

活性炭吸附工艺对微污染水有机物的去除效能优化研究综述

周敏

湘潭中环水务有限公司, 湖南郴州, 423000;

摘要: 微污染水中有机物成分复杂、毒性强且难降解, 传统活性炭吸附工艺存在吸附选择性差、孔隙匹配度低、参数调控不科学等局限, 制约去除效果。本文针对该困境, 从材料改性、工艺参数调控、组合工艺协同三方面提出优化路径, 通过氧化、还原、负载等改性提升活性炭吸附效能, 结合水质特性优化 pH 值、投加量等参数, 构建多工艺协同体系强化净化效果。实践表明, 优化工艺可拓展多领域应用场景, 有效控制经济成本, 提升环境效益, 能精准适配不同污染类型微污染水治理需求, 为饮用水安全、工业废水处理及再生水回用提供可靠技术支持。

关键词: 活性炭吸附; 微污染水; 有机物去除; 工艺优化; 改性处理

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.087

引言

随着工业生产与城市化进程加快, 微污染水问题日益凸显, 天然有机物降解产物、工业微量有毒污染物等残留有机物进入水体, 引发水质恶化、生态失衡等连锁反应, 严重威胁人体健康与水资源循环利用。在此背景下, 开展活性炭吸附工艺优化研究, 探索靶向提升有机物去除效能的技术路径, 对于突破治理困境、保障饮用水安全、推动水处理行业绿色可持续发展具有重要现实意义。本文系统分析有机物去除的现实困境, 阐述工艺优化路径及实践价值, 为微污染水治理提供理论与技术参考。

1 有机物去除的现实困境

1.1 微污染水有机物的污染特征与危害

微污染水中有机物来源广泛, 天然有机物微生物降解产物、工业生产排放微量有毒污染物、生活污水中未完全降解残留物质等, 成分复杂且污染特征显著。刘明庆等^[1]指出, 微污染水中有机物种类繁多, 涵盖天然大分子有机物与人工合成微量污染物, 且多数具有难降解、强毒性特点。梁晓君等^[2]进一步指出, 当前给水厂普遍采用的混凝-沉淀-过滤等常规处理工艺对新兴有机污染物去除效率普遍低于 30%, 难以有效控制其在饮用水中的残留风险, 凸显了传统工艺在应对微污染水有机物方面的技术短板。氯消毒后, 三卤甲烷生成潜能 (THMFP) 可达 100-300 $\mu\text{g/L}$, 严重威胁饮用水安全。这从也进一步印证了微污染物浓度低但危害深远的特点。此类有机物浓度低微, 毒性强、化学结构稳定, 在水体中难以自然降解, 易长期累积形成潜在污染隐患, 导致水体产生异味、色度升高, 直接影响水质感官性状。此外, 它们迁移扩散能力强, 可随水流快速传播, 随水流快速传播,

污染范围不断扩大。传统水处理工艺缺乏微污染物的针对性处理机制, 难以对其高效去除。它们的长期存在会破坏水生生物生存环境, 干扰水生生态系统平衡稳定, 制约水资源循环利用, 对生态环境造成难以逆转的长远危害。当水中溶解性有机碳 (DOC) 浓度持续高于 5mg/L 时, 可导致水体溶解氧下降 15%–30%, 显著抑制鱼类及底栖生物的生长繁殖; 部分人工合成有机污染物 (如双酚 A、邻苯二甲酸酯类) 在纳克/升级 (ng/L) 浓度下即可干扰水生生物内分泌系统, 造成生殖异常与种群衰退。例如, 在我国南方某微污染河流中, 检出 17 α -乙炔基雌二醇 (EE2) 浓度达 8.3ng/L, 已足以诱导雄性鱼类雌化, 局部水域鱼类性别比例失衡率达 1:4 (雌:雄), 严重威胁生物多样性。如下图所示:



图 1: 微污染水有机物来源图

1.2 活性炭吸附工艺的应用局限

活性炭吸附工艺因操作简便、成本可控, 成为微污染水处理的常用技术, 但传统工艺存在显著应用局限。材料层面, 普通活性炭表面以疏水官能团为主, 种类单一的特性使其对酚类、羧酸类极性有机物及烷烃、芳香烃类非极性有机物均吸附能力薄弱; 且孔径分布不合理, 与常见有机物分子尺寸匹配度低, 易造成吸附位点浪费或污染物无法进入孔隙, 大幅降低吸附效率, 在多组分

复杂微污染体系中难以高效吸附目标污染物。工艺运行层面,传统工艺缺乏科学的针对性参数调控,吸附剂投加量、接触时间等关键条件多凭经验设定,未随水体污染负荷动态调整,导致活性炭吸附饱和快、再生周期短,既增加了吸附剂更换与再生的运行成本,还易因吸附剂提前失效引发出水水质波动,无法稳定实现深度净化。

