

污泥重金属残留检测与污染风险评估

郑雅丽

郑州市城市排水监测站有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：随着城市化进程的加速和污水处理规模的扩大，污水污泥作为水处理过程中的副产物，其产量日益增加。污泥中富集了来自工业废水、生活源及大气沉降的多种重金属元素，若处置不当，将对土壤生态系统、地下水环境及人体健康构成严重威胁。本文系统综述了污泥中重金属残留的检测技术现状，重点分析了原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）、X射线荧光光谱法等主流技术的原理、优缺点及适用范围。

【关键词】：污泥；重金属；残留检测；污染风险评估；形态分析；生态风险；资源化利用

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.068

引言

水是生命之源，也是人类社会发展的基础资源。然而，随着人口增长和工业化进程的迅猛推进，水资源短缺与水环境污染问题日益凸显。城市污水处理厂作为水环境治理的关键环节，在有效去除水体中有机物、氮磷营养盐及病原微生物的同时，也产生了大量的固体副产物——污泥。据统计，全球每年产生的干污泥量已达数亿吨，且呈逐年上升趋势。由于重金属具有难降解、易生物富集及长距离迁移等特性，它们在污水处理过程中极易被活性污泥吸附、沉淀或截留，导致污泥成为重金属的主要“汇”。

1 污泥重金属残留检测技术进展

1.1 样品前处理技术的关键作用

污泥基体复杂，含有大量有机质、水分及无机盐，直接进行重金属检测往往会导致仪器堵塞、信号干扰或结果偏差。因此，高效、安全的样品前处理技术是确保检测结果准确性的首要环节。目前，主流的消解方法包括湿式消解法、微波消解法、干灰化法及熔融法。湿式消解法利用强酸（如硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸等）在加热条件下溶解样品，操作简便但耗时较长，且存在酸雾污染风险；微波消解法利用微波能量使样品内部迅速升温升压，显著缩短了消解时间，提高了回收率，减少了试剂用量和环境污染，是目前应用最为广泛的消解方式；干灰化法通过高温灼烧去除有机质，适用于某些特定金属的测定，但容易导致汞、砷等挥发性元素的损失；熔融法则主要用于难溶样品的分解，需使用熔剂并在高温下进行，操作相对复杂。针对不同重金属的特性及后续检测需求，选择合适的消解方案至关重要，通常推荐采用微波辅助酸消解法，并结合加入氧化剂（如过氧化氢）以提高有机质的分解效率。

1.2 总含量检测的主流分析方法

在样品前处理完成后，检测重金属的总含量主要依赖高精度的仪器分析技术。原子吸收光谱法（AAS）是经典的检测手段，包括火焰原子吸收光谱法（FAAS）和石墨炉原子吸收光谱法（GFAAS）。FAAS适用于高浓度重金属的快速筛查，成

本低廉但灵敏度相对较低；GFAAS则具有极高的灵敏度，可检测痕量甚至超痕量重金属，特别适合镉、铅等低浓度元素的测定，但分析速度较慢且基体干扰较大。电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）利用高温等离子体激发原子产生特征光谱，具有线性范围宽、多元素同时测定、抗干扰能力强等优点，是实验室常规检测的首选方法之一。而电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）代表了当前重金属检测的最高水平，它结合了ICP的高温电离能力和质谱的高灵敏度，能够同时测定数十种元素，检出限可达ppt（万亿分之一）级别，特别适用于超低浓度重金属的精准定量及同位素比值分析。此外，X射线荧光光谱法（XRF）作为一种无损、快速的现场检测技术，无需复杂的样品前处理，可直接对固体污泥进行扫描，虽然精度略低于湿化学法，但在工程现场快速筛查和应急监测中具有独特优势。

