

# 环境样品中重金属元素的形态分析技术研究

李艺 毛宁

武汉市净澜检测有限公司

DOI:10.12238/eep.v7i11.2335

**[摘要]** 本文研究了环境样品中的重金属元素化学形态及其对环境与健康影响。其中,涉及到重金属不同形态的分析,例如可交换态、碳酸盐态、硫化物态等,还有它们在水体、土壤和沉积物中的转化过程。集中讨论了现行形态分析技术情况,包括介绍传统方法以及现代技术所带来的应用和优劣之处。本文对各类重金属形态分析技术在水体、土壤、沉积物以及大气沉降物中的应用进行了详细介绍,并通过统计分析方法对形态分析数据进行处理和解读,提出了其在环境风险评估与污染源分析中的实际应用。

**[关键词]** 重金属元素; 化学形态; 形态分析技术; 环境风险; 生态污染

中图分类号: G633.8 文献标识码: A

Study on morphological analysis techniques of heavy metal elements in environmental samples

Yi Li Ning Mao

Wuhan Jinglan Testing Co., LTD.

**[Abstract]** The chemical forms of heavy metals in environmental samples and their effects on environment and health were studied. Among them, it involves the analysis of different forms of heavy metals, such as exchangeable state, carbonate state, sulfide state, etc., as well as their transformation process in water, soil and sediment. The present morphological analysis techniques are discussed, including the application and advantages of traditional methods and modern techniques. In this paper, the application of various heavy metal morphological analysis techniques in water, soil, sediment and atmospheric sediment is introduced in detail, and the statistical analysis method is used to process and interpret the morphological analysis data, and the practical application in environmental risk assessment and pollution source analysis is proposed.

**[Key words]** heavy metal elements; Chemical form; Morphological analysis technique; Environmental risks; Ecological pollution

## 引言

重金属元素广泛存在于水体、土壤、大气等环境介质中,给生态系统及人类健康带来了严重威胁。重金属的毒性不仅取决于其总含量,更与其在环境中的化学形态密切相关。不同形态的重金属具有不同的生物可利用性、迁移性及毒性,这使得传统的重金属总量检测难以全面反映其真实的环境风险。因此,重金属形态分析成为环境监测与风险评估中的关键技术。通过对重金属在环境中的形态、转化过程以及生物可利用性的深入研究,能够为污染源追溯、环境管理和污染治理提供科学依据。

### 1 重金属元素的形态与环境影响

#### 1.1 重金属元素的化学形态

重金属元素在环境中的化学形态多样,其形态对环境行为、迁移过程以及生物可利用性具有重要影响。重金属的化学形态可以根据其结合的化学物质及其稳定性进行分类,常见的有可交换态、碳酸盐态、硫化物态、氧化态和有机结合态等。可交

换态重金属通常以离子形式存在,具有较高的生物可利用性,因此其毒性相对较强。碳酸盐态是指重金属与碳酸盐形成的复合物,如镉、铅等在水体中的碳酸盐沉淀,具有较低的生物可利用性,对环境的毒性相对较弱。硫化物态的重金属则通过与硫化物离子形成沉淀存在,如砷、镉等,这类形态在低氧环境下较为稳定,不易迁移。

#### 1.2 重金属元素在环境中的转化过程

在水体、土壤和沉积物中,重金属元素的形态会经过溶解、吸附、沉淀、氧化还原反应等转换过程。重金属元素的溶解度在水体中起着决定性作用,决定了其是否能进入生物体并对生态环境造成危害。溶解度受pH值、氧化还原电位(Eh)以及温度等因素的影响。附作用是土壤和沉积物中重金属形态转化的另一重要机制,重金属离子能够被土壤颗粒表面的氧化物或有机物吸附,从而改变其在环境中的迁移性。吸附过程受pH值、有机质含量以及土壤中其他离子的影响。

