的相邻尺寸组分。研究表明表面活性剂的类型和浓度对分离效果至关重要，而运行缓冲液的施加电压和 pH 值则主要通过改变电渗流来影响洗脱时间。量子点被用作迁移率标记物以消除每次运行的差异。纳米颗粒的直径遵循线性关系。其与相对电泳迁移率的关系以及未知样本的大小信息可以通过标准曲线推算得出。最佳的实验条件下，5-30 nm 的金纳米颗粒可在 20 min 内完全分离，该方法重现性良好，峰分辨率较高。使用聚合物包覆的 CdSe/ZnS 量子点作为迁移标记补偿 EOF 波动，相对迁移率与纳米颗粒直径呈线性关系。通过分析 NIST 金纳米颗粒标准参比物质验证了标准曲线的准确性，该方法在定量分析金含量方面可靠性高。对两种含有纳米金的膳食补充剂进行分析，CE-ICP-MS 测量结果与 TEM 结果吻合良好。该方法还可用于表征含铂、钨等纳米颗粒的膳食补充剂。

Speciation analysis of arsenic compounds by capillary electrophoresis on-line coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry using a novel interface (采用新型接口将毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用，对砷化合物进行形态分析)

期刊信息： 期刊： Journal of Chromatography A
期刊介绍： 最新影响因子 4 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： Journal of Chromatography A, 2013, 1304: 227-233

安捷伦技术： CE+7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 该文开发了一种毛细管电泳 (CE) 与电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 联用系统，用于同时测定十种砷化合物，包括亚砷酸盐、砷酸盐、甲基砷酸、二甲基砷酸、砷贝塔酸、砷胆碱、3-硝基-4-羟基苯砷酸、邻氨基砷酸、对尿嘧啶苯砷酸和4-硝基苯砷酸。该 CE-ICP-MS 系统通过一种新颖且高效的接口进行联用，该接口直接用作雾化器。10 种砷形态的分离在一根 100 cm 长 × 50 mm 内径的熔融石英毛细管上完成。优化了各种条件：电泳缓冲液的组成、浓度和 pH 值、分离电压、鞘流液体中的甲醇浓度以及样品注入时间等，使用由 12 mmol/L NaH₂PO₄ 和 8 mmol/L H₂BO₃ 组成的电泳缓冲液 (pH = 9.20) 并在 +30 kV 电压下实现了十种砷化合物的基线分离。这十种砷化合物的检出限范围在 0.9 至 3.0 ng/g (以砷计) 之间，对应的绝对检出限在 19 至 65 fg (以砷计) 范围内，相对标准偏差 (RSD, n = 5) 在迁移时间、峰高和峰面积方面分别低于 1.5%、5.7% 和 4.8%。该方法成功地用于测定两种有证参比物质 (TORT-2 和 DORM-3) 以及环境样本 (如地下水样本、草药植物和鸡肉) 中的各种砷化合物。

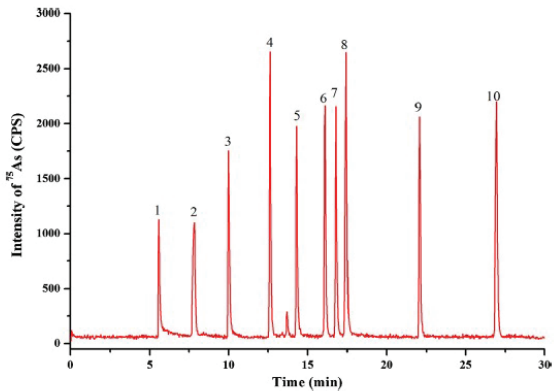


图. 优化条件下, 100 ng/g 的混合砷化合物的电泳图谱。砷化合物: 1. AsC; 2. AsB; 3. As(III); 4. DMA; 5. p-UPAA; 6. o-ASA; 7. 4-NPAA; 8. MMA; 9. 3-NHPAA; 10. As(V)

Speciation analysis of lead in marine animals by using capillary electrophoresis couple online with inductively coupled plasma mass spectrometry (采用CE-ICP-MS对海洋动物中的铅进行形态分析)

期刊信息： 期刊： Electrophoresis
期刊介绍： 最新影响因子 2.5 最新中科院分区：生物学 3 区
期刊编号： Electrophoresis, 2014, 35(9): 1346-1352

安捷伦技术： CE+7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 该文报告了一种环保型的微波辅助提取方法，用于从海洋生物中提取微量的铅化合物，并采用 CE-ICP-MS 技实现 Pb²⁺、三甲基铅氯化物 (TML) 和三乙基铅氯化物 (TEL) 的超灵敏分析。

该提取方法简单且提取效率高。它可用于完全提取海洋生物样本中的无机铅和有机铅，且不会改变其形态。该分析方法对 Pb²⁺、TML 和 TEL 的检出限低至 0.012–0.084 ng/mL（以铅计），并且可以直接用于测定海洋生物中的超微量 Pb²⁺、TML 和 TEL，无需任何预浓缩。该方法在 20 分钟内成功地测定了蛤蜊和牡蛎组织中的 Pb²⁺、TML 和 TEL，相对标准偏差 (n = 6) 为 5%，回收率为 91%–104%。结果表明，Pb²⁺ 是蛤蜊和牡蛎中铅的主要形式，而有机铅 (TML) 仅在牡蛎中被发现。所提出的方法为准确评估海鲜中的铅污染提供了一种切实可行的方法。

Simultaneous analysis of Cr(III), Cr(VI),and chromium picolinate in foods using capillary electrophoresis-inductively coupled plasma mass spectrometry (利用CE-ICP-MS同时分析食品中的三价铬、六价铬和吡啶甲酸铬)

期刊信息： 期刊： Electrophoresis
期刊介绍： 最新影响因子 2.5 最新中科院分区：生物学 3 区
期刊编号： Electrophoresis, 2015, 36: 1208–1215

安捷伦技术： CE+7700 ICP-MS

安捷伦解读： 铬的生物活性存在争议，Cr(III) 对人体有益，而 Cr(VI) 具有高毒性。现有铬形态分析技术存在局限性，如基于液相色谱 (LC) 的技术稳定性差，离子色谱 (IC) 技术只能检测离子态 Cr 且其洗脱液会损害检测仪器，基于液相萃取或固相萃取 (SPE) 的技术耗时费力且准确性差，且以往方法均无法检测有机铬化合物。

CE 分离效率高、样品及试剂用量少，ICP-MS 灵敏度高，本文结合二者，建立了一种 CE-ICP-MS 联用技术，同时检测食品中痕量无机铬（如 Cr (VI)、Cr (III)）和有机铬（如吡啶甲酸铬 (CrPic)）的唯一方法，为准确评估不同铬营养补充剂的安全性提供了可靠手段。其中，三价铬 (Cr³⁺) 与反式 -1,2- 二氨基环己烷-N,N,N',N' - 四乙酸 (DCTA) 结合形成单电荷的铬-DCTA 一复合物。然后，在分离电压为 -13 kV 的条件下，通过电泳色谱法 (CE) 在 8 分钟内分离出了 Cr(VI) (CrO₄²⁻)、Cr-DCTA⁻ 和 CrPic。随后使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 对其进行监测。该方法简单、有效且灵敏，检出限分别为：Cr(VI) 0.10 ng Cr/mL、Cr(III) 0.18 ng Cr/mL 和 CrPic 0.20 ng Cr/mL。该方法成功地在营养补充剂（CrPic 酵母片）中测定了 Cr(VI)、Cr(III) 和 CrPic，相对标准偏差 (n = 5) 为 6%，回收率为 93%–103%。实验结果表明，CrPic 是该营养补充剂中铬的主要存在形式，其浓度为 1514.6 µg Cr/g。

采用配备不连续进样和自动稀释功能的 ICP-MS/MS 对食品进行自动化分析

AN 号： 5994-9095ZHCN (点击下载全文)

安捷伦技术： 9500 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 目前，全球食品安全监管标准持续升级，各国不断收紧食品污染物限值。在此背景下，食品检测领域对分析仪器的性能、灵敏度、准确度和检测效率提出了更高的要求。

本研究采用 Agilent 9500 串联四极杆 ICP-MS (ICP-MS/MS) 搭配智能稀释系统 (ADS 2)，开发出一种食品中重金属残留分析方案。

9500 ICP-MS/MS 依托独家双池耦合碰撞反应系统 (DCS)，结合高性能氦气碰撞模式 (AHM) 与空气反应模式，可高效消除检测过程中的多原子、双电荷干扰，显著提升对低质量数元素的检测灵敏度，确保结果的准确度。配套的 ADS 2 系统可自动化完成标准溶液配制、样品预稀释、超量程样品二次稀释等操作，大幅简化样品前处理流程，有效提升整体检测效率。

研究选取常用有证标准物质 (SRM)，覆盖各类食品样品检测场景。有针对性地优化了仪器配置和分析方法，大幅提升了样品检测通量。按照 AOAC 2015.01 标准方法进行验证。结果表明，9500 ICP-MS/MS 检出限远优于标准要求，标准元素的回收率均在 89%–114% 范围内。在连续运行五小时以上的稳定性测试中，CCV 和 ISTD 回收率均保持在 AOAC 限值范围内。该分析方案能够适配当前严苛的食品安全检测法规要求，兼顾高准确度、高灵敏度与高通量优势，为食品中重金属残留检测提供强有力的技术支撑，能够满足现代化食品检测实验室的常态化检测需求。

Location-dependent occurrence and distribution of metal-based nanoparticles in bay environments (海湾环境中金属基纳米颗粒的位置依赖性出现和分布)

期刊信息： 期刊： Journal of Hazardous Materials
期刊介绍： 最新影响因子 11.3 最新中科院分区：环境科学与生态学 1 区 Top
期刊编号： Journal of Hazardous Materials 476 (2024) 134972

安捷伦技术： sp-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 文章以中国南海北部相邻的大亚湾（半封闭自然保护区）和红海湾（开放经济开发区）为研究区域，通过 spICP-MS 检测 7 种典型 MNPs（Ti、Cu、Zn、Ag、Mn、Pb、Cr 基纳米颗粒），结合环境参数与风险评估。

揭示 MNPs 的空间分布差异及驱动因素：大亚湾半封闭地形形成的内部水循环（0.3–0.4 m/s，周转时间 2.67–3.55 天）远快于 MNPs 的沉降时间（约 6.34 年），水循环的混合作用抑制了 MNPs 团聚，导致分布均匀；红海湾作为经济开发区，陆源排放（工业废水等）是 MNPs 的主要来源，叠加西南向沿岸流的输送作用，形成“近岸高、远海低”的梯度分布；且其总 MNPs 负荷是大亚湾的 4 倍。

基于 spICP-MS 检测的 MNPs 浓度数据，结合“物种敏感性分布 (SSD)”和“风险表征比 (RCR)”评估环境风险：通过 spICP-MS 确定各 MNPs 的实际浓度（如红海湾 Ti 基 NPs 最高达 34.07 $\mu\text{g/L}$ ），计算不同 MNPs 的预测无效应浓度 (PNEC)，发现 Ag 基 NPs 毒性最强 (PNEC = 0.061 $\mu\text{g/L}$)，Ti 基 NPs 因浓度高成为风险主导因子；红海湾总风险值 (RCR total = 0.84 – 2.98) 远高于大亚湾 (RCR total = 0.15 – 0.52)，且近岸多个位点（如 H1、H2）属于“高风险”，证实陆源排放加剧了 MNPs 的环境风险。

