

# 环境样品中锑形态的分析方法及应用

赵光辉

郑州德析检测技术有限公司 河南省郑州市 450000

**【摘要】**随着工业活动和矿产开发的增加,锑污染问题日益严重,对环境安全和人类健康构成潜在威胁。锑的形态分析不仅有助于了解其环境行为,还能为污染治理和风险评估提供科学依据。传统分析方法如原子吸收光谱法(AAS)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)虽然能够测定总锑含量,但无法区分不同形态。近年来,基于色谱分离与质谱检测的联用技术,如高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法(HPLC-ICP-MS),已成为锑形态分析的主流方法。这些方法具有高灵敏度、高选择性和多元素同时分析的优势,能够满足复杂环境样品中锑形态分析的需求。

**【关键词】**环境样品; 锑形态分析方法; 应用

Analytical method and application of antimony morphology in environmental samples

Zhao Guanghui

Zhengzhou German analysis Testing Technology Co., LTD. Zhengzhou, Henan Province 450000

**【Abstract】** With the increase of industrial activities and mineral exploitation, the problem of antimony pollution is becoming increasingly serious, which poses a potential threat to environmental safety and human health. The morphological analysis of antimony can not only help to understand its environmental behavior, but also provide a scientific basis for pollution control and risk assessment. Although traditional analytical methods such as atomic absorption spectroscopy (AAS) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) can determine the total antimony content, they cannot distinguish between different forms. In recent years, the combined techniques based on chromatography separation and mass spectrometry detection, such as high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry (HPLC-ICP-MS), has become the mainstream method of antimony morphology analysis. These methods have the advantages of high sensitivity, high selectivity and multi-element simultaneous analysis, and are able to meet the needs of antimony morphology analysis in complex environmental samples.

**【Key words】** environmental samples; antimony morphology analysis method; application

## 引言

锑(Sb)是一种广泛存在于环境中的有毒元素,其形态分析对于评估其环境行为和生态风险具有重要意义。锑在环境中主要以三价锑(Sb(III))和五价锑(Sb(V))两种形态存在,三价锑(Sb(III))的毒性通常比五价锑(Sb(V))高,因为Sb(III)更容易与生物体内的蛋白质和酶等生物大分子结合,干扰其正常生理功能。而有机锑化合物的毒性和生物活性则因其结构的不同而有所变化。准确测定环境样品中锑的形态分布,是研究其环境行为和生态效应的关键。锑形态分析的主要方法包括色谱分离技术、光谱和质谱检测及其联用技术,这些方法在灵敏度、选择性和适用性方面各有优劣,需根据具体样品和分析目标进行选择。

## 1 环境样品中锑形态分析的重要意义

### 1.1 评估锑的环境行为与生态风险

锑在环境中以不同形态存在,其毒性、迁移性和生物可利用性差异显著。三价锑(Sb(III))的毒性远高于五价锑(Sb(V)),而Sb(V)在环境中更稳定且易于迁移。通过

锑形态分析,可以准确评估其在环境中的分布、迁移和转化行为,为生态风险评估提供科学依据。锑形态分析还能制定环境标准和污染治理策略提供数据支持,从而有效降低锑污染的环境风险<sup>[1]</sup>。

### 1.2 揭示锑的毒性机制与健康危害

锑的不同形态对生物体的毒性机制和健康危害存在显著差异。Sb(III)具有强烈的细胞毒性和遗传毒性,可导致DNA损伤和细胞凋亡,而Sb(V)的毒性相对较低。通过锑形态分析,可以揭示其在生物体内的代谢过程和毒性机制,为评估其对人类健康的影响提供科学依据。锑形态分析还能开发解毒剂和治疗方案提供理论支持,减少锑中毒事件的发生。

### 1.3 指导锑污染治理与修复技术

不同形态的锑在环境中的稳定性和反应性差异显著,影响其在污染治理和修复过程中的去除效率和转化途径。通过锑形态分析,可以优化治理和修复技术的选择,提高锑污染的治理效果。例如,在土壤修复中,锑形态分析有助于选择适合的稳定化剂或吸附剂,降低锑的生物可利用性和迁移性。在水体治理中,锑形态分析可以指导氧化还原反应或沉淀技术的应用,有效去除高毒性形态的锑,锑形态分析是锑污染治理和修复技术的重要支撑<sup>[2]</sup>。

