

废水中药品残留的处理技术与经济性研究分析

侯西明

山东省实验中学 山东淄博

【摘要】药品残留作为典型的新兴污染物，广泛存在于医院废水、生活污水及制药工业废水中，具有环境持久性、生物毒性及抗药性风险。传统处理工艺难以有效去除其微量成分，亟需发展高效治理技术。本文综述了目前主要的药品残留处理技术，包括生物处理、吸附、膜分离及高级氧化等，并结合其技术特点与经济性进行系统比较，探讨了适用于不同场景的优化路径与发展趋势。

【关键词】药品残留；废水处理；经济性；污染治理

【收稿日期】2025 年 5 月 8 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.aes.20250015

Treatment technologies and economic analysis of pharmaceutical residues in wastewater

Ximing Hou

Shandong Experimental High School, Zibo, Shandong

【Abstract】As a typical class of emerging contaminants, pharmaceutical residues are widely present in hospital effluents, domestic sewage, and pharmaceutical industrial wastewater. They pose significant environmental persistence, biological toxicity, and risks of antimicrobial resistance. Traditional treatment processes are often ineffective in removing these trace pollutants, necessitating the development of more efficient remediation technologies. This paper reviews the major current treatment methods for pharmaceutical residues, including biological treatment, adsorption, membrane separation, and advanced oxidation processes. A systematic comparison is made based on technical characteristics and economic feasibility, and optimized treatment strategies and future development trends for different application scenarios are discussed.

【Keywords】Pharmaceutical residues; Wastewater treatment; Economic feasibility; Pollution control

1 引言

随着人类对药品使用频率的持续上升，源自医院排水、居民生活污水以及制药工业废水中的药品残留物日益成为环境领域关注的焦点。这类污染物主要包括抗生素、激素、镇痛剂及精神类药物等，其结构复杂、化学性质稳定，常以痕量浓度持续释放至环境水体，形成“新兴污染物”中的一类典型代表。大量研究表明，药品残留可在水生环境中长期累积，不仅诱导抗药性基因的传播，还可能对水生生态系统造成毒性干扰，甚至通过饮用水途径对人体健康构成潜在威胁。然而，由于传统废水处理工艺（如活性污泥法、二级生化处理等）主要针对可生化降解有机物，对微量、稳定性强的药物类污染物去除效果有限，导致其广泛存在于二级出水及环境受纳水体中。

因此，开发并优化高效、可行的药品残留去除技术已成为当前水处理领域的研究热点之一。

本综述旨在系统梳理目前废水中药品残留的主要去除技术，包括物理分离、生物降解及高级氧化等方法，并结合其处理效率、运行成本、工艺可扩展性等方面进行经济性分析，探讨其工程应用的可行路径与未来发展方向，以期对药品残留污染控制提供理论支持与实践指导。

2 药品残留的来源与环境影响

2.1 药品残留的主要来源

随着医药与日化行业的快速发展，药品及个人护理用品（PPCPs）的使用量迅速增加，导致其残留物广泛存在于各类水体中^[1]。药品残留主要来源于人类和动物排泄、医疗机构废水、制药企业生产废

水以及畜禽养殖中大量使用的抗生素等药物。种类涵盖抗生素、激素、镇痛抗炎药、精神类药物、防晒剂、防腐剂等,成分涉及多种有机小分子和无机物。即使进入污水处理系统,由于其浓度低、结构复杂、降解性差,传统工艺难以彻底去除,部分药物仍可随出水排入自然水体^[2]。此外,处理污泥中也常富集药品残留,若作为肥料施用或填埋处理,仍可能通过径流或渗滤液再次进入环境,造成二次污染。这类污染物普遍具有低浓度、高生物活性、结构稳定和环境持久性等特征,可能对水生生物产生慢性毒性、干扰内分泌功能,并通过食物链累积,最终影响生态系统平衡与人类健康^[3]。

2.2 环境与生态风险

药品残留具有较强的环境持久性和结构稳定性,常规污水处理难以将其完全去除,导致其在水体中长期存在。部分抗生素可诱导环境微生物产生抗药性,进而加剧抗生素抗药性(AMR)的传播风险,已成为全球公共卫生的重要关注点。激素类化合物则可能干扰水生生物内分泌系统,影响其生殖发育,导致种群失衡。此外,即使在低浓度下,药品残留的长期暴露也可能引发水生生态系统的亚致死效应与生物多样性下降等隐性风险,亟需引起重视并加强规范治理^[4]。