该研究通过 spICP-MS 解决了环境中低浓度 MNPs（ng/L– $\mu\text{g/L}$ 级别）“难定量、难分粒径”的技术瓶颈，首次在现场尺度揭示了“水循环”和“陆源排放”对海湾 MNPs 分布的关键影响，为 MNPs 的排放管控和风险治理提供了直接的实测数据支撑。

Characterization of biogenic selenium nanoparticles in hypersaline media by single particle inductively coupled plasma mass spectrometry: Haloferax mediterranei case (通过单颗粒电感耦合等离子体质谱法对盐度极高的环境中生物生成的硒纳米颗粒的特性进行研究:以地中海嗜盐菌为例)

期刊信息： 期刊： Analytica Chimica Acta
期刊介绍： 最新影响因子 6.0 中科院分区：化学 2 区 Top
期刊编号： Analytica Chimica Acta 1335 (2025) 343453

安捷伦技术： sp-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心使用单颗粒电感耦合等离子体质谱 (single particle inductively coupled plasma-mass spectrometry, spICP-MS) 的“单颗粒检测与定量”功能，围绕“高盐介质中嗜盐古菌 (*Haloferax mediterranei*) 合成的生物源硒纳米颗粒 (SeNPs) 表征”展开研究，解决了高盐基质对纳米颗粒分析的干扰问题，同时揭示了该古菌的 SeNPs 合成能力。

spICP-MS 在此研究中的核心价值是在高盐复杂基质中，无需经验校正因子即可精准定量 SeNPs 的“粒径分布”与“颗粒浓度”，并通过实验优化突破高盐环境的分析瓶颈。

同位素选择灵活性：同时监测 $^{78}\text{Se}^+$ （直接检测，无需反应池）和 $^{80}\text{Se}^+$ （以 $^{80}\text{Se}^{16}\text{O}^+$ 形式在氧气反应池检测），最终选择 $^{78}\text{Se}^+$ 进行后续分析（仪器优化更简便，信号稳定性更高）。高盐基质（如 Minimal Mineral Medium, MMM）会通过“易

电离元素抑制 Se 电离”或“碳 / 硫 / 磷促进 Se 电离”产生干扰，实验通过 1:10³ 稀释（将 TDS 降至 0.24 g/L），使基质干扰可忽略（信号相对强度 I_{rel} 在 0.96–1.04 范围内），且无需基质匹配标准，直接用纯水标准即可准确分析。

用 150 nm 商用 SeNPs 标准品验证，结果显示：spICP-MS 测得的粒径 (146.1 ± 1.2 nm, ⁷⁸Se⁺)，与透射电子显微镜 (TEM) 的参考值无显著差异（95% 置信水平 t 检验），且无需经验校正因子（突破此前文献中“需校正因子”的局限）。对比高盐培养基 (MMM, TDS = 240 g/L) 与常规培养基 (LB, TDS = 20 g/L)，发现 1:10³ 稀释的 MMM 中，与参考溶液相比，使用非基质匹配的颗粒平均直径（2.2%）和颗粒浓度（10%）的数据偏差在 spICP-MS 中发现的典型实验误差范围内。证明该方法可用于嗜盐菌高盐培养体系的 SeNPs 检测。

此研究通过 spICP-MS 实现两大突破：技术层面：首次建立“无需基质匹配标准、无需经验校正因子”的高盐介质生物源 SeNPs spICP-MS 分析方法，为其他极端环境（如盐湖、高盐废水）中纳米颗粒的分析提供范式；科学层面：首次证实 *H. mediterranei* 可利用亚硒酸盐合成 SeNPs，且 SeNPs 粒径与其他嗜盐微生物（如 *Halogeometricum borinquense*）相当，为“利用嗜盐菌进行高盐环境 Se 污染修复”或“生物源 SeNPs 绿色合成”提供新菌种资源。

使用单颗粒电感耦合等离子质谱 (spICP-MS) 法分析土壤中的硫化汞纳米颗粒物

AN 号： 5994-4694ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本研究采用单颗粒电感耦合等离子体质谱 (spICP-MS) 技术，建立了一种用于提取和定量不同性质的土壤中 Hg-NPs 的标准方法，可以快速有效地测定土壤中的 Hg-NPs，帮助研究人员更好地理解汞的生物化学地球循环，特别是了解和控制 Hg-NPs 的甲基化过程。

作者通过将合成的平均粒径为 41 nm 的 HgS-NPs，定量添加至不同类型的土壤中，经对比多种提取液，确定使用 10 mmol/L 焦磷酸四钠 (TSP) 可以使土壤中的 HgS-NPs 的提取效率达到 102%±1%（以粒子数计），且不影响其粒径分布。通过优化仪器参数，借助 ICP-MS MassHunter 软件模块创建检测方法，实现对 HgS-NPs 的精准定量，超纯水体系中粒径检测限达 21 nm，土壤提取液中为 27 nm，实现对土壤中低浓度 Hg-NPs 的高灵敏度定量分析。利用该方法对全国 13 个不同性质土壤样品开展检测，获得不同地区土壤 Hg-NPs 的粒径分布与浓度数据，为汞的生物地球化学循环研究提供关键支撑。

Studying the degradation of bulk PTFE into microparticles via spICP-MS: a systematically developed method for the detection of F-containing particles (通过spICP-MS 研究聚四氟乙烯分解为微粒的过程：一种用于检测含氟颗粒的系统性开发方法)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry
期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2024, 39, 2030–2037

安捷伦技术： sp-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 文章采用单颗粒电感耦合等离子体质谱 (spICP-MS) 功能，结合钡基等离子体改性剂与实验设计法 (DoE)，建立了氟选择性检测方法，用于研究聚四氟乙烯 (PTFE) 本体材料降解为微塑料颗粒的过程。

文章针对氟元素电离能高难以直接检测的问题，通过在线添加钡溶液生成可检测的 BaF⁺ 离子，并运用 DoE 法系统性优化等离子体参数、离子光学、质量过滤及碰撞/反应池条件。借助显微镜和拉曼光谱表征 PTFE 标准微粒，同时采用碳选择性 spICP-MS 方法进行结果佐证，确认该氟选择性方法可准确测定 PTFE 微粒的数量浓度与粒径分布。开展模拟环境实验，将 PTFE 本体材料置于模拟海水中，经 6 天紫外光照与搅拌处理。通过所建方法检测到每克 PTFE 本体材料降解生成 2.35×10^5 个氟基微粒，其平均质量为 28 pg、平均粒径为 2.7 μm。

本文突破传统 ICP-MS 无法直接检测氟的局限，利用钡基等离子体改性剂结合 MS/MS 模式，实现氟基微粒的选择性检测，且通过 DoE 法实现检测参数的系统性优化。采用显微镜、拉曼光谱与碳选择性 spICP-MS 的多手段交叉验证，提高了 PTFE 微粒表征的准确性与可靠性。首次将氟选择性 spICP-MS 方法应用于 PTFE 本体材料的环境降解研究，为氟聚合物微塑料的检测与环境归趋分析提供了新方案，适用于海水等复杂基质。该研究为氟基微塑料的精准分析提供了可靠技术手段，对评估氟聚合物的环境风险具有重要意义。

Novel non-target analysis of fluorine compounds using ICP-MS/MS and HPLC-ICP-MS/MS (利用 ICP-MS/MS 和 HPLC-ICP-MS/MS 对氟化合物进行新颖的非靶向分析)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry
期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2017, 32, 942–950 | 943

安捷伦技术： 1290 HPLC-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心使用串联四极杆电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS/MS, 带碰撞/反应池) 的“多原子离子检测”与“干扰消除”功能，结合高效液相色谱 (HPLC) 的分离能力，建立了氟 (F) 的“总量分析”与“形态分析”双方法体系，解决了传统氟分析中“特异性差、干扰多、无法区分氟形态”的瓶颈，实现环境样品中氟化物 (F) 与氟乙酸 (FAA) 的非靶向检测。

向样品中在线添加钡 (Ba) 标准溶液 (优化后浓度 15 mg/L, 混合比例 1:1.5)，在等离子体中 Ba^+/Ba^{2+} 与 F^0/F^- 结合形成 $^{138}Ba^{19}F^+$ (质荷比 $m/z = 157$)，通过检测该多原子离子的信号强度间接定量氟含量 — 避免直接检测 $^{19}F^+$ 的电离难题，且 $^{138}Ba^{19}F^+$ 的形成效率远高于 $^{19}F^+$ 的电离效率，检出限 (LOD) 低至 0.043 mg/L (总量分析)。

为区分“无机氟 (F)”与“有机氟 (如氟乙酸 FAA)”，文章将阴离子交换 HPLC 与 ICP-MS/MS 在线联用：采用 PRP-X100 阴离子交换柱 (4.1 mm × 250 mm)，以 30 mM 碳酸铵 (pH 8.7) 为流动相 (等度洗脱，流速 1 mL/min)，100 μ L 进样环 — 实现 F (保留时间 3.66 min) 与 FAA (保留时间 7.11 min) 的基线分离；F 的 LOD 为 0.022 mg/L，FAA 的 LOD 为 0.11 mg/L，对含 1 mg/L F 和 FAA 的水样进行分析，回收率分别为 96% ± 11%、91% ± 6%，证明方法可用于环境样品中氟形态的定量。

此研究通过 ICP-MS/MS 的间接检测策略与 HPLC 的分离能力，为氟的“总量-形态”联合分析提供了创新方法，其核心价值体现在：

技术突破：实现 ICP-MS/MS 用于氟的非靶向形态分析，解决了传统方法“无法区分氟形态、抗干扰差”的问题，且检出限低于 IC、ISE 等常规方法；

方法学创新：“化合物无关响应”特性允许用单一标准 (F) 定量多种氟形态 (如 F、FAA)，无需针对每种有机氟制备标准品，降低分析成本，为未知有机氟化合物的筛查提供可能；

环境应用：可直接用于饮用水、土壤浸出液等环境样品中氟的总量与形态分析，例如监测饮用水中 F 是否超标、土壤中是否存在有毒有机氟 (如 FAA)，为氟污染风险评估提供可靠数据。

Fluorine-Specific Detection Using ICP-MS Helps to Identify PFAS Degradation Products in Nontargeted Analysis (利用 ICP-MS 进行氟特异性检测有助于在非靶向分析中识别全氟和多氟烷基物质的降解产物)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区 Top
期刊编号： Anal. Chem. 2021, 93, 6335–6341

安捷伦技术： 1290 HPLC-8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心使用串联四极杆电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS/MS) 的“氟特异性检测”与“保留时间定位”功能，结合高分辨电喷雾质谱 (HR-ESI-MS/MS)，建立了全氟和多氟烷基物质 (PFAS) 的非靶向分析方法，解决了复杂环境基质中 PFAS 降解产物“难识别、数据量大”的问题，成功鉴定出氟调醇 (8:2 FTOH) 在污水污泥中的降解产物。

文章围绕“8:2 FTOH 在污水污泥中的好氧生物降解”展开，通过 ICP-MS/MS 与 HR-ESI-MS/MS 的联用，完成“数据筛选-产物识别-降解路径验证”的完整研究链，污水污泥样品的 HR-ESI-MS 原始数据包含 5115 个特征峰（覆盖 74 次测量），直接分析耗时且易遗漏目标产物。通过 ICP-MS/MS 的氟特异性信号，实现多轮数据筛选：第一步：使用 MZmine 软件的自定义模块，扣除空白样品、无菌对照样品中的特征峰（如仪器背景、污泥本底有机物），将特征峰数量从 5115 降至 1028（减少 79.9%）；第二步：根据 ICP-MS/MS 检测到的 $^{138}\text{Ba}^{19}\text{F}^+$ 信号（保留时间 6.4 min），划定 6.4–7.0 min 的筛选窗口，进一步将特征峰降至 21 个（减少 98%）；第三步：结合 PFAS 的高氟含量特征（质量缺陷 0.95–0.99），最终保留 15 个特征峰（仅为原始数据的 0.3%），大幅缩小目标产物的搜索范围。