## 2 环境样品中锑形态分析方法面临的挑战

### 2.1 样品前处理的复杂性与基体干扰

环境样品中锑形态分析的前处理过程复杂,且易受基体干扰的影响。土壤、水体和生物样品中的有机质、无机盐和其他金属离子可能干扰锑的提取和分离,导致分析结果的偏差。例如,土壤样品中的有机质可能吸附锑,影响其提取效率;水体样品中的悬浮颗粒可能包裹锑,干扰其形态分析,目前处理过程中锑形态的转化问题也增加了分析的难度。

### 2.2 形态分离与检测技术的局限性

锑的形态分离技术如高效液相色谱(HPLC)或毛细管电泳(CE)在分离过程中易受基质效应干扰,导致目标形态的分离效率降低。锑形态在分离过程中可能发生氧化还原反应或形态转化,造成分析结果的偏差。检测技术如电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)或原子荧光光谱(AFS)虽具有高灵敏度,但对某些低浓度锑形态的检测仍存在困难,尤其是当样品中存在高浓度干扰元素时,检测限显著升高。

### 2.3 形态转化与稳定性的控制问题

锑在环境样品中的形态转化和稳定性问题对分析结果的准确性构成挑战。在样品采集、储存和前处理过程中,锑可能发生氧化还原反应或络合反应,导致其形态发生变化。例如,Sb(III)在氧化条件下可能转化为Sb(V),而Sb(V)在还原条件下可能转化为Sb(III)。锑与样品中的有机质或无机离子可能形成络合物,影响其形态分析<sup>[9]</sup>。

## 3 环境样品中锑形态的分析方法

### 3.1 光谱分析方法

光谱分析方法是锑形态分析的重要手段,主要包括原子吸收光谱(AAS)、电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)。AAS具有操作简便、成本低廉的优点,但其灵敏度和选择性相对较低,适用于总锑含量的测定。ICP-OES和ICP-MS具有高灵敏度和多元素同时分析的优势,广泛应用于环境样品中锑的形态分析。光谱分析方法无法直接区分锑的不同形态,通常需要与色谱分离技术联用,以提高分析的准确性和选择性。

### 3.2 色谱分析方法

色谱分析方法是锑形态分离的主要技术,包括高效液相色谱(HPLC)、离子色谱(IC)和毛细管电泳(CE)。HPLC分离原理基于不同形态的锑在固定相和流动相之间的分配系数差异,通过选择合适的色谱柱和流动相,可以实现对不同锑形态的有效分离。具有分离效率高、选择性好的优点,广泛应用于锑形态的分离。IC适用于阴离子形态的锑分析,如Sb(III)和Sb(V),Sb(III)和Sb(V)分别以亚锑酸盐( $\text{SbO}(\square)\square$ )和锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ )的形式存在。亚锑酸盐( $\text{SbO}(\square)\square$ )具有较强的还原性,易在氧化环境中转化为锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ ),而锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ )则表现出较高的稳定性。离子色谱(IC)能够有效分离和检测这两种阴离子形态,为锑的环境行为研究提供重要数据支持。CE是一种基于带电粒子在电场作用下迁移速率不同而实现分

离的技术,具有分离速度快、样品用量少的优点,适用于微量锑形态的分析。色谱分析方法的分离效率和选择性受样品基体和流动相组成的影响,通常需要光谱或质谱检测技术联用,以提高分析的灵敏度和准确性<sup>[9]</sup>。

### 3.3 电化学分析方法

电化学分析方法是锑形态分析的新兴技术,主要包括伏安法、极谱法和电化学传感器。伏安法具有灵敏度高、选择性好的优点,适用于微量锑形态的分析。极谱法具有操作简便、成本低廉的优点,适用于总锑含量的测定。电化学传感器具有响应速度快、便携性好的优点,适用于现场快速检测。电化学分析方法的稳定性和重现性受电极材料和电解液组成的影响,通常需要优化实验条件,以提高分析的准确性和可靠性。

