

工业废水中有机污染物检测方法优化 及其环境影响评估

刘小艳^{1*}, 张晓霞², 王 汛³

(1. 陕西瑞境检测技术有限公司, 西安 710000; 2. 陕西省凯伟胜检测技术服务有限公司, 咸阳 712000;
3. 西部第三方检测集团(陕西)有限公司, 西安 710016)

摘要: 工业废水中有机污染物种类繁多, 传统检测方法在灵敏度和适用性方面存在不足, 难以满足环境标准要求。本文分析不同工业废水中有机污染物的分布特征及环境风险, 评估现有检测技术的局限性, 并提出优化方向, 包括高灵敏度仪器应用、前处理技术改进及检测自动化, 研究污染物对水生态的影响、在土壤与地下水中的迁移特性及废水处理去除效果, 旨在提高检测精度与效率, 为污染监测与治理提供技术支持, 推动环境保护发展。

关键词: 工业废水; 有机污染物; 环境影响评估; 污染治理

0 引言

工业废水中有机污染物的排放对环境造成潜在威胁, 其在水体、土壤及地下水中的迁移与转化过程复杂, 使得环境影响评估具有较大不确定性。现有检测技术在灵敏度、准确性及适用性方面存在局限, 难以满足精细化监测需求。本文综述工业废水中有机污染物的分布特征, 分析现有检测方法的应用现状及优化方向, 并探讨污染物的环境影响评估方法。本文旨在为污染物检测技术的优化提供思路, 推动环境监测精度提升, 为工业废水治理与环境保护提供参考。

1 工业废水中有机污染物的检测需求分析

1.1 不同工业类型废水中有机污染物的特点

工业废水中有机污染物的种类和浓度差异大, 常见的有机污染物有苯系物、酮类、醛类、氯代烃等, 具有较强的毒性和持久性。典型的苯、甲苯、二甲苯等苯系物的分子结构为苯环, 具有较高的稳定性且难以降解^[1-3]。

1.2 有机污染物的浓度分布及其对环境的潜在风险

有机污染物在工业废水中的浓度分布受生产工艺、原料使用量及废水处理过程的影响。化工废水苯系物和酮类有机污染物浓度较高, 不仅毒性强, 还易挥发, 对空气质量和水体生态系统构成双重威胁^[4-6]。制药废水中药物中

间体及其代谢产物的生物累积性强, 对水生生物和土壤微生物影响较为明显。纺织废水中染料和助剂降解缓慢, 易造成水体色度污染且部分染料成分具有致癌和致突变性。

1.3 现有检测方法的适用性与不足

气相色谱法(GC)被广泛用于检测挥发性有机污染物(苯、甲苯等)。采用GC时样品需进行前处理, 如萃取和浓缩, 这在某些情况下会导致分析结果的不确定性。GC对于非挥发性或极性较强的化合物检测效果较差, 难以应对多种有机污染物的并行检测。液相色谱法(HPLC)常用于分析非挥发性和极性较强的有机污染物, 如酮类、醛类和有机酸等, 具有较好的样品处理能力, 可处理复杂水样, 但灵敏度较低, 需较长分析时间^[7]。HPLC中溶剂的选择和色谱柱的更换频率较高, 增加实验成本和操作难度。

2 有机污染物检测方法的优化方向

2.1 分析仪器选择与检测灵敏度提升

针对废水中复杂的有机污染物, 选择合适的仪器并提升其灵敏度可以明显提高检测的准确性和效率。GC适用于挥发性有机污染物的检测, 而HPLC适用于极性或非挥发性的有机污染物。为了提升灵敏度可以采用更高效的分离柱和优化的色谱条件, 使用HP-5MS或DB-624等极性固定相色谱柱可以有效提高苯、甲苯等挥发性污染物与复杂基质的分离度, 以此提高检测灵敏度。

* 通信作者: 刘小艳, 环境检测工程师, 研究方向为环境监测。E-mail: 617837518@qq.com

质谱(MS)的结合应用中凭借串联质谱(MS/MS)可以提高定性分析的精确度, GC-MS/MS可以在选择性离子监测模式(SIM)下检测极低浓度的污染物, 信噪比(S/N)达到大于1000, 远高于传统GC或HPLC的检测灵敏度^[8-9]。检测灵敏度的量化常采用S/N作为灵敏度指标, 其公式为:

$$S/N = \frac{C_{\text{peak}}}{\sigma_{\text{noise}}} \quad (1)$$

其中, C_{peak} 为目标峰值的浓度, σ_{noise} 为背景噪声的标准差。灵敏度提升的过程可以凭借提高S/N值来实现^[10]。

在SIM下, GC-MS/MS的检测灵敏度可以达到0.1~0.5 ng/L, 明显高于常规GC分析的检测极限。在提高分析仪器检测灵敏度的过程中, 信号增强技术的应用也具有重要作用。例如, 采用基质辅助激光解吸电离质谱(MALDI-MS)可以有效减少背景干扰提高检测的特异性。此外表面增强拉曼光谱(SERS)技术被引入到有机污染物检测中, 该技术基于纳米材料的局部电磁场增强效应, 能够显著提高痕量有机污染物的检测灵敏度。例如, 使用金属纳米颗粒修饰的SERS基底, 能够检测到 10^{-9} mol/L甚至更低浓度的多环芳烃(PAHs)和多氯联苯(PCBs)。