通过 HR-ESI-MS/MS 对筛选后的 15 个特征峰进行结构解析，结合文献报道的 PFAS 降解路径，明确关键产物：结合鉴定结果，验证 8:2 FTOH 的好氧降解路径为：8:2 FTOH → 8:2 FTAL（氟调醛）→ 8:2 FTCA → 8:2 FTUCA → 7:3 FTCA/PFHxA/PFOA，与此前土壤、微生物体系中的降解路径一致，证明方法的可靠性。

相较于传统非靶向分析方法（如 Kendrick 质量缺陷图），该联用方法的优势显著：

- 适用性更广：无需依赖 PFAS 的高氟含量导致的特征质量缺陷，可识别低氟取代的降解产物（如部分脱氟产物）
- 数据效率更高：从 5115 个峰降至 15 个峰，数据处理效率提升 341 倍，极大提高未知有机氟的检测效率
- 特异性更强：ICP-MS/MS 的氟特异性检测可排除非氟化合物干扰，而传统 ESI-MS 易受基质中高丰度有机物的影响，导致假阳性或假阴性

应用 ICP-MS/MS 测定土壤中的可提取有机氟 (EOF) 的总氟含量

AN 号： 5994-8361ZHCN ([点击下载全文](#))

安捷伦解读： 本文介绍了应用 ICP-MS/MS 测定可提取有机氟 (EOF) 的总氟含量的方法。该方法使用全氟辛酸 (PFOA) 作为标准物质，以 50% 甲醇 - 水溶液作为溶剂，在线添加 Ba 离子溶液和 F 离子在等离子体中生成 $[\text{BaF}]^+$ 离子团，并用 $[\text{BaF}]^+$ 离子团的含量来代表 F 离子的含量。初步结果显示，该方法对 F 的仪器检出限小于 8 ng/g。在对加标土壤样品进行固相萃取法 (SPE) 提取和净化处理后，采用所开发的方法测定最终洗脱液中的总氟含量，并采用 LC-MS/MS 法定量分析其中常见的添加的 23 种 PFAS。结果表明，所测样品中的总氟含量约为 23 种 PFAS 化合物的氟含量的 3 倍（以氟计），表明这些土壤样品中除包含所添加的 23 种 PFAS 以外，还包含大量未知的其他 EOF，这部分未经定量的 PFAS/EOF 同样可能具有较强的生物毒性，在环境健康风险评估中不容忽视。

ICP-MS/MS 方法可较为便捷地定量分析样品中 PFAS/EOF 的总氟总量，是对现有的 LC-MS/MS 法定量分析 PFAS 化合物含量以及 LC/Q-TOF 法筛查 PFAS 化合物的有效补充。该方法可以帮助环境调查人员快速筛查 EOF 含量较高的样品，有针对性地对高含量样品进行重点定性、定量分析和风险评估，从而提高环境调查与风险评估中 PFAS 的监测与评估效率。

Detection of microplastics using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) operated in single-event mode
(利用单颗粒模式下运行的电感耦合等离子体质谱法检测微塑料)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry

期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：化学 2 区

期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2020, 35, 455–460

安捷伦技术： sp-7900 ICP-MS

安捷伦解读： 文章首次将“单事件（单颗粒）模式 ICP-MS”从“金属纳米颗粒表征”拓展至“微塑料分析”，通过 $^{13}\text{C}^+$ 信号监测解决了微塑料的碳背景干扰问题，同时验证了方法在数量定量与尺寸表征上的准确性，为环境水样中微塑料的高效、常规检测提供了新方案。

试验采用注射器驱动的 MVX-7100 μL 工作站，搭配高效低 uptake 同心雾化器与小体积同轴层流喷雾室（避免过滤微塑料颗粒），以 10 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的低流速引入样品，进一步减少背景干扰并确保颗粒传输效率。选择质量电荷比 (m/z) 为 13 的碳同位素 ($^{13}\text{C}^+$) 作为微塑料的特征信号；通过超快速监测瞬态信号 (dwell time 为 100 ms)，捕捉单个微塑料颗粒进入等离子体时产生的信号尖峰，以实现微塑料的识别与分析；使用 Agilent MassHunter 工作站的“单纳米颗粒分析模块”，对信号尖峰的积分强度分布进行统计，获取微塑料的数量浓度与尺寸信息。

为模拟环境中的微塑料，选用两种球形聚苯乙烯微球作为研究对象，排除形状与材质差异对结果的干扰：

2.5 μm 镧系掺杂聚苯乙烯微球 (Fluidigm 公司)：含 $^{140/142}\text{Ce}$ 、 $^{151/153}\text{Eu}$ 、 ^{165}Ho 等稀土元素，通过对比 “ $^{13}\text{C}^+$ 监测”与 “ $^{165}\text{Ho}^+$ 监测”的信号尖峰数量，用于验证 $^{13}\text{C}^+$ 信号的准确性（通过对比 $^{165}\text{Ho}^+$ 信号）。

1 μm 非功能化聚苯乙烯微球 (Bangs Laboratories 公司)：基于“球形颗粒体积与碳含量成正比，碳含量与 $^{13}\text{C}^+$ 积分强度成正比”的假设，验证尺寸与信号的线性关系，且通过扫描电子显微镜 (SEM) 确认其球形度与 1 μm 的标称直径，作为尺寸对比基准。结果表面，两种微球的“最常出现积分强度比”为 15.4 ± 1.4 ，与理论体积比几乎一致，证明 ICP-MS 可通过 $^{13}\text{C}^+$ 信号强度反推微塑料尺寸，且大颗粒 (2.5 μm) 在等离子体中可完全电离，无信号低估问题。

方法的优势与应用潜力

功能实现：单事件（单颗粒）模式 ICP-MS 可同时获取微塑料的三大关键信息 — 颗粒数量浓度 (个 /mL)、质量浓度 (mg/L)、尺寸分布 (基于信号强度分布)。

实用性：无需改造现有 ICP-MS 硬件（仅需调整 dwell time 与数据处理方法），且多数环境检测实验室已配备 ICP-MS，该方法易推广至常规检测。

待优化方向：需进一步降低碳背景（如减少大气 CO_2 干扰）、拓展检测尺寸范围（目前仅验证 1–2.5 μm ，需覆盖更小微塑料或纳米塑料），并开发校准标准与参比样品，实现方法标准化。

Quantifying the effects of chlorine disinfection on microplastics by time-resolved inductively coupled plasma-mass spectrometry
(通过时间分辨电感耦合等离子体质谱法定量氯消毒对微塑料的影响)

期刊信息： 期刊： Science of the Total Environment
期刊介绍： 最新影响因子 8 最新中科院分区：环境科学与生态学 2 区 Top
期刊编号： Science of the Total Environment 954 (2024) 176132

安捷伦技术： TRA-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的时间分辨分析模式 (Time-Resolved Analysis, TRA 模式)，聚焦水处理过程中氯消毒对微塑料 (MPs) 的影响，开展微塑料氯含量定量、消毒条件优化及毒性评估工作。

以酒石酸为碳标准、氯化钠为氯标准，建立“信号强度 - 元素质量”校准曲线；通过显微镜人工计数与 TRA-ICP-MS 碳信号峰数量对比，验证微塑料的传输效率 (1.35%–4.50%)，确保粒子检测的重现性；通过 $^{35}\text{Cl}^1\text{H}_2$ 瞬态信号强度，结合校准曲线计算单个微塑料的“氯质量 (Cl mass)” (单位:pg)，同时通过“氯信号峰数量/碳信号峰数量 $\times 100\%$ ”定义“氯结合率 (% Cl/C)”，反映微塑料被氯攻击的易感性；通过 $^{12}\text{C}^1\text{H}$ 信号强度反推微塑料的碳质量，再基于碳质量与球形体积的线性关系 (调整后 $R^2 = 0.9879$)，间接监测消毒过程中微塑料的尺寸变化；TRA 模式可在 60 秒内检测 300–900 个微塑料粒子，且氯的质量检出限低至 2.39×10^{-9} pg，远超传统表征技术 (如 EDX、FTIR) 的灵敏度，可捕捉低氯剂量 (如 1 mg Cl_2/L) 下的微塑料氯含量变化。

以 5 μm PS 微塑料为模型 (无天然氯，且是水处理中常见类型)，通过 TRA-ICP-MS 量化不同消毒条件对微塑料氯含量的影响：未经过 UV 预处理的 PS 微塑料 (NPS) 对氯抵抗力强 (% Cl/C 仅 1.78%)，而经 UV (290–390 nm, 1.25 mW/cm²；254 nm, 2.66 mW/cm²) 照射 8 小时后，PS 表面因氧化生成羰基 (羰基指数从 0.705 升至 0.988)，氯结合率 (% Cl/C) 提升至 80% 以上，且氯质量在 8 小时内达到饱和 (约 2.25 pg)，证明 UV 预处理通过破坏聚合物骨架增强微塑料与氯的反应；当 pH 从 5.0 升至 9.5 时，PS 的氯结合率与氯质量在逐渐降低，原因是氯在水中以“次氯酸 (HOCl, 强亲电试剂)”和“次氯酸根 (OCl⁻, 弱亲电试剂)”存在，中性/弱酸性条件下 HOCl 占比更高，更易与微塑料反应；实际氯剂量下的高风险：市政污水处理常用氯剂量 (10 mg Cl_2/L) 下，约 50% 的 PS 微塑料被氯化，且氯质量 (1.86 pg) 与极端条件 (50–100 mg Cl_2/L) 下的氯质量 (2.11–2.12 pg) 相当；即使是饮用水允许的残留氯剂量 (1 mg Cl_2/L)，仍能检测到 4.64% 的氯结合率，揭示水处理中微塑料氯化的潜在风险被低估。

通过 MTT 法测试氯化微塑料对人肺上皮细胞 (A549) 和结肠上皮细胞 (Caco-2) 的毒性，结合 TRA-ICP-MS 的氯含量数据，发现：未氯化的 UV-PS 对 A549 细胞活力无显著影响 (106.1%)，但经 100 mg Cl_2/L 处理后，A549 和 Caco-2 细胞活力分别降至 85% 和 50% 以下，原因是氯附着改变微塑料表面性质，且可能伴随消毒副产物 (DBPs) 吸附；三种微塑料 (PA、PET、PS) 中，氯化 PA 的细胞毒性最强 (A549 细胞活力降至 50%)，因 PA 中的脂肪胺基团与 HOCl 反应活性高于 PET 和 PS 的含氧基团，TRA-ICP-MS 也检测到 PA 的氯信号强度 (6784 counts) 远高于 PET (2052 counts) 和 PS (1357 counts)，证明氯含量与毒性正相关。

文章首次证实 TRA-ICP-MS 是量化微塑料氯含量的高效工具 — 不仅能实现低氯剂量下的高灵敏检测，还能提供“氯质量 + 氯结合率 + 粒子数量 + 尺寸关联”的多维度信息，弥补传统技术的局限性。同时，研究揭示：水处理中的 UV- 氯联合消毒、中性 pH 条件会显著促进微塑料氯化，且氯化微塑料对人体细胞的毒性显著升高，为评估水处理系统中微塑料的环境归趋与健康风险提供了关键技术支撑和数据依据。

Tracking the translocation of nanoplastics from soil to plant: Comparison of different analytical techniques (追踪纳米塑料从土壤向植物的转移过程: 不同分析技术的比较)