2 吸附工艺的优化路径

2.1 活性炭材料的改性优化

综上所述,普通活性炭难以满足微污染物的去除需求。活性炭吸附工艺的优化路径主要分为活性炭材料改性、工艺运行参数调控两大核心方向,通过定向优化实现吸附效能的显著提升。材料改性是提升吸附性能的核心手段,该方式操作简便、成本可控且适配性强,能在多组分污染体系中优先吸附目标污染物,提升吸附选择性。其中氧化改性采用硝酸、过氧化氢等温和氧化剂处理,可增加活性炭表面含氧官能团,强化对极性污染物的吸附能力;还原改性通过惰性或含氮试剂调整表面官能团占比,增强对非极性有机物的吸附效果;负载改性则在活性炭表面负载金属氧化物或生物活性物质,还可利用农业废弃物制备磁性生物炭,既提升吸附容量,又实现材料快速分离,减少流失与运行成本。

2.2 工艺运行参数的调控优化

工艺运行参数的科学调控是充分发挥吸附效能的关键,需结合微污染水的污染物类型、浓度及水质特性灵活调整。pH值调控通过改变活性炭表面电荷与污染物形态强化吸附作用,酸性条件利于吸附碱性有机物,碱性条件则适配酸性有机物;吸附剂投加量需经梯度试验确定最佳比例,避免投加不足导致去除不彻底或投加过量造成浪费;接触时间需契合吸附动力学特性,兼顾传质吸附效率与设备能耗。邵军峰^[3]等以引江济淮微污染地表水厂为研究对象的试验证实,将臭氧投加量控制在1.2-1.5mg/L、活性炭吸附接触时间维持在25-30min时,原水COD与UV254去除率分别提升18.3%、22.1%,出水水质显著改善。通过对关键参数的系统优化与动态调整,可构建适配不同污染场景的运行模式,持续提升有机物去除的稳定性与高效性。

2.3 组合工艺的协同优化

在工艺处理微污染水方面,已有研究表明臭氧与活性炭联用具备良好的净化效果与稳定性。夏玉龙^[4]通过试验发现,臭氧-活性炭组合工艺对COD的平均去除率达72.3%,对UV254的去除率更高达85.1%,出水水质指

标稳定达到标准要求,凸显了该工艺在氧化改善有机物可吸附性与生物降解协同方面的优势。兰亚琼^[5]等学者研究也证实臭氧-生物活性炭工艺对微污染水有机物去除效果显著,但该组合工艺对卤乙酸(HAAs)去除率仅8.1%-17.7%,还会少量生成溴代乙酸。

针对含悬浮颗粒物较多、胶体含量高的微污染水,为进一步缓解活性炭孔隙堵塞问题,还进一步开发出了混凝-活性炭组合工艺,混凝预处理投加混凝剂形成絮体,去除水体中悬浮物、胶体及部分大分子有机物,降低非目标污染物与有机物的竞争,延长吸附剂使用寿命,提升整体处理系统运行效率与稳定性。王文琴^[6]等人的研究显示,采用混凝与活性炭吸附联用处理微污染湖水时,其对浊度、COD、氨氮和总磷的去除率分别可达95.4%、65.7%、80.3%和83.6%,证明活性炭在深度吸附净化中作用显著。

活性炭与膜分离组合工艺依托膜组件高精度截留作用,浓缩水体中污染物,延长其与活性炭接触时间,增强吸附驱动力,精准拦截未被吸附的微小有机物及胶体颗粒,进一步提升出水水质纯度。沈珺等^[7]研究表明膜分离与活性炭吸附联用技术可通过协同作用强化有机物去除效果,弥补单一工艺在深度净化中的不足。采用超滤膜与颗粒活性炭联用工艺对水中腐殖酸、微量农药残留的总去除率达92%以上,较单一活性炭工艺提升18%,且出水DOC浓度稳定控制在1.5mg/L以下,膜组件清洗周期延长2倍,显著降低运维成本。

3 工艺优化的实践价值

3.1 应用场景的适配拓展

工艺优化后活性炭吸附工艺的实践价值首要体现在应用场景的大幅拓展,适配性显著提升,可满足多领域微污染水净化的差异化需求。在饮用水源水净化中,能靶向去除有毒有害污染物,解决水质感官问题,筑牢饮水安全防线;工业废水预处理中,可降低有机污染负荷,减少难降解物质对后续工艺的抑制,提升处理达标率与稳定性;再生水深度处理中,能去除常规工艺难以净化的残留有机物,提升出水品质,适配工业、农业、城市绿化等回用需求。该工艺对不同污染程度、污染物类型的微污染水均具良好适应性,且操作简便、无需复杂设备升级,运维便捷、成本可控,可灵活适配大型市政水处理厂的规模化应用与中小型工业废水处理站的个性化需求,为各类场景提供稳定可靠的技术支撑。