3 废水中药品残留的处理技术

3.1 生物处理法

随着药品使用的日益普及,其残留物通过生活污水和工业废水进入水体,构成潜在的环境与健康风险。生物处理法作为废水处理中最传统且广泛应用的技术之一,在药品残留去除方面亦发挥关键作用。该法依赖微生物代谢,将污水中溶解或胶体态的有机污染物降解为无害物质,主要包括活性污泥法与膜生物反应器(MBR)法。前者通过曝气形成富含微生物的絮状体,具备吸附与降解双重功能;后者则依赖滤材表面的生物膜实现类似处理。对于部分易生物降解药物,如抗炎药、镇痛药及抗高血压药物,活性污泥法具有一定去除效果。然而,对结构稳定、具抗微生物活性的持久性药物(如部分抗生素和抗癌药物)处理效果有限,主要因其生物毒性抑制微生物代谢活性,降低降解效率。此外,该法对溶解氧、温度、污泥龄等运行参数高度敏感,易受环境波动影响微生物群落结构,进而影响处理效果

^[5]。相比之下,MBR在药品残留去除方面通常表现更优,尤其对易吸附或缓慢降解的药物(如雌激素类、布洛芬、扑热息痛)去除率较高,研究表明其对部分药物的去除效率可达60%~90%。但该系统对红霉素、卡马西平等持久性药物的去除仍存在不足,且膜污染问题在长期运行中难以避免,需定期清洗或更换,增加运维成本^[6]。

3.2 吸附技术

吸附法是目前处理药品残留废水中广泛应用的技术之一,具有操作简便、适应性强等优点。活性炭(包括粉末活性炭与颗粒活性炭)、生物炭和纳米材料为典型吸附介质。其中,活性炭因其比表面积大、微孔结构丰富,可通过范德华力、 π - π 作用、氢键及化学络合等机制高效去除抗生素、激素及精神类药物等微污染物。生物炭来源广泛、成本较低,表面含有丰富的官能团,可与药品残留发生络合作用或静电吸附,已成为一种可持续的替代材料。此外,纳米材料如纳米氧化铁、碳纳米管等,具有优异的比表面积和反应活性,适用于低浓度药物的高效去除。然而,该类吸附材料普遍存在吸附容量有限、易饱和的缺点,需通过热再生、化学再生等手段恢复吸附性能,增加运维成本^[7]。总体而言,吸附技术适用于药物浓度较低、组分复杂的废水处理场景,在经济性与技术成熟度方面具备推广潜力,但需合理选择材料以平衡处理效率与成本。

3.3 膜分离技术

膜分离技术,特别是纳滤(NF)与反渗透(RO),在去除废水中微量药品残留方面表现出优异性能。这两种核心工艺通过压力驱动方法进行物质的分离^[8]。纳滤膜孔径通常在1~10 nm,适用于截留大部分抗生素、激素类药物及其代谢产物,而反渗透膜则具有更高的选择性,可有效滤除小至0.0001 μ m的分子和离子,实现近乎完全去除。该技术的优势是其高效性和精确性,能够在分子级别上实现物质的精准分离,其可滤除小分子物质的特点确保了处理的高效与纯净度,使其在针对化学品和药物残留的去除率常可达90%以上。然而,膜技术仍面临膜污染、能耗高和运行成本高等挑战。长期运行过程中,有机物、无机盐和微生物在膜表面沉积,导致膜通量下降,需频繁清洗或更换。此外,系统初始投资大,尤其在反渗透系统中,对高压泵和能量回收系

统的依赖提高了整体造价与能耗。因此，膜分离更适用于高标准出水或药物浓度较高的末端深度处理阶段，需与其他技术协同优化其经济性与可持续性。

3.4 高级氧化技术（AOPs）

在处理废水中药品残留的多种技术中，高级氧化技术（AOPs）因其对难降解有机物的强氧化能力而备受关注。常见的 AOPs 包括芬顿氧化法，臭氧氧化，光催化氧化，电化学氧化等，均可产生具有极强反应活性的羟基自由基（·OH），可将药物分子断裂甚至彻底矿化为二氧化碳和水^[9]。例如，芬顿反应适用于含铁体系下的高效降解，而臭氧与 UV 联用则能提高反应选择性与反应速率。光催化氧化技术依托半导体材料，在光照条件下实现催化降解，具有清洁环保的优势。从经济性角度看，尽管 AOPs 在设备投资和运行成本上相对较高，但其出水水质优、反应时间短、对广谱污染物适应性强，长期运营中具有良好的性价比。近年来，借助纳米催化材料的引入及工艺组合优化（如芬顿+电化学、臭氧+光催化），AOPs 在药品废水深度处理中的效率和经济性持续提升^[10-12]。结合其他生化或物化技术联用，不仅能降低单一技术成本，还能实现对药物残留的高效控制，推动废水治理向绿色、可持续方向发展。