1.3 重金属形态分析技术的突破

仅测定重金属的总含量往往无法真实反映其在环境中的行为与风险，因为不同化学形态的重金属具有截然不同的生物毒性和迁移能力。例如，六价铬（Cr(VI)）的毒性远高于三价铬（Cr(III)），而甲基汞的毒性远大于无机汞。因此，重金属形态分析成为当前研究的热点。常用的分离技术包括连续提取法（BCR法、Tessier法）和色谱联用技术。连续提取法通过将重金属划分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物/硫化物结合态及残渣态，来模拟重金属在环境中的释放过程，操作相对简单但存在提取剂选择性差的问题。色谱联用技术则更为精准，如液相色谱-原子吸收光谱法（HPLC-AAS）、液相色谱-电感耦合等离子体质谱法（HPLC-ICP-MS）及气相色谱-质谱法（GC-MS），能够实现对特定化学形态（如无机砷、有机砷、甲基汞等）的分离与定量化。此外，同步辐射X射线吸收精细结构谱（XAFS）等先进物理表征技术，能够在原子尺度上揭示重金属在污泥矿物表面的配位环境，为理解重金属的固定机制提供了微观依据。

2 污泥重金属污染风险评估体系与方法

2.1 基于总量的单指标评价方法

早期的风险评估主要依赖于重金属的总含量，通过与国家或地方制定的土壤环境质量标准、污泥农用标准进行对比，判断是否超标。单因子指数法（PI法）是最基础的评价工具，通过计算某污染物的实测浓度与其标准限值的比值，直观反映该元素的污染程度。若PI值小于1，表明未超标；大于1则表明超标。该方法操作简单、概念清晰，广泛应用于初步筛选。然而，单因子指数法忽略了各重金属之间的相互作用，且未能考虑背景值的影响，容易将天然本底较高的地区误判为污染区。为了弥补这一缺陷，研究者引入了内梅罗综合指数法，通过统计最大值和平均值来综合反映整体污染水平，但其权重分配的主观性依然存在。

2.2 基于背景值的累积与生态风险评价

为了更客观地评价人为活动对环境的干扰，基于背景值的评估方法得到了广泛应用。地积累指数法（Igeo）由德国学者Muller提出，通过比较污泥中重金属含量与当地土壤背景值的比值，并引入一个修正系数，有效区分了自然来源和人为来源的污染。该方法在区域污染调查中表现优异，能够较好地反映历史累积效应。潜在生态危害指数法（RI法）则进一步引入了重金属的毒性响应系数，将不同重金属的毒性差异纳入评价体系，计算出各元素的单项生态风险指数及综合潜在生态风险指数。RI法不仅能识别主要污染元素，还能对风险等级进行分级（如低度、中度、高度、极强），在指导风险管控方面具有重要价值。此外，生物毒性测试法通过培养敏感生物（如发光细菌、水蚤、蚯蚓、植物种子等），直接观测污泥浸出液或添加污泥对生物生长、繁殖及代谢的影响，从生物学角度直观反映重金属的实际危害，弥补了化学分析无法体现生物有效性的缺陷。

2.3 综合风险模型与不确定性分析

随着研究的深入，单一的评估模型已难以满足复杂环境下的需求，综合风险模型应运而生。概率风险评估（Probabilistic Risk Assessment, PRA）通过蒙特卡洛模拟等方法，将输入参数（如重金属含量、暴露途径、受体敏感性等）视为随机变量而非固定值，从而得到风险发生的概率分布，能够更准确地反映评估结果的不确定性。模糊综合评价法则利用模糊数学理论，处理重金属风险评价中界限不清、信息不完全的问题，通过建立隶属度函数和权重矩阵，实现定性到定量的转换。此外，源解析模型（如PMF模型、PCA模型）常被用于追溯重金属的来源，结合风险评估结果，可以明确主要污染源，为制定针对性的减排措施提供科学依据。在实际应用中，往往需要结合多种方法，构建“总量控制+形态分析+生态毒性+源解析”的多维评价体系，以确保评估结果的全面性与可靠性。