3.2 经济成本的合理控制

工艺优化从全流程降低水处理成本,彰显显著经济

价值,为不同规模企业提供高性价比方案。活性炭改性优化:依托采用硝酸、过氧化氢等低成本试剂材料改性,以玉米秸秆、稻壳等廉价农业废弃物为原料制备活性炭,实现废弃物资源化削减吸附剂生产与采购成本。工艺参数优化:结合污染物浓度、水质特性,科学调控活性炭投加量、反应时间等关键条件,避免吸附剂浪费与能源损耗,延长吸附剂饱和周期及设备寿命,减少运维资金与人力投入。

臭氧-活性炭组合工艺凭借其高效协同机制和良好的运行稳定性,已成为当前微污染水处理中兼具技术先进性与经济可行性的较优选择。选取代表性工艺进行比较,详见图2,并对臭氧/H₂O₂、UV/H₂O₂进行分析发现,从运营成本来看,三者差异显著:优化后的臭氧-活性炭组合工艺处理1000m³微污染水的运行成本约为85-120元,明显低于其他两种高级氧化工艺;臭氧/H₂O₂工艺成本居中(110-150元/1000m³),主要受限于较高的药剂消耗;而UV/H₂O₂工艺成本最高(130-180元/1000m³),主要源于设备运行的高能耗。由此可见,臭氧-活性炭组合工艺不仅在经济性上具有显著优势,还能通过氧化—吸附—生物降解的协同作用有效弥补单一工艺的不足,更适用于大规模、常态化的微污染水治理场景。

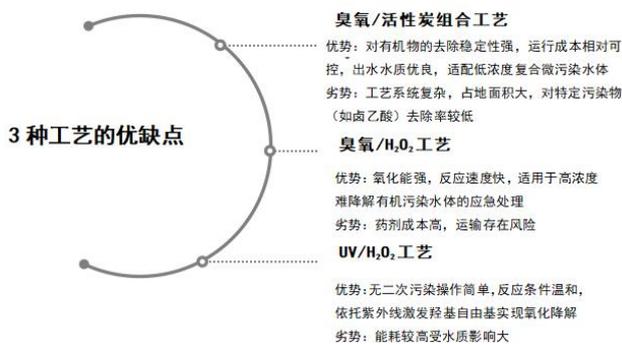


图2:三种组合工艺的优缺点对比图

3.3 环境效益的持续提升

工艺优化不仅提升了有机物去除效率,更显著增强了水处理全过程的环境友好性。通过高效削减难降解有毒有机物,有效降低饮用水消毒副产物生成风险,保障饮水安全;在工业废水与再生水处理中,减少有毒物质排放和化学药剂依赖,抑制卤代烃等二次污染物形成,减轻受纳水体生态压力。同时,改性材料多采用农业或

工业废弃物制备,工艺条件温和、能耗低,实现资源循环利用与污染防治协同,为饮用水安全、工业废水达标排放及高品质再生水回用提供了绿色、可持续的技术支撑。

4 结语

活性炭吸附工艺优化为微污染水中有机物去除提供有效解决方案,材料改性、参数调控与工艺组合的综合措施,突破传统工艺性能局限,提升处理效能与应用价值。优化后工艺具备适配性强、成本可控、环境友好等优势,在饮用水净化、工业废水处理等领域展现广阔应用前景。未来需进一步探索低成本改性技术,简化工艺流程,提升运行稳定性;强化不同污染场景针对性优化,推动技术标准化与规模化应用。

参考文献

- [1]刘明庆,申静秀,范梦婕,等.微污染有机物深度净化技术进展[J].现代化工,2020,40(08):31-34+38.
- [2]梁晓君,李秋,王芝玉,等.给水厂常规处理工艺对新污染物的去除及优化[J].中国给水排水,2025,41(13):56-62.
- [3]戴伟强,张小龙,黄庭,等.工业园区废水中污染物快速溯源及毒性预警分析[J].净水技术,2025,44(12):118-130+197.
- [4]夏玉龙.臭氧-活性炭联用工艺在微污染水源水质改善中的净化效果试验分析[J].工程技术研究,2025,10(15):230-232.
- [5]兰亚琼,刘锐,马正杰,等.臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果[J].环境科学,2018,39(12):5541-5549.
- [6]王文琴,王淑静,吴彬.混凝和活性炭吸附联用处理微污染源湖水研究[J].广州化工,2021,49(02):86-88.
- [7]沈璐,刘亮,王哲,等.城镇污水处理厂污染物排放标准的科学性实施路径[J].中国给水排水,2025,41(16):6-12.

作者简介:周敏(1993.10-),女,汉族,湖南郴州,工程师,研究生,主要研究:净水工艺,水处理,智慧水务。