### 3.4 联用技术分析方法

联用技术是锑形态分析的主流方法,主要包括高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)、离子色谱-电感耦合等离子体质谱(IC-ICP-MS)和毛细管电泳-电感耦合等离子体质谱(CE-ICP-MS)。HPLC-ICP-MS具有分离效率高、灵敏度高的优点,广泛应用于复杂环境样品中锑形态的分析。IC-ICP-MS适用于阴离子形态的锑分析,如Sb(III)和Sb(V),分别以亚锑酸盐( $\text{SbO}(\square)\square$ )和锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ )的形式存在。亚锑酸盐( $\text{SbO}(\square)\square$ )在氧化条件下易转化为锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ ),而锑酸盐( $\text{SbO}_3(\square)$ )则表现出较高的化学稳定性。IC-ICP-MS能够高效分离和检测这两种阴离子形态,结合ICP-MS的高灵敏度,为锑形态的精准定量分析提供了可靠的技术支持。CE-ICP-MS具有分离速度快、样品用量少的优点,适用于微量锑形态的分析<sup>[9]</sup>。

### 3.5 新兴的分析技术

新兴的分析技术为锑形态分析提供了新的思路,主要包括纳米材料增强光谱分析、微流控芯片技术和质谱成像技术。纳米材料增强光谱分析通过利用纳米材料的特殊光学性质,提高光谱分析的灵敏度和选择性。微流控芯片技术通过集成样品前处理、分离和检测功能,实现锑形态的快速分析。质谱成像技术通过空间分辨的质谱分析,揭示锑在环境样品中的分布和形态转化。新兴技术的应用仍处于研究阶段,需进一步优化和验证,以提高其在实际分析中的适用性和可靠性。

## 4 环境样品中锑形态分析方法的应用

### 4.1 在土壤环境中的应用

土壤中锑的形态分布直接影响其生物有效性和环境风险。不同形态的锑在土壤中的吸附、解吸和迁移转化行为存在差异。例如,在酸性土壤中,锑的生物可利用性通常较高,因为酸性条件有利于锑的溶解和释放。通过分析土壤中锑形态,可以了解其在土壤中的赋存状态和潜在风险,为土壤污染的治理和修复提供科学依据。在某矿区周边土壤的研究中,利用连续提取法将土壤中的锑分为不同形态,包括水溶态、交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合

态和残渣态。结果表明,该地区土壤中交换态和水溶态锑的含量较高,表明土壤中的锑具有较高的生物可利用性,对周边生态环境和人体健康存在潜在威胁。针对这种情况,采取了添加石灰和有机肥等改良剂的措施,调节土壤的pH值,增加土壤对锑的吸附能力,降低锑的生物有效性,从而减少其对环境的危害。

#### 4.2 在水体环境中的应用

水体中的锑主要以Sb(III)和Sb(V)存在,其形态分布受水体pH值、溶解氧浓度、有机质含量及氧化还原条件等因素影响。Sb(III)具有较高的毒性,对水生生物和人类健康构成潜在威胁,而Sb(V)相对稳定且易于迁移。通过锑形态分析,可以明确锑在水体中的赋存状态及其生物可利用性,为评估其对水生生态系统和饮用水安全的潜在危害提供科学依据。例如,在矿区或工业废水排放区域,锑形态分析有助于识别污染源及污染范围,预测其对水生生物的毒性效应。锑形态分析还能在水体治理技术的选择和优化提供数据支持,如通过氧化还原反应将高毒性的Sb(III)转化为低毒性的Sb(V),或通过吸附技术(如活性炭或纳米材料)去除水体中的锑污染物。锑形态分析在水体环境中的应用,对于实现水体污染的有效治理和生态保护具有重要价值。