期刊信息： 期刊： Journal of Hazardous Materials
期刊介绍： 最新影响因子 11.3 最新中科院分区：环境科学与生态学 1 区 Top
期刊编号： Journal of Hazardous Materials 488 (2025) 137357

安捷伦技术： sp-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的“痕量金属定量”与“单颗粒分析 (spICP-MS)”功能，针对“纳米塑料难以直接检测”的问题，研究合成“钯掺杂聚苯乙烯纳米塑料 (Pd-NPs)”，以 Pd 作为示踪元素。通过常规 ICP-MS 检测植物组织（根、茎）中 Pd 的含量（检出限低至 0.002 µg/L），再根据 Pd 在纳米塑料中的质量占比 (0.7%)，反向计算纳米塑料的质量浓度与颗粒浓度（如根中 Pd-NPs 颗粒浓度为 1.52×10^{11} 颗粒 /g，茎中为 1.09×10^{11} 颗粒 /g）。该法无需直接检测纳米塑料本身，通过金属 tracer 间接定量，规避植物基质中有机碳、生物大分子对纳米塑料检测的干扰。

研究系统对比了共聚焦显微镜、SEM-EDX、µ-CT、Py-GC-MS 与 ICP-MS 的性能，强调了整合多种分析方法以实现植物系统 NPs 动态综合评估的必要性。

此研究通过 ICP-MS 的示踪定量与单颗粒分析功能，为纳米塑料环境行为研究提供了关键方法学突破：

技术层面：首次证实“金属掺杂 + ICP-MS”可作为植物中纳米塑料定量的可靠方法，检出限、准确性均优于现有技术，为后续农田生态系统纳米塑料迁移研究提供范式；

科学层面：明确小麦对纳米塑料的吸收效率 (0.01%) 与转运能力 (75.74% 向茎转运)，揭示纳米塑料即使低积累仍可能导致植物生物量下降，为评估纳米塑料对粮食安全的风险提供定量数据；

应用层面：提出“多技术联用”策略（如 spICP-MS 分析粒径 + 常规 ICP-MS 定量 + SEM 验证分布），可克服单一技术的局限（如成像技术无法定量、Py-GC-MS 检出限高），为复杂环境基质中纳米塑料的分析提供参考。

Laser Ablation for Nondestructive Sampling of Microplastics in Single-Particle ICP-Mass Spectrometry (单颗粒电感耦合等离子体质谱法中用于非破坏性微塑料采样的激光消融技术)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区 Top
期刊编号： Anal. Chem. 2023, 95, 50, 18579–18586

安捷伦技术： LA-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的单粒子模式 (Single-Particle Mode, 即 spICP-MS)，结合激光剥蚀 (LA) 技术，开展微塑料 (MPs) 的无损采样与分析工作。

通过监测单个粒子进入等离子体 (ICP) 后产生的瞬态信号，实现对粒子的“逐个检测”——不仅能定量粒子数量浓度，还能通过信号强度反推粒子大小（等效球直径），尤其适合微纳米尺度颗粒的分析：聚焦碳元素的同位素 $^{13}\text{C}^+$ （微塑料的主要组成元素），通过捕捉单个微塑料粒子进入 ICP 后产生的 $^{13}\text{C}^+$ 瞬态峰，区分“单个粒子事件”与背景信号；利用 $^{13}\text{C}^+$ 信号强度与微塑料中碳的绝对质量的线性关系，计算粒子的质量与等效大小，同时统计粒子数量。

文章针对传统 spICP-MS 分析微塑料的痛点（如样品需悬浮、碳背景高、团聚粒子干扰），提出“激光剥蚀 (LA) 无损采样 + spICP-MS 检测”的联用方案：

将 LA 剥蚀后微塑料的 $^{13}\text{C}^+$ 瞬态峰 (LA-spICP-MS) 与传统溶液进样 (spICP-MS) 的 $^{13}\text{C}^+$ 峰对比，二者峰形、峰宽完全一致（均约 0.5 ms），证明 LA 能将微塑料“完整剥蚀并输送至 ICP”；测试 0.10–6.00 J · cm⁻² 范围内的激光能量，发现当能量密度 ≥ 0.25 J · cm⁻² 时， $^{13}\text{C}^+$ 信号强度、峰宽均保持稳定，且微塑料数量检测结果恒定（107 ± 8 个），说明该能量范围下微塑料无破碎，实现“无损采样”。

对“2-7 个微塑料团聚体”进行单脉冲 LA 分析，发现激光冲击波与传输管路能将团聚体分离， $^{13}\text{C}^+$ 峰数量与团聚体中粒子数完全匹配（如 7 个粒子团聚体对应 7 个 $^{13}\text{C}^+$ 峰），实现单个团聚粒子的区分；对比两种滤膜（碳基 PVDF 滤膜、无碳玻璃纤维 GMF 滤膜），发现 GMF 滤膜无碳背景干扰（PVDF 滤膜会被 LA 剥蚀产生额外 $^{13}\text{C}^+$ 信号），更适合环境样品中微塑料的富集与采样。

对“2、3、4、5 μm PS 混合悬浮液”进行 LA-splCP-MS 分析，通过 $^{13}\text{C}^+$ 信号分布可区分 4 种尺寸的微塑料（4 个独立正态分布， $R^2 = 1.0000$ ），证明方法能解决多尺寸微塑料的同时检测；将微塑料沉积于 GMF 滤膜（模拟环境样品的滤膜富集过程），LA 剥蚀后仍能稳定检测到 $^{13}\text{C}^+$ 信号，且背景低、峰形尖锐，为实际环境样品（如地表水、土壤）中微塑料的分析提供可行方案。

文章最终建立了一套“无损、高分辨、宽适用”的微塑料分析方法 — 通过 ICP-MS 的单粒子模式实现微塑料的“逐个定量与定径”，结合 LA 的无损采样解决传统溶液进样的痛点，最终实现 2-20 μm 范围内 PS、PMMA、PVC 等微塑料的准确分析，为环境中微塑料（尤其是易被忽视的 1-10 μm 微塑料）的检测提供了新技术路径。

Efficient Interface for Online Coupling of Capillary Electrophoresis with Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry and Its Application in Simultaneous Speciation Analysis of Arsenic and Selenium (毛细管电泳与电感耦合等离子体质谱联用的高效接口及其在砷和硒形态同时分析中的应用)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry

期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区 Top

期刊编号： dx.doi.org/10.1021/ac501347d | Anal. Chem. 2014, 86, 8167 – 8175

安捷伦技术： CE-7500ce ICP-MS

安捷伦解读： 该文章核心使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的“高灵敏元素特异性检测”与“多同位素同时监测”功能，结合毛细管电泳 (CE) 的高效分离能力，构建了“CE-ICP-MS 在线联用系统”，通过“时间分辨分析模式 (time-resolved analysis)”同时监测 As 和 Se 的特征同位素，实现两种元素共 11 种化学形态的同步检测 — 包括 6 种 As 形态（亚砷酸盐 As(III)、砷酸盐 As(V)、一甲基胂酸 MMA、二甲基胂酸 DMA、砷甜菜碱 AsB、砷胆碱 AsC）和 5 种 Se 形态（亚硒酸盐 Se(IV)、硒酸盐 Se(VI)、硒代半胱氨酸 SeCys、硒代蛋氨酸 SeMet、甲基硒代半胱氨酸 MeSeCys）；在鞘流液中加入 100 $\mu\text{g/L}$ 铑 (Rh) 标准溶液作为内标，通过 103 Rh 信号校正样品传输过程中的波动，减少基质效应和仪器漂移对定量结果的影响；实现了砷 (As) 和硒 (Se) 不同化学形态的同步分离与精准定量。

为适配 CE 的“低流量 (nL- $\mu\text{L}/\text{min}$ 级)、低样品量”特性，研究对 ICP-MS 及联用接口进行针对性优化：采用 CE-ESI-MS 喷雾器作为雾化器，将其安装在自制 DIHEN 雾室上，CE 毛细管末端伸出喷雾器尖端 0.1 mm，鞘流液（含内标的 6% 甲醇溶液）在毛细管与喷雾器间隙中稳定流动（流量 4 $\mu\text{L}/\text{min}$ ），与 CE 流出液混合后直接雾化，无额外传输管路，死体积降至最低；最终实现 As 形态的检出限 (3σ) 低至 0.11–0.37 $\mu\text{g/L}$ ，Se 形态为 1.33–2.31 $\mu\text{g/L}$ ，满足环境和生物样品中痕量 As、Se 形态的检测需求，解决了传统联用系统中死体积大、灵敏度低的问题。

将建立的 CE-ICP-MS 方法应用于多种基质样品，如环境水样、生物样品、高基质样品（尿液）等，并进行加标回收测试，加标回收率 88.9%–110.2%，证明方法的准确性及适用性。

研究通过 CE 与 ICP-MS 的高效联用，实现了 As、Se 形态分析的三大突破：

技术层面：首次构建“CE-ESI-MS 喷雾器 + DIHEN 雾室”接口，解决传统联用系统的死体积和稀释问题，使分离效率和灵敏度同步提升；

方法层面：建立 9 分钟内同步分离 11 种 As/Se 形态的方法，检出限、重现性均优于现有文献报道，适用于痕量、低样品量的环境和生物样品；

应用层面：为砷硒污染评估、生物代谢研究（如 As-Se 拮抗作用）提供可靠的分析工具，例如通过形态分析可区分“高毒性无机 As”和“低毒性有机 As”，更精准评估环境风险。

Complexation of europium and uranium by humic acids analyzed by capillary electrophoresis-inductively coupled plasma mass spectrometry (通过毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱法分析腐殖酸对铕和铀的络合作用)

期刊信息： 期刊： Electrophoresis
期刊介绍： 最新影响因子 2.5 最新中科院分区：生物学 3 区
期刊编号： Electrophoresis 2012, 33, 1482-1487

安捷伦技术： CE-7500cx ICP-MS

安捷伦解读： 该文章核心使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 的“元素特异性检测”“同位素选择性监测”及“痕量分析”功能，结合毛细管电泳 (CE) 的高效分离能力，构建“CE-ICP-MS 联用系统”，研究腐殖酸 (HA，溶解有机质 DOM 的模型物质) 与铕 (Eu，镧的同源物)、铀 (U，核燃料主要成分) 的络合行为，揭示两种金属离子在环境中的迁移潜力差异。

通过“时间分辨分析模式”同时监测 Eu 和 U 的特征同位素，实现两种金属“游离态 - 络合态”的同步区分与定量 — 监测 ¹⁵³Eu (丰度 52.25%，无干扰) 和 ²³⁸U (丰度 99.3%，核素特异性强)，检出限分别低至 100 ppt (Eu) 和 50 ppt (U)，满足痕量放射性金属的分析需求。研究通过“碘标记法”将 HA 的芳香烃环卤化 (引入 ¹²⁷I 作为 ICP-MS 可识别的标记物)，形成碘代 HA (I-AHA)。通过监测 ¹²⁷I 信号，可定位 HA 在电泳图中的迁移位置，进而匹配“HA 络合态金属”的信号峰 (避免将游离态金属与络合态金属混淆)。在补充液中加入 4 ng/L 钬 (Ho) 作为内标，通过 ¹⁶⁵Ho 信号校正样品传输波动，提升定量准确性；加入 1- 溴丙烷 (监测 ⁸¹Br 信号) 作为中性标记物，区分电泳图中“正电荷物种” (迁移快于 EOF 标记) 和“负电荷物种” (迁移慢于 EOF 标记)，辅助判断金属形态的电荷性质；采用“MicroMist 50 μL 雾化器 + 朱砂旋流雾室”作为自制接口，CE 毛细管末端插入雾化器，通过补充液 (含内标的缓冲液) 提升总流量，确保雾化稳定，同时减少死体积 (避免峰展宽)。