2.2 样品前处理方法的优化

复杂基质或低浓度污染物的分析中, 样品前处理是影响有机污染物检测精度和灵敏度的关键步骤, 优化前处理方法可以有效去除干扰成分和富集目标污染物, 提高检测灵敏度。固相萃取(SPE)是目前最常用的前处理技术之一, 选择不同的萃取柱材质和优化pH和溶剂以及萃取时间等条件可以提高回收率和富集效率^[11]。在复杂废水样品的前处理过程中, 分子印迹固相萃取(MIP-SPE)技术表现出良好的选择性和富集能力。该技术通过设计与目标污染物结构匹配的分子印迹聚合物(MIP)作为吸附材料, 实现对特定污染物的选择性富集, 提高检测的专一性。此外, 基于纳米材料的固相微萃取(SPME)技术也被广泛应用。纳米纤维或碳纳米管修饰的涂层能够提供更大的比表面积, 提高萃取效率和检测灵敏度。对于非极性或非脂溶性有机污染物, 可以采用液-液萃取(LLE)前处理方法。LLE过程中选择氯仿、二氯甲烷等合适的溶剂可以实现污染物的高效分配^[12], 以此增加目标污染物的回收率和浓缩倍数。

2.3 检测过程中的自动化与高通量化改进

面对大量样品时手动操作无法满足工业废水中有机污染物检测的高效率和高精度要求, 检测过程的自动化和高通量化是提升检测能力和效率的关键^[13]。自动化系统可以设定样品注入的精确时间和量, 以此保证分析结果的稳定性。高通量分析技术采用多通道色谱系统或多个检测器阵

列, 可以同时处理多个样品, 提高工作效率。高效液相色谱-在线固相萃取(HPLC-online SPE)技术能够实现样品的自动富集、净化和分析, 大幅减少人工操作误差, 提高数据的重复性和准确性。此外, 多维色谱系统(2D-LC和GC×GC)被广泛用于复杂基质的污染物分析, 通过在第一维和第二维色谱柱之间切换, 可以提高目标污染物的分离度。

3 环境影响评估方法的应用与发展

3.1 有机污染物对水生生态系统的危害分析

有机污染物对水生生态系统的危害主要体现在对水生生物的直接毒害作用、食物链的污染以及生态系统的破坏。有机污染物如苯、甲苯、农药等会凭借水体的摄入进入鱼类、贝类等生物体内, 影响其生长、繁殖和存活。许多有机污染物不仅具有急性毒性, 还可能引起慢性影响, 导致生物体的遗传突变、免疫系统抑制等。这些污染物还可能凭借食物链传递给其他生物, 最终影响到人类健康^[14-18]。

水体污染物的毒性评估通常用半数致死浓度(LC₅₀)来反映。LC₅₀是指在某一浓度下, 可以致死50%实验生物的污染物浓度。LC₅₀计算公式为:

$$LC_{50} = \frac{N_t - N_0}{N_{\text{max}} - N_0} \times C_t \quad (2)$$

其中, N_t 是实验结束时死亡的个体数, N_0 是实验初期的个体数, N_{max} 是实验组可能的最大死亡个体数, C_t 是污染物的浓度。凭借公式(2)可以定量评估水生生物对某一污染物的敏感度, 从而为环境保护与污染控制提供科学依据。例如苯对某些鱼类的LC₅₀值为4.5 mg/L, 说明当苯浓度达到4.5 mg/L时, 50%的鱼类会死亡。不同污染物对水生生物的LC₅₀数据见表1^[19]。

表1 不同污染物对水生生物的LC₅₀数据

污染物	水生生物	LC ₅₀
镉(Cd)	金鱼	2.13 mg/L
2,4,6-三氯酚(TCP)	摇蚊幼虫	9.29 mg/L
硝基苯(nitrobenzene)	摇蚊幼虫	98.34 mg/L
酰胺类除草剂	克氏原螯虾	11.9 μg/L
镍(Ni)	鲤鱼鱼种	35.0 mg/L

3.2 有机污染物在土壤与地下水中的迁移行为

污染物在土壤中的迁移受到土壤有机质含量、孔隙度、pH值等的物理化学特性以及污染物的溶解度、挥发性等因素的影响。土壤中的迁移过程中污染物受到物理吸附的影响, 还会受到化学降解、生物降解的作用^[20]。土壤污染物的迁移行为用分配系数(K_d)来表征, 描述污染物在土壤与水之间的分配关系, K_d 的计算公式为:

$$K_d = \frac{C_{\text{solid}}}{C_{\text{liquid}}} \quad (3)$$

其中, C_{solid} 为土壤中污染物的浓度, C_{liquid} 为水相中污染物的浓度。较高的 K_d 值表示污染物倾向于被土壤吸附而不是溶解在水中, 这使得污染物在土壤中的迁移受到抑制, 且在短期内不会明显影响地下水质量。