3.5 综合/新兴技术

为提高药品残留废水的去除效率并克服单一技术的局限，近年来综合与新兴处理工艺日益受到关注。其中，联合工艺如高级氧化技术（AOPs）与膜生物反应器（MBR）的耦合，能够在强化降解的同时提高出水水质稳定性，AOPs 高效破坏药物分子结构，MBR 则实现后续生物降解，二者协同作用显著提升系统总体去除率。此外，电化学氧化、微波辅助降解、低温等离子体等非传统技术因其无添加、反应速率快、可控性强等优点，逐步进入研究与工程试点阶段^[13]。电化学氧化可通过生成·OH 等强氧化剂实现对多种药物的矿化，而微波辅助与等离子体处理技术则表现出对难降解药物的快速破坏能力，尤其在抗生素和激素类药物处理方面具有潜力^[14]。尽管上述技术当前仍处于小试或中试阶段，设备成本与能耗问题尚未完全解决，但其高效、绿色的特点为未来废水深度处理提供了广阔的发展空间。

4 技术经济性对比与评价

4.1 技术对比

在废水中药品残留治理领域，技术路径多元，不同工艺在处理机制、适用对象、经济性与环境友好性方面差异显著。为科学选择合适技术方案，需综合考虑污染特征、出水要求、运行管理能力及区域经济条件（见表 1）。

表 1 废水种药品残留去除技术对比

技术类型	去除机制	药品去除效果	投资成本	运行成本	应用成熟度	适用场景与限制
活性污泥法	微生物降解	★	★	★★	高	适用于大流量、污染浓度低的生活污水；难以有效去除亲水性药物和抗生素。
MBR	生物降解+膜截留	★★★★	★★★★	★★	高	适合城市污水厂升级改造，对操作与维护要求较高。
活性炭吸附	物理吸附	★★	★★	★	高	适用于浓度波动大的应急处理；吸附饱和后需更换或再生，存在固废负担。
纳滤/反渗透（NF/RO）	分子筛分 + 静电排斥	★★★★★	★★★★★	★★★★	中	适合高标准排放或回用系统；浓缩液处理与膜污染是限制因素。
高级氧化工艺（AOPs）	自由基氧化（OH·、SO ₄ ^{-·} ）	★★★★★	★★★★★	★★★★★	中	去除广谱，适合抗性强、难降解药物；副产物生成与能耗较高。
生物炭/纳米材料	吸附 + 催化/降解	★★	★★	★	低	尚处于实验研究或小规模试点阶段，未来发展潜力大。
构建湿地	植物吸收 + 微生物作用	★	★	★	中	适合农村污水或低污染源；占地大、效率低、气候依赖性强。

从处理效率来看，AOPs 与膜技术（如 NF/RO）在药品残留去除方面最为高效，尤其适用于高浓度、高毒性残留的深度处理^[15]。但其高建设与运行成本

限制了在大范围推广中的可行性。从经济角度出发，活性污泥与人工湿地更适用于处理要求不高或经济条件较弱地区，具备运行简便、维护成本低等优势，

但去除效果有限。技术成熟度方面,MBR与活性炭等工艺已在工程中广泛应用,具备大量运行数据与实际经验。而纳米材料、光催化等新兴技术仍处于实验研究阶段,具备一定发展潜力^[16]。当前,复合工艺(如MBR+AOPs、活性炭+臭氧)因兼顾效率与成本,正日益受到关注。同时,绿色可再生材料(如生物炭、金属有机框架材料MOFs)的引入为未来处理技术发展提供新思路。在工程实践中,应遵循“因地制宜、经济优先、技术匹配”的原则。城市污水厂可优先采用MBR等成熟的生物—物理组合工艺;医院及制药厂污水因药品浓度高、毒性强,适合采用AOPs或膜分离等高效、针对性强的处理技术。中小城市则可推广“中效+低成本”的组合模式,如活性污泥与吸附技术联用,并逐步引入深度处理工艺,实现污染治理的可持续推进^[17]。