对比“未标记 HA”与“碘标记 HA (I-AHA)”的络合实验，发现两者的电泳峰迁移时间、峰形完全一致，证明碘标记不影响 HA 的络合能力，方法可靠；结果表明，HA 对 Eu (Am 的模拟物) 的强络合能力会显著促进其在环境中的迁移 (避免 Eu 被土壤吸附)，而 U 与 HA 的弱络合则使其迁移性较弱 — 该结论为“放射性废物地质处置的安全性评估”提供关键数据。

使用配备双池耦合碰撞反应系统和不连续进样的 ICP-MS/MS 分析环境水样

AN 号： 5994-9125ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 目前，环境检测行业竞争日趋激烈，实验室亟需在保障数据质量的前提下提升检测效率。本研究使用配备双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 的 Agilent 9500 ICP-MS/MS，由 Agilent OpenLab ICP-MS 软件控制，在单一池气体模式 — 高性能氦气碰撞模式 (AHM) 下运行；并配备集成式 AVS MS 不连续进样器，在常规环境分析中表现出优异的性能。所开发的方法简化了分析工作流程，减少了仪器维护需求，并提供了可靠、可重复的结果，提高了整体运营效率。

在 140 min 内，完成 140 多个样品 (包括实际环境水样) 的分析，且无需使用基质匹配校准标样，也无需重新校准。与同类单四极杆 ICP-MS 方法相比，9500 ICP-MS/MS 工作流程的样品通量提高了 50%，从而大幅提升了整体效率。

对水、土壤和沉积物 CRM 的多次检测结果证实了方法的准确度。单个样品的分析耗时不足 1 分钟，回收率在 100% ± 10% 范围内，表明方法兼顾高通量分析与出色的准确度。长期稳定性测试结果表明，配备 UHMI 和 AVS MS 的 9500 ICP-MS/MS 在高 TDS 样品的分析中具有稳定、可靠的性能，在超过两小时的连续分析过程中未出现内标不合格的情况。

该方法能够实现快速分析和高效的干扰消除，且能够在高基质样品长时间连续分析中保持稳健、可靠的性能，完全满足要求严苛的环境检测实验室的核心性能需求。

利用 ICP-MS 结合先进样品引入装置分析土壤和沉积物

AN 号： 5994-9126ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本研究使用配备 UHMI 和可选 AVS MS 的 Agilent 9500 ICP-MS/MS，按照 EPA 方法 6020B 对沉积物样品进行了分析。该系统配备先进的样品引入组件，包括 Mira Mist 雾化器和在线颗粒过滤器。

Mira Mist 雾化器搭配在线过滤器，可用于直接分析沉积物消解液，无需采用专门的过滤步骤，从而缩短样品前处理时间并降低消耗品成本。同时，该配置能够大幅降低样品引入堵塞的风险，支持 ICP-MS/MS 用于对复杂的环境样品进行稳健、可靠的长期分析。

总体而言，配备 Mira Mist 雾化器和在线颗粒过滤器的 9500 ICP-MS/MS 展现出优异的检测性能：大多数元素的检出限可达到低 ng/L (ppt) 级；对易残留元素的冲洗效率与标准样品引入系统相同或接近（无论是否安装过滤器，样品引入时间均相同）；ISTD 和 CCV 的回收率在 EPA 方法 6020B 规定的限值范围内，证明该方法在超过 8 小时的连续测量中具有出色的稳健性和重现性；在五种环境 CRM、基质加标样品和实际沉积物加标样品中，所有认证元素的回收率均在 ±10% 偏差范围内，证明 AHM 和空气反应模式能够有效控制干扰。研究表明，配备 Mira Mist 雾化器和在线颗粒过滤器的 9500 ICP-MS/MS 能够提高对复杂沉积物消解液的样品前处理效率和分析性能。

使用配备创新碰撞/反应池的 ICP-MS 对土壤和沉积物进行快速可靠分析

AN 号： 5994-9128ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本研究使用 Agilent 9500 ICP-MS/MS，配备 Agilent OpenLab ICP-MS 软件内置的 EPA 6020B 预置方法，并选择 UHMI-4 等离子体条件，分析了五种环境 CRM 和基质加标样品。结果表明，所有认证元素的回收率均在 100% ± 10% 范围内。

Agilent 9500 ICP-MS/MS 具有耐受基质的等离子体（低 CeO/Ce 比）、UHMI 和 DCS，可有效解决高基质样品分析面临的挑战(包括信号漂移、离子抑制和质谱干扰等)，从而提供优化的分析工作流程。采用 DCS 的高性能氦气碰撞模式 (AHM) 和空气反应模式，结合更短的积分时间，可大幅提高方法效率，使每个样品的分析时间缩短 5–10 s。AHM 取代了传统的无气体模式、氦气 (He) 碰撞模式和高能氦气 (HEHe) 模式，具有良好的通用性；空气反应模式则可直接取用实验室空气中的氧气，无需额外配备氧气瓶。9500 在 AHM 和空气反应模式下仍可保持超高灵敏度，大幅减少背景信号干扰。

研究表明，配备独特双池耦合碰撞反应系统 (DCS) 和可选 AVS MS 不连续进样系统的 Agilent 9500 ICP-MS/MS，使分析人员能够快速设置仪器的操作参数，确保不同分析人员获得的检测结果之间的稳定性。该仪器系统是对土壤和沉积物样品进行高通量、多元素分析的理想选择。

利用 ICP-MS/MS 和集成式快速阀进样系统直接分析海水

AN 号： 5994-8988ZHCHN (点击下载全文)

安捷伦解读： 本文采用 Agilent 9500 ICP-MS/MS，搭配 AVS 集成快速阀进样系统，直接进样分析海水中的 26 种痕量元素。该方法克服了海水基质中的高含量的钠、镁和氯所带来的电离抑制以及多原子质谱干扰难题，适用于海洋环境监测与 EPA 200.8 质控规范。

9500 ICP-MS/MS 搭载 DCS 双池耦合碰撞反应系统，提供以下两种可自动切换的干扰消除模式：

1. AHM 高性能氦碰撞模式： 依靠 KED 动能歧视 + CID 碰撞解离，可消除绝大多数多原子干扰，使轻、重元素均可获得 ppt 级检出限。

2. 空气反应模式： 通入微量空气，实现 MS/MS 质量转移，有针对性地解决了 V、Cu、As、Zn 和 Se 等氯 / 氫基强干扰元素的分析难题。9500 ICP-MS/MS 采用 AVS MS 集成式快速阀进样系统，可实现在线反向自动稀释，省去人工稀释、基体分离等繁琐的样品前处理步骤，大幅降低试剂污染风险；且单个样品检测仅需 140 秒，显著提升了样品分析效率。

长期稳定性是该仪器的突出优势。将未经稀释的海水连续进样 100 次，不间断检测 7 小时，所得内标的回收率维持在 80%–120% 范围内。另外，CCV 校准验证偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。盐类在锥口沉积所产生的信号衰减得到有效抑制，无需频繁清洁接口锥，大幅提升了实验室样品处理效率。采用 NMIJ 和 NMIA 海水标准物质以及实际海水进行加标实验。结果表明，所有元素的加标回收率均处于 90%–110% 范围内，准确度完全符合环境检测法规要求。

整体而言，9500 ICP-MS/MS 凭借双模式干扰消除、在线自动稀释和稳定运行这三大核心优势，可兼顾检测灵敏度、分析效率与数据可靠性，是海洋环境实验室对高盐海水中的痕量元素进行高通量准确检测的优选仪器系统。

Ultra-depleted mantle source of basalts from the South Pole–Aitken basin (南极—艾特肯盆地玄武岩的超贫化地幔来源)

期刊信息： 期刊： Nature

期刊介绍： 最新影响因子 48.5 最新中科院分区：综合性期刊 1 区 Top

期刊编号： Nature | Vol 643 | 10 July 2025 | 371

安捷伦技术： LA-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 在这篇关于嫦娥六号 (CE6) 月球样品的研究中，电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 主要通过激光剥蚀 - 电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术发挥功能，核心工作是对月球玄武岩样品进行痕量元素分析。

研究中使用的是 Agilent 8900 ICP-MS 仪器，搭配高重复频率的 Genesis GEO 飞秒激光剥蚀系统，属于“激光剥蚀 + ICP-MS”的联用技术。通过激光剥蚀样品（月球玄武岩玻璃熔片），将固体样品转化为气溶胶颗粒；气溶胶被引入 ICP-MS 中，通过等离子体电离产生带电离子，再通过质谱仪的质量分析器分离不同质荷比的离子，最终检测各元素的信号强度，实现痕量元素的定性与定量分析。通过优化气体流量，使 ThO/Th 比值低于 0.3%、U/Th 比值维持在 0.95–1.05，确保离子化效率和检测稳定性；

该技术的核心应用是分析 CE6 玄武岩样品的痕量元素浓度，为研究月球幔源性质、岩浆演化提供关键数据：将 4 个质量 30 mg 的玄武岩碎片与超纯硼酸锂按 1:100 比例混合熔融，制成玻璃熔片（用于后续激光剥蚀）；激光剥蚀斑点直径 100 μm 、长度 1000 μm ，频率 1 Hz，剥蚀时间 45s，同时进行 25 s 的气体空白测量和 25 s 的洗出时间；以 NIST SRM 612 玻璃为外部标准，Al 为内标，确保分析准确性；测定玄武岩中稀土元素（REEs，如 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Yb、Lu 等）、稀有气体元素及其他痕量元素（如 Rb、Sr、Nb、Th、U 等）的浓度；痕量元素测量偏差控制在 10% 以内，相对标准偏差 (RSD) $\leq 10\%$ ，符合地质样品痕量元素分析的精度要求。

综上，ICP-MS 通过 LA-ICP-MS 联用技术，核心完成了 CE6 月球玄武岩痕量元素的高精度测定。揭示 CE6 玄武岩的痕量元素分布特征（如中稀土富集、重稀土趋势陡峭、轻微负 Eu 异常）；与阿波罗 (Apollo)、嫦娥五号 (CE5) 月球样品的痕量元素数据对比，推断 CE6 玄武岩的幔源属性；为岩浆过程模拟（如部分熔融、结晶分异）提供基础数据，验证月球南极 - 艾特肯盆地 (SPA) 幔源的超亏损特征及形成机制。为解析月球远侧幔源性质、早期壳幔分异及月球不对称性起源提供了关键的地球化学数据支撑。

Tandem Elemental Analysis of Chang'e-6 Lunar Soil Samples Using X-ray Fluorescence and Femtosecond Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (利用 X 射线荧光和飞秒激光烧蚀电感耦合等离子体质谱法对嫦娥六号月球土壤样本进行串联元素分析)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry

期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区 Top

期刊编号： Anal. Chem. 2025, 97, 25, 12936–12939

安捷伦技术： LA-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 本研究采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 与点阵飞秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (fsLA-ICP-MS) 联用技术，对两份 CE6 月壤样品中的 10 种主量元素、1 种次量元素及 31 种微量元素进行了分析。仅需 30 mg CE6 月壤样品，将其与硼酸锂熔剂（熔剂与样品比例为 100:1）熔融，即可制备成高度稀释状态的玻璃熔片。对于使用 XRF 进行主量元素分析，采用了改进的硼酸锂玻璃熔片制备方法，无需使用脱模剂，即可有效避免溴 (Br) 元素对锰 (Mn) 元素的干扰。针对高稀释比玻璃熔片进行 ICP-MS 微量元素分析所面临的挑战，利用点阵飞秒激光与电感耦合等离子体质谱联用 fsLA-ICP-MS，对样品进行大面积线扫描，以增加采样量，能有效解决因高倍稀释后浓度较低导致 ICP-MS 测量精确度和准确度降低的问题。这种多种测试方法联用的元素分析技术能够仅使用一份样品即可测量主量和痕量元素，制备方法较为快速简便，可有效处理难溶相，且显著减少珍贵样品的用量，提高样品前处理效率。