污染物的地下水迁移行为由水力学控制, 尤其是溶解度、分子扩散等因素。地下水中的污染物传播速度受多重因素影响, 可用达文模型描述地下水中污染物的迁移:

$$v = \frac{D}{\phi} \times \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} \quad (4)$$

其中, v 为污染物的迁移速度, D 为污染物的扩散系数, ϕ 为地下水的孔隙度, C_{in} 和 C_{out} 分别为进入和排出地下水中的污染物浓度。公式(4)可以量化污染物在地下水中的迁移速度和分布规律, 帮助评估地下水污染的扩展程度和时间。

3.3 废水处理过程中有机污染物的去除效果评估

废水处理过程中有机污染物的去除效果直接决定了污水处理厂的处理效率和排放水质。有效的废水处理不仅能去除水中的污染物, 还能避免污染物进一步污染环境。废水处理技术包括物理法(吸附、膜分离)、化学法(氧化还原反应、化学沉淀)和生物法(好氧、厌氧生物降解)^[21], 每种方法的效果评估用去除率(%)来反映, 其计算公式(5)如下:

$$\text{去除率} = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, C_{in} 为污染物的初始浓度, C_{out} 为处理后浓度。去除率反映了处理技术对污染物去除的效果, 而污染物的去除效果还受到水质、处理时间、技术条件等多种因素的影响。活性炭吸附过程中苯类化合物、甲苯、二甲苯等挥发性有机物具有较高的去除率, 生物处理适用于去除可生物降解的有机物但对于难降解的污染物, 其去除效果相对较差。

4 结论

本文分析了工业废水中有机污染物的分布特征, 评估现有检测技术的局限性, 并提出优化方向。研究表明, 传统检测方法难以满足精细化监测需求, 采用 HPLC-MS 和 GC-MS 等技术可显著提高检测精度和灵敏度。此外, 优化前处理方法与自动化检测可提升检测效率。环境影响评估结果表明, 有机污染物在水体、土壤及地下水中的迁移特性对生态系统具有长期影响。未来需进一步完善高通量检测技术, 结合智能分析手段, 提高污染监测与治理的精准度。

参考文献

[1] 王琰. 县域工业项目环境影响评价效果评估实证研究——

- 以闻喜县为例[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(2): 76-78.
- [2] 张志, 田学军, 张青, 等. 天然气接收站建设项目环境影响评估与风险防范措施研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(4): 156-159.
- [3] 李春燕. 化工建设项目环境影响技术评估工作要点探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(1): 191-194.
- [4] 付良哲. 绿色建筑施工材料的选择与环境影响评估[J]. 居舍, 2025, (4): 39-41.
- [5] 丁玲艳, 郭方, 梁楠, 等. 电芬顿法降解电子工业废水过程初步研究[J]. 化学工程师, 2025, 39(1): 47-52.
- [6] 柳文奎. 海水养殖中沉积物污染物的来源解析与环境影响评估[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(12): 177-179.
- [7] 范嘉易, 邢薇, 周光鑫, 等. 异化铁还原在工业废水处理领域的研究展望[J]. 给水排水, 2024, 60(12): 154-161.
- [8] 武晓红, 刘坤, 张晓. 微生物在工业废水处理过程中的应用[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 19-23.
- [9] 霍本龙. 化学检测技术在工业废水检测中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 132-134.
- [10] 王玉升. 造纸工业废水治理技术研究[J]. 华东纸业, 2024, 54(12): 46-49.
- [11] 姜娟. 制药工业废水处理技术的优化与环保策略[J]. 化工管理, 2024, (32): 65-67, 74.
- [12] 张环惠. 臭氧催化氧化工艺在工业废水合规管理中的应用[J]. 化工管理, 2024, (31): 77-85.
- [13] 李瑞鹏, 李亚峰. Fenton氧化法处理工业废水的研究及应用进展[J]. 辽宁化工, 2024, 53(10): 1590-1593.
- [14] 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 等. 3种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 140-146.
- [15] 梁家伟. 典型高浓度工业有机废水处理系统运行性能与功能微生物群落[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [16] 陈晗, 秦磊, 黄燕, 等. 金属有机骨架材料在工业污染物吸附中的应用及研究进展[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 668-674.
- [17] 雷学博, 刘慧景, 丁赫宇, 等. 用于降解印染废水中有机污染物的光催化剂的研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40(5): 681-696.
- [18] 廖腾飞. 工业废水处理技术及其应用[J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 71-73.
- [19] 邓丽娜. 基于化学检验技术的工业废水成分检测方法[J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(9): 51-53.
- [20] 郝永永. 有机工业废水中难降解 DOM 解析及其高级氧化差异性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- [21] 宋颖, 姜周平, 叶剑, 等. 含吡啶类污染物有机废水处理研究进展[J]. 化工环保, 2024, 44(6): 780-787.