#### 4.3 在大气环境中的应用

大气中的锑主要以颗粒物和气溶胶形式存在,其形态分布受大气氧化还原条件、颗粒物组成及气象条件等因素影响。Sb(III)具有较高的毒性,易通过呼吸系统进入人体并对健康构成潜在威胁,而Sb(V)相对稳定且迁移性较强。通过锑形态分析,可以明确锑在大气中的赋存状态及其生物可利用性,为评估其对人体呼吸系统和健康的潜在危害提供科学依据。例如,在工业区或交通繁忙区域,锑形态分析有助于识别污染源及污染范围,预测其对公众健康的影响。锑形态分析还能在大气污染治理技术的选择和优化提供数据支持,如通过过滤技术(如高效颗粒空气过滤器)或吸附技术(如活性炭)去除大气中的锑污染物。锑形态分析在大气环境中的应用,对于实现大气污染的有效治理和公共健康保护具有重要价值<sup>[6]</sup>。

#### 4.4 在生物样品中的应用

生物样品中的锑主要以Sb(III)和Sb(V)存在,其形态分布受生物体的代谢活动、解毒机制及暴露途径等因素影响。Sb(III)具有较高的毒性,易导致细胞损伤和DNA

突变,而Sb(V)相对稳定且毒性较低。通过锑形态分析,可以明确锑在生物体内的赋存状态及其代谢途径,为评估其对生物体健康的潜在危害提供科学依据。例如,在暴露于锑污染环境的生物体中,锑形态分析有助于揭示其在组织中的累积规律及毒性机制,为制定解毒剂和治疗方案提供理论支持。锑形态分析还能在生物监测技术的开发和优化提供数据支持,如通过生物标志物或生物传感器检测锑污染物的暴露水平。锑形态分析在生物样品中的应用,对于实现锑污染的健康风险评估和解毒策略制定具有重要价值。

#### 4.5 在工业废弃物中的应用

锑形态分析在工业废弃物中的应用,对于评估废弃物污染程度、资源化利用潜力及制定处理策略具有重要意义。工业废弃物中的锑主要以Sb(III)和Sb(V)存在,其形态分布受废弃物处理工艺、储存条件及环境因素影响。Sb(III)具有较高的毒性,易对环境和人类健康构成潜在威胁,而Sb(V)相对稳定且易于迁移。通过锑形态分析,可以明确锑在工业废弃物中的赋存状态及其生物可利用性,为评估其对环境和资源的潜在危害提供科学依据。例如,在矿渣或电子废弃物中,锑形态分析有助于识别污染源及污染范围,预测其对环境和人类健康的影响。此外,锑形态分析还能在工业废弃物的资源化利用提供数据支持,如通过回收技术(如湿法冶金或火法冶金)提取和再利用锑资源,或通过稳定化技术(如固化或封装)降低锑的环境风险。锑形态分析在工业废弃物中的应用,对于实现废弃物的资源化利用和环境污染控制具有重要价值<sup>[7]</sup>。

## 结束语

锑形态分析是研究其环境行为和生态风险的重要手段,对环境保护和污染治理具有重要意义。目前基于色谱分离与质谱检测的联用技术,已成为锑形态分析的主流方法,具有高灵敏度、高选择性和多元素同时分析的优势。复杂环境样品中基体干扰和形态转化等问题仍对分析结果的准确性构成挑战,未来开发更高效的前处理方法、优化分离检测技术以及建立标准化分析流程,将是锑形态分析领域的重要研究方向,锑形态分析将为环境监测和污染控制提供更可靠的技术支持。

## 参考文献

- [1]徐蕾.环境样品中锑形态的分析方法及应用[D].齐鲁工业大学, 2024.
- [2]李柏樟.喀斯特地质背景土壤中锑的形态提取方法对比研究及应用[D].贵州大学, 2024.
- [3]牟一贞.微塑料对锑的吸附及对土壤锑形态与植物吸收的研究[D].贵州大学, 2023.
- [4]崔婷.负载水铁矿或 $\delta$ -MnO<sub>2</sub>对淹水土壤中锑形态的影响研究[D].成都理工大学, 2022.
- [5]甘霞.成都成华东北部PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>中锑等形态分布、源解析和风险评价[D].成都理工大学, 2020.
- [6]郑涵.浊点萃取技术在环境样品中锑、汞形态及有机磷农药残留分析研究[D].广东药科大学, 2019.
- [7]张欢.生物炭对土壤锑形态及生物有效性的影响研究[D].陕西科技大学, 2019.