3 当前挑战与未来发展趋势

3.1 现有检测与评估体系的局限性

尽管污泥重金属检测与风险评估技术已取得长足进步，但仍面临诸多挑战。首先，检测技术方面，形态分析的标准方法尚不统一，不同实验室采用的提取程序差异较大，导致数据可比性差；其次，对于新型污染物（如纳米材料、有机重金属复合物）的检测手段尚显不足；再次，风险评估方面，现有的标准限值多基于总含量制定，忽视了重金属形态及生物有效性的差异，可能导致“过度预警”或“漏报”；最后，多数评估模型是基于短期实验数据建立的，缺乏对重金属在土壤中长期累积、转化及复合污染效应的动态跟踪，难以预测长期的生态后果。

3.2 新技术融合与智能化评估

未来，污泥重金属检测与风险评估将向高精度、高通量、智能化方向发展。在检测技术层面，便携式高灵敏度检测设备（如手持式XRF、激光诱导击穿光谱LIBS）将逐步普及，实现现场实时监测；基于微流控芯片和纳米传感器的新型检测技术有望实现痕量重金属的超灵敏、原位检测。在形态分析领域，同步辐射技术、冷冻电镜等先进表征手段将更深入地应用于揭示重金属在污泥颗粒表面的微观赋存状态。在风险评估方面，大数据与人工智能技术的应用将成为突破口。通过整合海量的环境监测数据、土壤理化性质数据及生物毒性数据，利用机器学习算法构建预测模型，可以实现对重金属迁移转化规律的精准模拟和风险等级的智能预测。此外，结合基因组学、转录组学等组学技术，可以从分子水平解析重金属胁迫下微生物群落的响应机制，为评估生态风险提供更深层的理论支撑。

3.3 标准化建设与全生命周期管理

为了提升评估的科学性与权威性，亟需建立统一的污泥重金属检测与风险评估标准体系。这包括规范样品采集、前处理、形态分析及毒性测试的操作规程，统一参考背景值及毒性系数，消除因方法差异带来的数据偏差。同时，应推动从“末端治理”向“全过程管控”转变，建立涵盖污泥产生、运输、处理、处置及资源化利用的全生命周期风险评估机制。在资源化利用环节，应根据风险评估结果实施分类分级管理，对于高风险污泥严格限制土地利用，低风险污泥则可在严格控制条件下用于土地改良或建材生产。通过构建闭环管理体系，实现污泥重金属风险的源头削减、过程控制与末端治理的有机结合，最大限度地降低其对生态环境和人体健康的潜在威胁。

4 结语

污泥重金属残留检测与污染风险评估是保障水环境安全、推动污泥资源化利用的关键环节。本文系统综述了从样品前处理到总含量及形态分析的检测技术进展，详细评述了基于总量、背景值及生物毒性的多种风险评估方法，并指出了当前研

究在标准统一、动态评估及新技术应用方面存在的不足。研究表明,单一的检测手段或评估模型难以全面揭示污泥重金属的真实风险,必须采取多技术融合、多维度评价的综合策略。未来,随着检测技术的不断革新、评估模型的智能化升级以及全生命周期管理理念的深入贯彻,我们有理由相信,能够建立起

更加精准、科学、高效的污泥重金属风险管控体系。这不仅有助于破解污泥处置难题,实现废弃物的资源化循环利用,更将为守护绿水青山、建设生态文明提供坚实的技术保障。面对日益严峻的环境挑战,持续深化相关研究,加强跨学科合作,将是推动该领域可持续发展的必由之路。

参考文献:

- [1] 杨扬,郭丹,张倩,等.金银花中重金属残留的现状和质量控制研究进展[J/OL].现代药物与临床,1-6[2026-05-24].
- [2] 卢森华,陈宇,樊文研,等.中药外源性有害残留物检测技术及风险评估方法研究进展[J].中南农业科技,2026,47(05):246-251.
- [3] 张家欢,张瑞雪,张文静,等.发光细菌法检测新污染物联合毒性的研究进展[J/OL].环境化学,1-16[2026-05-24].
- [4] 张冕,刘帅,王珊珊,等.微塑料—氯霉素复合污染物对斑马鱼肠道微生物群落结构的影响[J/OL].水生生物学报,1-8[2026-05-24].
- [5] 袁海语,张然,李其烁,等.我国农田土壤抗生素来源贡献解析与累计含量预测[J/OL].环境科学,1-21[2026-05-24].