对于 X 射线荧光分析而言，采用 30 mg 样品的 XRF 分析技术，在制备玻璃融片时省去了释放剂，在不使用脱模剂的同时，避免了溴 (NH₄Br) 对锰测定造成的干扰。采用 GenesisGEO 点阵飞秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (fsLA-ICP-MS) 技术，通过 GenesisGEO 点阵飞秒激光剥蚀系统的超大光斑 (300 μm) 持续线扫描分析技术对锂硼酸盐玻璃融片中的微量元素进行分析。由于 GenesisGEO 点阵飞秒激光峰值能量高，对高透明度的硼酸锂融片具有出色的剥蚀效果，剥蚀过程无明显热熔融影响，剥蚀坑相对平底，且元素分馏效应或基体效应的影响相对较小。

通过 GenesisGEO 点阵飞秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (fsLA-ICP-MS) 方法分析得到的数据结果按照 IGCP 的标准进行检验，主量元素和微量元素的 ΔlogC 值分别小于 ±0.05 和 ±0.15，均符合严格的标准要求。这证明所提出的方法具有极高的准确性和可靠性。

该技术为相关领域的研究提供了有价值的指导，并有望应用于未来小行星和火星采样返回样品的分析。

Fluorine mapping via LA-ICP-MS/MS: a proof of concept for biological and geological specimens (通过激光-电感耦合等离子体串联质谱技术进行氟元素分析: 在生物和地质样本中的应用概念验证)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry

期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：化学 2 区

期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2023,38, 1661-1667

安捷伦技术： LA-8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 该文章核心利用电感耦合等离子体质谱-串联质谱 (ICP-MS/MS) 的串联四极杆 (MS/MS) 模式与激光剥蚀 (LA) 联用技术，解决氟 (F) 因第一电离能高 (17.42 eV) 导致的 ICP-MS 直接检测难题，实现生物和地质样品中氟的空间分辨成像 (mapping)。

向等离子体中引入 100 µg/mL 的 Ba²⁺ 溶液 (作为修饰剂)，利用 Ba²⁺ 与样品中 F⁻ 在等离子体中反应生成 BaF⁺ 多原子离子 (而非直接检测 F⁺)，通过监测 BaF⁺ 的信号 ($m/z = 157$) 间接定量氟含量，解决 F⁺ 离子产率低的问题。将 LA 系统 (193 nm 准分子激光) 与 ICP-MS/MS 耦合，通过激光逐点 / 线扫描样品表面，生成的干燥气溶胶与 Ba²⁺ 湿气溶胶混合后进入等离子体，结合信号的空间位置与 BaF⁺ 强度，实现氟在样品中的微米级空间分布成像 (空间分辨率可按需调整：65 µm 或 150 µm)。由于缺乏商用 LA-ICP-MS 氟标准品，自行制备明胶基氟标准品 (5 个浓度水平：41.2–977 µg/g)，通过燃烧离子色谱 (CIC) 准确定值 (回收率 94.9%, $R^2 = 0.9986$)，用于建立 “BaF⁺ 信号强度 - 氟浓度” 校准曲线 ($R^2 = 0.9999$)，并计算方法检出限 (LOD) 与定量限 (LOQ)：空间分辨率 65 µm 时：LOD = 2.7 µg/g，LOQ = 9.0 µg/g；空间分辨率 150 µm 时：LOD 可达 ng/g 级别。

选择 “乳牙 (8 岁儿童)” 和 “含汞合金填充物的智齿 (57 岁成人)” 作为生物样品，分析氟的分布规律：智齿样品中氟主要富集在牙齿表面 (牙釉质) 和内部根管附近；乳牙样品中氟在牙表面浓度最高，且可观察到一条 “氟线” — 与文献 (LIBS 技术) 结果一致，对应 “新生儿线” (区分产前 / 产后氟暴露，产后氟暴露水平更高)，证明方法可用于生物样品中氟的生理过程溯源。

选择苏格兰下泥盆纪 Rhynie 燧石 (含化石植物与黏土矿物，受热泉活动影响) 作为地质样品，探究氟的地质分布特征：检测 Zn、Fe、Cu (黏土矿物特征元素) 与氟的分布，发现氟与黏土矿物高度共定位 (黏土矿物通过阴离子取代吸附氟)；硅化植物化石 (样品中大型圆形结构) 几乎不含氟，而黏土基质 (样品中白色粉笔状区域) 氟含量显著升高 — 符合热泉环境中 “氟随硅质沉积进入黏土矿物” 的地质过程，为氟的地质归趋研究提供直接空间证据。为后续 “氟与其他微量元素共定位分析” (如地质找矿、生物代谢研究) 提供技术基础，仅需开发基质匹配标准品即可实现绝对定量。

4200 微波等离子体原子发射光谱仪 (MP-AES) 测定地质样品中的常量和微量元素

AN 号： 5991-3772CHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 这篇应用简报中，Agilent 4200 MP-AES 利用自身的硬件配置与软件校正功能，完成了地质样品中常量和微量元素的准确测定工作。

仪器配备连续波长覆盖的检测器和先进微波腔、炬管，能够应对高溶解态固体含量的地质样品。实现从 ppm 级痕量元素到百分水平常量元素的宽范围检测，无需频繁稀释样品。针对 Ag 328.068 nm 波长处的 Cu、Ti 多谱线干扰，采用干扰元素校正 (IEC)，通过内置软件生成校正因子，完成干扰消除。采用快速线性干扰校正 (FLIC)，校正 Al、Ti、La、Sr 等元素对 Zn、Cu、Lu 等分析物的光谱干扰，保证检测准确性。选择镱 (Lu) 作为内标元素，利用内标法抵消分析过程中的基体效应和仪器波动影响。确保校准曲线的相关系数大于 0.999，拟合误差小于 10%。搭配 Agilent 自动进样器，支持无人值守运行，尤其适合偏远地区的样品分析。使用氮气作为气源，无需危险的乙炔气体，提升操作安全性，同时降低运行成本。运用上述功能实现对地质标准参考物质中 Ag、Cu、Ni、Pb、Zn 元素的精准测定，所有元素的回收率均在 92%~99% 之间，且方法检测限满足地质样品从痕量到常量的分析需求，验证了该仪器替代火焰原子吸收光谱仪 (FAAS) 的可行性。

使用 ICP-MS/MS 在 MS/MS 模式下消除 ¹⁷⁶Yb 和 ¹⁷⁶Lu 对 ¹⁷⁶Hf 的干扰以实现准确的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 同位素比分析

AN 号： 5991-6787ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 这篇文章借助 ICP-MS/MS 的 MS/MS 模式，搭配碰撞 / 反应池与氨气反应气体，消除了 ¹⁷⁶Lu 和 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的同质异位素干扰，实现了 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 同位素比的准确分析。

同位素地质年代学是一种年代测定技术，其利用一种元素的两种同位素丰度差异来确定岩石或矿物的年龄。同位素丰度的变化可能由同位素（质量）分馏或放射性衰变引起；在各种情况下，该比值均可用作地质时钟，估计矿物形成的时间。Hf 在变生矿物（如锆石、磷钇矿、黑稀金矿等）中的迁移率低于铅（Pb），因此可替代 Pb/Pb 或 Pb/U 比值用于对这些矿物进行年代测定。铅 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 同位素比分析有助于深入了解矿物在其形成 / 变形过程中经历的不同地质事件和过程。

¹⁷⁶Hf 易受 ¹⁷⁶Lu、¹⁷⁶Yb 同质异位素干扰，常规高分辨率扇形磁场 ICP-MS 难以分离。研究采用 MS/MS 模式，利用前置四极杆质量过滤器 Q1 筛选目标离子，仅允许 m/z 176 的离子进入反应池。以氨气为反应气体，使 ¹⁷⁶Hf 生成特征氨簇离子 ¹⁷⁶Hf(NH)(NH₂)(NH₃)₃⁺，其质荷比变为 258。¹⁷⁶Lu 和 ¹⁷⁶Yb 不易与氨气反应，通过四极杆 Q2 筛选 m/z 258 的离子，实现干扰分离。为模拟实际样品分析，引入几种潜在的干扰物质来源以评估是否产生偏差或造成新的干扰。MS/MS 模式下测得的同位素比偏差极小，数据准确可靠。

使用反应气体进行化学分离提供了一种替代质量分离的强大技术，能够解决商业化高分辨率 SF-ICP-MS 在最高分辨率下仍无法解决的同质异位素干扰问题。此外，相同的池气体和 MS/MS 方法也可成功应用于采用激光剥蚀（LA-ICP-MS/MS）的样品分析中。

利用 ICP-MS/MS 在质量转移模式下测量岩石中的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值

AN 号： 5994-2019ZHCN (点击下载全文)

安捷伦解读： 这篇文章使用了 Agilent 8900 ICP-MS/MS 的质量转移模式，核心工作是在无需预分离 ⁸⁷Rb 和 ⁸⁷Sr 的前提下，准确测定岩石中的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值。

对比 Sr 纯化与未纯化的标准物质分析结果，证实纯化步骤对测定无显著影响。使用 ICP-MS/MS 质量转移方法测定玄武岩、粗玄岩、安山岩、流纹岩等不同类型岩石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值，比值范围覆盖 0.705–0.748。将 ICP-MS/MS 结果与 MC-ICP-MS 结果对比，两种方法表现出良好的一致性，⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的平均值偏差在 0.00001 和 0.0016 之间，这种偏差与 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值范围无关。验证了方法的准确性，其精度可满足地质示踪等常规应用需求。

使用 ICP-MS/MS 质量转移模式并以 O₂ 作为反应池气体消除了 ⁸⁷Rb 对 ⁸⁷Sr 的同质异位素干扰。Sr 与氧的反应速度比 Rb 快得多，因此以 ⁸⁷Sr¹⁶O⁺ 的形式测定 ⁸⁷Sr 不会受到 ⁸⁷Rb 的干扰。这种方法比 TIMS 法或 MC-ICP-MS 法更简单、更快速、成本更低，因为 TIMS 和 MC-ICP-MS 都需要在分析前对 Sr 和 Rb 进行色谱分离。ICP-MS/MS 质量转移方法同样适用于未配备 TIMS 或 MC-ICP-MS 的非专业实验室。天然样品的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值分布一般在 0.70 到 0.77 之间，甚至可能分布在 0.700 到 0.943 之间。当 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值差异超过 0.001 时，ICP-MS/MS 法的准确度和精密度足以区分不同来源的样品。因此，此方法有望用于需要鉴定来源的应用，如环境污染源追踪、大规模地质调查和农产品真伪鉴别研究等。

Simultaneous determination of ^{90}Sr and Pu isotopes in marine biological samples (海洋生物样本中 ^{90}Sr 和钚同位素的同步测定)

期刊信息： 期刊： Analytical Chemistry
期刊介绍： 最新影响因子 6.7 最新中科院分区：化学 1 区 Top
期刊编号： Analytica Chimica Acta 1373 (2025) 344472