## 2 重金属元素形态分析技术概述

### 2.1 传统分析方法

传统化学提取法常用于土壤、沉积物及水体样品中,通过不同的提取剂将重金属从样品中提取出来,进而分析其各个形态。BCR(顺序化学提取法)是一种常见的化学提取法,该方法通过一系列不同强度的提取剂,依次提取重金属元素的不同化学形态,如水溶性态、可交换态、碳酸盐态、有机结合态等。具体的提取步骤和计算公式如下:

$$Ci = \frac{mi}{m_{total}} \times 100$$

其中,  $Ci$  表示第*i*种形态的质量百分比,  $mi$  为该形态的质量,  $m_{total}$  为总重金属含量。

### 2.2 现代分析方法

X射线光电子能谱(XPS)是一种用于表面分析的高精度技术,能够定量分析样品表面元素的化学状态。XPS的优点在于其能够揭示元素的氧化态和化学环境,适用于环境样品中表面重金属的形态分析。XPS的定量分析可以通过以下公式来实现:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中,  $I$  是从样品表面反射回来的光子强度,  $I_0$  为入射光强度,  $\mu$  是样品的吸收系数,  $x$  是样品的厚度。

气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)则适用于分析挥发性重金属及其有机化合物。GC-MS结合了气相色谱的分离能力和质谱的定性定量分析能力,能够分离并测定复杂样品中的多种重金属形态。GC-MS的分析公式为:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

其中,  $S$  为重金属的定量浓度,  $I(t)$  为时间  $t$  时的信号强度,  $t_1$ 、 $t_2$  为时间积分的起止时段。

## 3 各类重金属元素的形态分析技术应用

### 3.1 水体中重金属的形态分析

重金属在水中的存在状态受到多种因素的影响,包括水体的化学性质(如pH值、氧化还原电位)、水体中溶解氧的含量以及水流的速度等。某湖泊水体中重金属形态分析的具体数据如下表1所示。

表1 某湖泊水体中重金属形态分布

重金属元素	水溶性态 (%)	可交换态 (%)	碳酸盐态 (%)	硫化物态 (%)	有机结合态 (%)
铜 (Cu)	5.2	13.1	20.4	6.8	54.5
铅 (Pb)	3.7	8.2	18.3	5.4	64.4
镉 (Cd)	10.1	17.5	22.8	4.2	45.4

从上面表格可以看出,水体中的重金属主要以有机结合态和碳酸盐态为主,这表明这些元素的生物可利用性较低,但仍需警惕其长期积累可能引发的生态风险。

### 3.2 土壤与沉积物中重金属的形态分析

土壤pH值的变化直接影响重金属的溶解度和迁移性,酸性土壤往往促进重金属的溶解,使其转化为更具毒性的可交换态或溶解态。土壤中的有机质能够与重金属形成络合物,减缓其迁移和生物可利用性。沉积物中的重金属主要以硫化物态、氧化物态和有机结合态存在。某地区土壤中重金属形态分析的具体数据如下表2所示。

表2 某地区土壤中重金属形态分析结果

重金属元素	土壤pH	有机质含量 (%)	水溶性态 (%)	可交换态 (%)	硫化物态 (%)	有机结合态 (%)
锌 (Zn)	6.5	2.4	3.2	17.5	20.3	59
铜 (Cu)	5.8	3.1	4.5	21	19.7	54.8
铅 (Pb)	7.2	4.5	2	16.2	18.5	63.3

从上面表格可以看出,酸性土壤中的重金属呈现较高的可交换态和水溶性态,而高有机质含量的土壤中重金属则更多以有机结合态存在,从而降低了其生物可利用性。

### 3.3 大气沉降物与废弃物中的重金属形态分析

大气沉降物中的重金属主要通过大气污染源沉降到地面,通常以气态、颗粒态或气溶胶形式存在。固体废弃物中的重金属则通常与固体颗粒、灰分或有机物结合。对于固体废弃物中的重金属,常见的分析方法包括分光光度法和ICP-MS技术。某城市垃圾焚烧灰中重金属形态分析的具体数据如下表3所示。

表3 某城市垃圾焚烧灰中重金属形态分析

重金属元素	含量 (mg/kg)	水溶性态 (%)	可交换态 (%)	氧化物态 (%)	硫化物态 (%)
铅 (Pb)	118.5	4.2	17.8	59.3	18.7
锌 (Zn)	345.3	2.6	10.3	62.5	24.6
镉 (Cd)	56.1	6.3	15.2	60.1	18.4