安捷伦技术： 8800 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 本研究使用三重四极杆 ICP-MS (Agilent 8800) 的反应池功能 (以 NH_3/He 为反应气), 消除样品基质中干扰离子的影响, 提升钚同位素检测的选择性和准确性。通过测定 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 与示踪剂 ^{242}Pu 的信号强度, 计算钚的化学回收率和样品中目标同位素浓度, 建立了一种同时测定各种海洋生物样品中 ^{90}Sr 和 $^{239, 240}\text{Pu}$ 的方法。锶在不同海洋生物群 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀过程中表现出不同的行为, 导致锶在分离过程中产率较低。在大型鱼类 / 虾类样本中, 发现磷的含量相对较高, 这导致氢氧化物沉淀部分中的锶因为形成了锶磷酸盐而大量流失; 与鱼和虾的样本相比, 海藻样本中的磷含量相对较低, 这导致锶同时存在于氢氧化铁的共沉淀物和由于部分生成的锶磷酸盐沉淀所致的上清液中; 利用阴离子交换色谱法成功实现了从氢氧化铁共沉淀物中选择性分离锶与钚及其他铜系元素。通过分别使用阴离子交换层析法和选择性氢氧化物沉淀法, 成功实现了对 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 共沉淀物和上清液中 Sr 的选择性分离。对于 Pu 和 Sr, 总体化学回收率达到了 75% 以上。所开发方法对 $^{239, 240}\text{Pu}$ 和 ^{90}Sr 的检测限比已报道的方法高出 4 至 40 倍, 且比环境水平低约 1 至 2 个数量级。用标准品验证了该方法的准确性和稳健性, 并且已成功应用于分析各种海洋生物物种中 $^{239, 240}\text{Pu}$ 和 ^{90}Sr 的浓度。所开发的方法成功实现了对海洋生物样本中 $^{239, 240}\text{Pu}$ 和 ^{90}Sr 的灵敏测定, 能够准确测定这些放射性核素的环境水平, 同时通过使用同一样本同时测定 $^{239, 240}\text{Pu}$ 和 ^{90}Sr , 显著减少了样本量, 从而降低了分析成本, 因此显著提高了分析效率。

Eliminating Mo isobaric interference using O_2 as reaction gas for Tc measurement by triple quadrupole ICP-MS (利用串联四极杆电感耦合等离子体质谱仪氧气反应模式消除钼的同质异位素对锝测定的干扰)

期刊信息： 期刊： Journal of Analytical Atomic Spectrometry
期刊介绍： 最新影响因子 3.1 最新中科院分区：化学 2 区
期刊编号： J. Anal. At. Spectrom., 2022, 37, 1174

安捷伦技术： 8900 ICP-MS/MS

安捷伦解读： 在本次研究中, 作者评估了电感耦合等离子体串联质谱技术 (ICP-MS/MS) 测定锝 (Tc) 的能力。使用串联四极杆 ICP-MS (Agilent 8900) 的反应池功能 (以 O_2 为反应气), 优化 ICP-MS/MS 操作参数 (如 RF 功率、 O_2 流速等), 确定 O_2 流速 50%–70% 为最佳干扰消除条件, Mo^+ 与 O_2 反应生成 MoO^+ 、 MoO_2^+ 等氧化物离子, 这些离子被第二个四极杆质量过滤器拦截, 而 Tc^+ 与 O_2 反应微弱, 可顺利通过, 使 Mo 对 Tc 测定的影响可忽略, 实现 Mo 与 Tc 的高效分离。搭配 APEX- Ω 进样系统和同心雾化器, 去除样品溶剂生成 “干等离子体”, 将 ^{99}Tc 的检测灵敏度提升至 5000 cps/ppt; 通过测定 ^{97}Tc 示踪剂与 ^{99}Tc 的信号比值, 结合 Ag 同位素标准进行质量偏倚校正, 实现 ^{99}Tc 的定量分析, 绝对检出限低至 0.9 fg (0.6 mBq)。对实验室自制的 ^{97}Tc 示踪剂进行同位素比值测定, 测得 $^{98}\text{Tc}/^{97}\text{Tc}$ 比值为 0.188 ± 0.003 , 与 N-TIMS 方法结果一致, 验证了方法准确性。借助仪器自身的 Mo/Tc 分离能力, 无需复杂冗长的化学分离步骤即可去除 ^{97}Mo 干扰, 解决了环境样品中 Mo 浓度远高于 Tc (可达 10^6 倍) 的测定难题。实现了环境样品中超痕量 ^{99}Tc 的准确测定, 解决了 ^{97}Mo 同量异位素干扰的关键问题。

安捷伦原子光谱技术简介

仪器：AA、MP-AES、ICP-OES、ICP-MS 和 ICP-MS/MS

AA 原子吸收光谱

了解您的火焰测量速度快，石墨炉非常灵敏

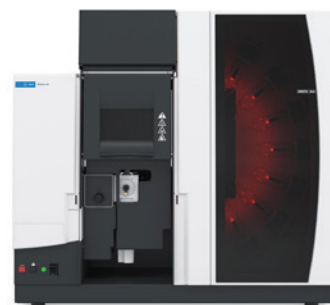
快速分析 — 使用我们的快速序列模式测量单个样品中的所有元素，可提高生产率并大幅降低运行成本

灵敏的石墨炉原子吸收光谱 — Agilent 240Z 和 280Z 塞曼石墨炉原子吸收系统高效而精确，可为具有挑战性的样品提供优异的石墨炉性能和准确的背景校正

耐用而可靠 — Agilent 55B 原子吸收独立式仪器是在偏远地区和恶劣环境中进行分析的理想选择

同时运行火焰和石墨炉系统 — 我们的 DUO AA 配置可同时运行火焰和石墨炉，无转换延迟，助您成倍提高分析效率

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 55B AA 光谱仪产品样本，出版号：[5990-6617CHCN](#) 和安捷伦原子吸收光谱仪产品样本，出版号：[5990-6495ZHCN](#)



Agilent AA 原子吸收光谱

MP-AES

微波等离子体原子发射光谱仪

Agilent 4210 MP-AES 拥有高灵敏度、低至 ppb 级的检出限和超越传统火焰原子吸收系统的分析速度。最重要的是，它使用的是空气而不是可燃性气体。

使用成本低 — 4210 可实现无人值守的自动运行，无需使用昂贵的易燃气体，显著降低了您的操作成本

实验室安全性更高 — 4210 无需使用易燃气体，无需手动搬运并处理气瓶

高性能 — 相比火焰原子吸收系统，磁激发微波等离子体光源提供了更加出色的检出限。多种附件拓展了性能，帮助您分析最复杂的样品

使用简单 — 针对具体应用的软件程序与即插即用硬件，确保任意用户经过简单培训即可使用仪器

远程控制 — 自动化软件包能够对仪器进行远程控制

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 4210 MP-AES 产品样本，出版号：[5991-7237ZHCN](#)



Agilent 4210 MP-AES

ICP-OES

电感耦合等离子体发射光谱仪

Agilent 5800 和 5900 ICP-OES 利用智能软件功能，能够以更快的速度提供准确结果。

始终获得准确结果 — 软件工具像专家一样思考，助您深入了解样品，减少样品重复测定

出色的性能 — 垂直炬管可应对最具挑战性的样品，冷锥接口更大程度减少了干扰。高速智能检测器能够在整个波长范围内实现快速同步测量，无需考虑浓度或信号强度

智能诊断和仪器状态追踪 — 5800 和 5900 ICP-OES 的内置传感器在需要维护时主动提醒分析人员，避免意外停机

专为提高实验室分析效率而设计 — 5900 同步垂直双向观测 (SVDV) ICP-OES 使用巧妙的光学技术同时测量等离子体的轴向和径向视图，样品测量时间和气体用量仅为其他 ICP-OES 仪器的一半

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 5800 ICP-OES 产品样本，出版号：[5994-1276ZHCN](#) 以及 Agilent 5900 ICP-OES 产品样本，出版号：[5994-1277ZHCN](#)



Agilent 5800/5900 ICP-OES

单四极杆 ICP-MS

电感耦合等离子体质谱

Agilent 7850 ICP-MS 是典型 ICP-MS 分析的理想选择，可使用常用法规方法并测量常规样品类型，是摆脱 ICP-MS 分析工作流程中常见时间陷阱的智能方法。它将减少时间浪费，使忙碌的工作人员可以专注于实验室中更有价值的任务，让实验室工作更轻松、员工更高效、分析结果更可靠。

减少样品前处理 — 超高基质进样技术可直接测定最高含 25% 溶解态固体的样品，减少稀释和基质匹配校准的需要

简化方法开发 — 用于法规监管分析与常规分析的标准操作规程和完全开发的方法可为您节省数周的方法开发和文档编制时间。氦气碰撞池和半质量校正功能解决了多原子干扰和双电荷干扰的难题，无需复杂的反应池气体

减少时间浪费 — 早期维护反馈功能使用传感器和计数器确定何时需要维护。交通信号灯式颜色预警确保您不会错过任何维护任务，但也不会过于频繁地进行维护

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 7850 ICP-MS 产品样本，出版号：[5994-2302ZHCN](#)



Agilent 7850 ICP-MS

7900 具有针对特定应用的配置和一系列附件，是应对严苛应用（包括色谱联用、激光剥蚀、半导体制程化学品及研究）的理想解决方案

仪器非常适合需要检测从海水到半导体原材料等任意样品类型的实验室。

优异的基质耐受性 — 稳定等离子体和超高基质进样技术有助于实验室测量总溶解固体量高达 25% 的样品

最宽的动态范围 — 正交检测器系统可提供高灵敏度、低背景，以及高达 11 个数量级的动态范围 — 让您可以在一次运行中同时测量痕量与常量元素

瞬时信号的快速检测 — 高速双模式检测器电子元件（积分时间低至 0.1 ms）可以分析来自单纳米颗粒、激光剥蚀和色谱分离的瞬时信号

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 7900 ICP-MS 产品样本，出版号：[5991-3719CHCN](#)



Agilent 7900 ICP-MS

串联四极杆 ICP-MS

Agilent 8900 串联四极杆 ICP-MS 具有可控且一致的干扰控制能力，适用于要求较高的应用—从测量高基质样品中的痕量元素，到测量高纯度半导体化学品中的杂质。

轻松获得高性能 — 与单四极杆 ICP-MS 相比，8900 具有更高灵敏度和更低背景，从而提供了更低的检出限。MS/MS 可充分发掘反应模式的真正潜能，消除了单四极杆仪器上反应池气体引入的不确定性和误差

处理复杂样品 — 8900 具有出色的稳定性和基质耐受性，可应对要求较高的应用和复杂的样品

适用于复杂应用 — 即使对先前难以分析的元素（如 S、P、Si、Cl），8900 也可以提供可靠的测量结果。MS/MS 使 8900 具有 ICP-MS 中非常高的丰度灵敏度 ($< 10^{-10}$)，进一步提高了高基质样品的数据完整性

量身定制的解决方案 — 8900 ICP-MS/MS 有多种配置可供选择，适用于常规分析和高级研究
如需了解详细信息，请参阅 Agilent 8900 ICP-MS/MS 产品样本，出版号：[5991-6900CHCN](#)



Agilent 8900 ICP-MS/MS

9500 ICP-MS/MS

安捷伦依托海量的一线应用实操经验，全新打造出适配常规实验室需求的 9500 串联四极杆 ICP-MS 仪器。该仪器在保证 ICP-MS/MS 应有的高性能指标下，进一步优化了日常操作流程、提升了工作效率；兼顾稳定可靠的常态化分析能力与高难度检测所需的精准的抗干扰性能。

9500 ICP-MS/MS 搭载以下有助于优化实验室工作流的核心技术：

双池耦合碰撞反应系统（DCS） — 集成了高性能氦气碰撞模式与空气反应模式，可实现更简便、更有效的干扰去除；

高性能氦气碰撞模式（AHM） — 以单一模式取代多种调谐模式，能够使采集时间缩短 33% 以上，并大幅简化方法开发流程；

空气反应模式（Air Cell） — 利用环境空气进行氧气质量转移反应，可有效消除双电荷干扰，避免额外的反应性气体基础设施和安全负担；

OpenLab ICP-MS 软件 — 使串联四极杆性能触手可及，借助批处理转化、方法开发向导和引导式诊断，简化了从仪器设置到结果获取的每一个环节，减少复测，从而提高分析效率并使 ICP-MS/MS 技术更容易被实验室采纳。

如需了解详细信息，请参阅 Agilent 9500 ICP-MS/MS 产品样本，出版号：[5994-9160ZHCN](#)



Agilent 9500 ICP-MS/MS

高级稀释系统 ADS 2

高级稀释系统 (ADS 2) 由安捷伦设计并生产，可与安捷伦 ICP-OES 和 ICP-MS 仪器集成。

自动稀释器可自动完成所有常见的稀释任务，包括：

- 配制校准溶液
- 测量前稀释样品
- 二次稀释和重新测量超量程样品
- 内标或 QC 溶液测试失败后执行二次稀释

自动稀释器的控制与设置集成在仪器软件中（适用于 ICP-OES 和 ICP-MS），与自动进样器、切换阀一样，是分析方法的一部分。

与其他自动稀释器的差别在于：无需稀释的样品可绕过自动稀释器，因此几乎不会增加分析时间。



Agilent ADS 2 自动稀释器

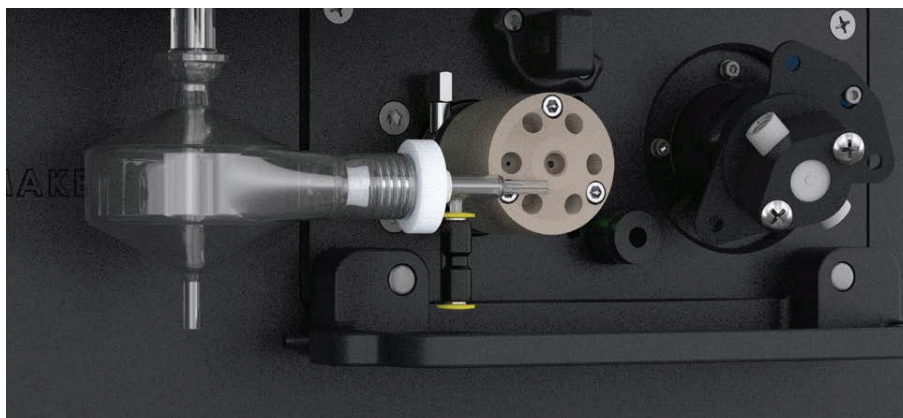
高级切换阀系统 AVS

AVS 是由安捷伦设计、制造并提供技术支持的 ICP-OES 和 ICP-MS 仪器的附件。

- 能够与 ICP-OES 和 ICP-MS 主机巧妙地结合，并且具有完全集成的软件
- 它具有独特 6 位或 7 位切换阀（第 7 个端口用于内标校准）以及用于快速填充样品和定量环的高速正排量泵。精准氦气泡注入控制缩短了样品提升延迟并几乎免去了冲洗时间，便于实现高通量样品分析
- 该系统可完全兼容 Agilent SPS 4/6 自动进样器
- AVS 能够显著提高样品通量，耗时仅为常规（连续）进样系统的 1/3-1/2
- 减少接口在样品基质中的暴露时间，从而减少信号漂移，提高短期和长期精度，同时降低采样锥的清洗频率
- AVS MS 适配 ICP-MS；AVS 6/7 适配 ICP-OES
- AVS MS 可以与安捷伦高基质进样系统附件技术相结合，以快速分析总溶解态固体含量在百分级的样品。与 ICP-OES 相比，检出限更低，而且不受干扰影响，这一切都要归功于不连续进样的效率
- AVS 6/7 非常适合具有挑战性的样品基质。直径恒定的无金属液体流路适用于含有强酸、氢氟酸、有机溶剂、甚至高浓度溶解态固体的样品



高级阀系统 AVS MS

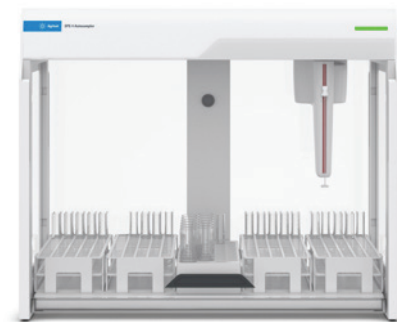


高级阀系统 (AVS) 6 或 7 通切换阀系统

自动进样器 SPS 4/6

Agilent SPS 4/6 是适用于原子光谱应用的新一代高性能自动进样器。专为满足需要快速、大容量（多达 540 个样品或 768 个微孔）、可靠自动进样器的高通量实验室需求而设计，同时体积小巧、运行安静、易于使用且价格合理。

- 可兼容安捷伦全系列原子光谱仪器：FAAS、MP-AES、ICP-OES 和 ICP-MS
- 耐用、粉末涂层的铝制框架轻便、硬度极大且耐腐蚀
- 用户可编程的高速探针臂组件与出色的移动性可实现非常快的样品间移动速度
- USB 即插即用式连接实现快速简便的设置
- 集成式防护罩选件保护您的样品与实验室环境
- 双清洗槽选件避免潜在的交叉污染
- 三通道蠕动泵可实现很大的流动冲洗灵活性
- 多种探针尺寸供选择，满足各种应用需求
- 四个样品架最多可容纳 360/540 个样品，确保高通量实验室实现长期无人值守的运行
- 八块 96 孔微孔板（采用可选的孔板组件）最多可容纳 768 个样品（仅用于 ICP-MS）



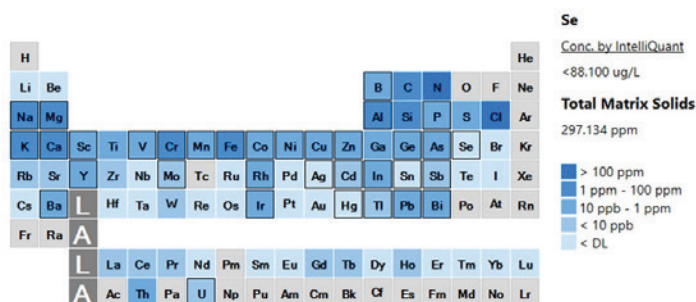
Agilent SPS 4

“AI 智能功能” 软件简介

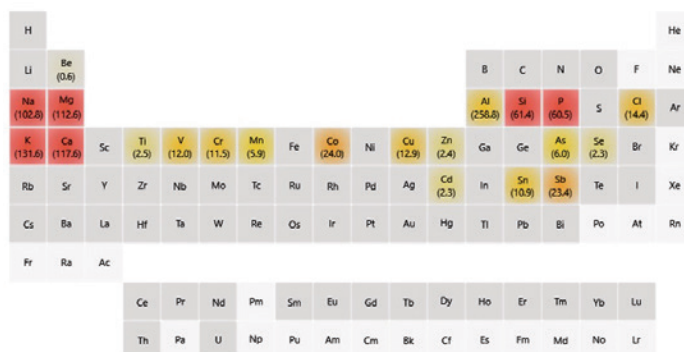
IntelliQuant 分析：智能“半定量”功能实现样品的快速准确性

ICP-MS：IntelliQuant 是一种完全集成的结果显示和解析功能，可提供样品的更多信息，更大程度减少额外耗费的时间或精力。IntelliQuant 以使用 ICP-MS MassHunter 软件中“快速扫描”功能采集的全质谱数据为基础，包含在该软件的 4.6 及更高版本中。为便于使用，大多数定量方法过程将自动采集 IntelliQuant 数据，并作为所有安捷伦预设方法中的默认设置。IntelliQuant 可在 2 秒内自动采集全质谱快速扫描数据，并可对每个样品中多达 78 种元素生成半定量数据。默认情况下，IntelliQuant 数据在氦气碰撞池模式下采集，因此分析物可大幅避免多原子离子干扰，从而确保生成高质量数据。IntelliQuant 还可以处理较早版本 ICP-MS MassHunter 采集的快速扫描数据。

ICP-OES：作为 ICP Expert 软件的一部分，IntelliQuant 是一种用于 ICP-OES 的快速半定量数据采集程序。IntelliQuant 在 167–785 nm 的整个光谱范围内采集每个样品的数据，从而提供所有其他 ICP-OES 仪器均无法提供的全面数据。作为定量方法的一部分执行时，IntelliQuant 扫描可快速提供样品信息。下图中的全谱扫描部分显示了使用 IntelliQuant 获得的样品中元素的相对丰度。这些信息可用于开发避免光谱干扰的方法，确定可能的稀释倍数，帮助确定各种元素的校准范围以及使用哪种等离子体观测模式。



ICP-MS IntelliQuant 图谱



ICP-OES IntelliQuant 图谱

IntelliQuant Star Rating：星级评定功能轻松实现数据评估

ICP-MS MassHunter 5.3 版引入了一项创新功能 — 星级评定，旨在简化 ICP-MS 数据分析。星级评定使用在氦气碰撞模式下采集的现有 QuickScan 数据（2 秒全质谱扫描）来评估是否存在意外干扰。软件会综合考虑所有潜在干扰以及校准质量、精度、LOQ 和背景，针对每个样品中测量的每种同位素生成简单的 0 到 5 星整体检测质量评级。结果按不同的颜色以周期表形式呈现，并提供相应的数据表，同时还会列出导致评级低于 5 星的原因。



IntelliQuant Screening for ICP-OES

ICP-OES IntelliQuant 半定量分析工具通过采集和解析全谱测量值，仅需极少的用户输入即可让用户更深入地了解样品。它可让用户在几秒钟内开始采集数据，无需选择要分析的元素或波长。

IntelliQuant Screening 使用“快照”模式，可比标准版 IntelliQuant 更快采集全谱数据。这种全新测量模式利用 Agilent VistaChip II CCD 检测器的速度和强大功能，可在不到五秒的总测量时间内对每个样品进行全谱扫描。对每个样品进行全谱测量后，IntelliQuant 会检查数据并自动确定哪个波长可为每个元素提供理想结果。IntelliQuant 算法可评估分析物峰的强度、峰局部背景的一致性，以及样品中其他元素产生光谱干扰的可能性。IntelliQuant 可报告高质量的可靠结果，无需用户具备任何光谱知识。分析人员可以确保得到的测量数据不存在干扰，且处于“快照”模式下可测量的有效强度范围内。可用于趋势分析、样品筛查和方法开发等。



如需了解更多产品和技术详情，请查阅原子光谱产品目录。

查找当地的安捷伦客户中心：

www.agilent.com/chem/contactus-cn

免费专线：

800-820-3278, 400-820-3278 (手机用户)

联系我们：

LSCA-China_800@agilent.com

在线询价：

www.agilent.com/chem/erfq-cn



微信搜一搜

安捷伦视界

www.agilent.com

DE-017639

安捷伦对本资料可能存在的错误或由于提供、展示或使用本资料所造成的间接损失不承担任何责任。

本文中的信息、说明和技术指标如有变更，恕不另行通知。

© 安捷伦科技（中国）有限公司，2026
2026 年 9 月，中国出版
5994-9488ZHCN