从上面表格可以看出,垃圾焚烧灰中铅、锌和镉大部分以氧化物态和可交换态存在,这可能导致它们在废弃物中较高的生物可利用性和环境风险。

## 4 重金属形态分析数据处理与结果解读

### 4.1 数据分析方法

在重金属形态分析的过程中,统计方法能够有效揭示重金属在不同环境介质中的分布特征以及其潜在的生态风险。主成分分析(PCA)是一种常用的降维方法,能够提取出重金属形态分析数据中的主要信息,简化数据结构,从而识别出影响重金属分布的关键因素。PCA的公式为:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

其中,  $Z$  是标准化后的数据,  $X$  为原始数据,  $\mu$  为数据的均值,  $\sigma$  为数据的标准差。

### 4.2 结果解读与环境风险评估

不同形态的重金属元素在土壤、水体、空气等环境介质中的生物可利用性和毒性差异较大。水溶性态和可交换态的重金属往往具有较高的生物可利用性，对水生生物和土壤生物的毒性更强，而沉淀态和氧化物态的重金属则相对较低，难以被生物体吸收，但在特定条件下仍可能被释放，造成潜在的生态风险。某地区土壤中重金属形态与生态风险评估结果如下表4所示。

表4 某地区土壤中重金属形态分布与生态风险评估

重金属元素	水溶性态 (%)	可交换态 (%)	硫化物态 (%)	有机结合态 (%)	生态风险系数	环境风险等级
铅 (Pb)	4.2	17.8	20.3	59	0.75	中等风险
镉 (Cd)	6.8	22.5	18.2	52.5	0.85	高风险
锌 (Zn)	3.6	15.9	24.5	56	0.65	低风险

从上面表格可以看出，镉的可交换态和水溶性态较高，生态风险系数较大，属于高风险类别，而铅和锌则处于中等或低风险水平。

#### 4.3 形态分析结果的应用

在污染治理中，重金属形态分析帮助识别出易于迁移和生物可利用的重金属形态，从而采取更加有效的治理措施。对不同环境介质中重金属形态的分析，可以评估环境质量的变化趋势，为环境政策的制定提供科学依据。某工业区的重金属污染治理数据，展示了在形态分析结果支持下，采取的治理措施与效果，具体数据如下表5所示。

表5 某工业区重金属污染治理效果分析

治理措施	重金属含量降低 (%)	治理前污染等级	治理后污染等级
水体pH值调节	35.2	高风险	中等风险
土壤有机物添加	27.8	高风险	低风险
沉淀剂添加	40.5	中等风险	低风险

从上面表格可以看出，调整水体pH值、添加土壤有机物和使用沉淀剂，重金属污染得到显著降低，污染等级从高风险降低到中等或低风险，表明形态分析结果在污染治理中的重要作用。

#### 5 结论

本文研究重金属元素化学形态分析技术，关注其在环境污染监测和风险评估中的应用。对水体、土壤、沉积物等不同环境介质中重金属形态进行分析，以揭示各类重金属迁移、转化及生态影响机制。了解到，重金属形态分布对其生物可利用性、毒性以及环境风险具有显著影响；根据形态差异，每种重金属均对生态系统产生不同程度的污染效果。传统化学提取法与现代仪器如ICP-MS、XPS等分析技术共同构成了有效的研究手段。重金属形态分析在环境保护、资源管理和政策制定中展现出重要的实践价值，未来应加强方法技术的创新和应用推广。

#### [参考文献]

- [1]张露.某铀尾矿坝周边水稻土放射性元素与典型重金属的形态分析与环境效应[D].东华理工大学,2019.
- [2]周燊港.贵阳市PM2.5中重金属元素的化学形态分析与风险评价[D].贵州师范大学,2017.
- [3]周燊港,邹海凤,董娴,等.贵阳市冬季PM2.5中典型重金属元素的化学形态分析与健康风险评价[J].生态毒理学报,2017,12(01):277-284.
- [4]张黎.铅元素在金铜矿选矿—干堆尾矿系统中的环境化学特征[D].武汉工程大学,2016.
- [5]段国霞.西安市南郊PM2.5和PM10中重金属分布特征与化学形态分析[D].西安建筑科技大学,2012.
- [6]李鑫.济南市主要土壤类型在不同功能区的重金属形态分析[D].山东大学,2008.

#### 作者简介:

李艺(1991—),女,汉族,湖北省人,本科,中级工程师,研究方向:理化检测。

毛宁(1997—),女,汉族,湖北省人,本科,中级工程师,研究方向:环境监测。