4.2 适用性分析

不同类型污水在药品残留的组成与浓度上差异显著,决定了处理技术应具备针对性。城市污水厂规模大、水质波动性强,药物残留浓度相对较低,成分复杂但抗生素比例较小,宜采用处理范围广、运行经济性强的组合工艺,如活性污泥法、吸附法及MBR,兼顾去除效率与大规模运行的可行性。目前MBR在部分城市污水厂中应用日益普及,成为重要的升级改造路径。相比之下,医院与制药厂污水药物浓度高、毒性强,常含抗生素、激素等化合物,对传统生化法存在显著抑制作用,宜采用AOPs、膜分离等效率更高的技术^[18]。此外,工艺选择还应考虑区域经济承载能力及水质特点。对于资源有限的中小城市,宜优先采用“低成本+中效能”路径,并在条件允许的区域分阶段引入高效深度处理手段,以实现经济与治理效果的平衡。

5 结论

随着环境风险意识的增强与监测技术的进步,药品残留污染治理正呈现多维化发展趋势。在技术层面,处理工艺将趋于集成化与模块化,融合物理、化学与生物过程,以提升多类药品及其代谢产物的去除效率^[19]。绿色、低能耗、可持续材料的引入将推动废水处理工艺向高效、环保方向转型。在研究层面,亟需加强对药品代谢物、抗性基因及其与其他微污染物交互作用的系统研究,推进污染物协同去除机制的深入探索,夯实精准治理的理论与技术

基础。政策层面,应尽快建立涵盖药品残留的污水排放标准体系,明确关键污染物限值,健全风险评估与监管机制,为高效技术应用提供制度保障。推广层面,应依托典型示范工程,通过政府引导、财政扶持和产学研协同创新,推动高效处理技术的工程化与规模化落地^[20]。

总体而言,药品残留作为典型新兴污染物,具有广泛存在、低浓度、高稳定性等特征,已成为不可忽视的环境风险源。当前,吸附、膜分离、生物降解及高级氧化等多种处理技术不断发展,各具技术特点与适用范围,但在处理效率、成本与适应性方面仍存在差异,亟需根据排放源类型和治理目标实现优化组合。经济性是实现技术推广的关键因素。未来应强化技术研发与集成的同时,协同推动政策机制、财政保障与监管体系建设,构建高效、经济、可持续的药品残留治理体系,实现生态环境与公众健康的双重保障。

参考文献

- [1] 安婧,周启星.药品及个人护理用品(PPCPs)的污染来源、环境残留及生态毒性[J].生态学杂志, 2009,28(9): 1878-1890.
- [2] 王坤.城市污水厂中 PPCPs 监测技术研究进展[J].化学工程师, 2024,12(1):67-72
- [3] 胡雨嘉,胡泽宇,莫虎,蒙振思,张亚楠.组合人工湿地在农村污水处理中的应用及对 PPCPs 的去除效果[J].农业环境科学学报, 2025, 44(3):769-783
- [4] 陈瀚,卢爽,于紫萱,马艺轩,王德.烟台和威海近海医药于个人护理用品分布、多介质分配行为及生态风险[J].色谱, 2025.
- [5] Alfonso-Muniozguren, Pello, et al. "A review on pharmaceuticals removal from waters by single and combined biological, membrane filtration and ultrasound systems." Ultrasonics sonochemistry 76 (2021): 105656.
- [6] 刘善东,钟辉,邹贤,朱佳兵,徐文轩.活性污泥法处理生活废水介绍及其展望[J].浙江化工,2016,47(1):39-42
- [7] 王德峰.纳米材料在工业废水处理中的吸附性能研究[J].清洗世界,2024,40(9):28-30.
- [8] 江宇迪,莫慧珠,李鹏飞.工业废水处理中的膜分离技术研

- 究[J].皮革制作与环保科技,2024,1(1):16-18.
- [9] Pandis, Pavlos K., et al. "Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review." ChemEngineering 6.1 (2022): 8.
- [10] 于鹏,秦立国.高级氧化技术在难降解有机废水处理中的应用研究进展[J].中国资源综合利用,2025,43(3):123-125.
- [11] 徐翔.高级氧化技术在水处理方面的应用研究[J].天津化工,2025,39(2):1-3.
- [12] 陈敏敏.高级氧化技术处理高浓有机废水研究进展[J].石油化工安全环保技术, 2025,41(1):59-66.
- [13] 刘国良,污水处理厂MBR膜组升级改造技术应用分析[J].中国资源综合利用,2025,46(6):263-265.
- [14] Mannino, Ilda, et al. "A cost-effectiveness analysis of seminatural wetlands and activated sludge wastewater-treatment systems." Environmental Management 41.1 (2008): 118-129.
- [15] 王鹤松,赵丽红,陈樑彬. 改性活性炭吸附水中抗生素的研究进展[J/OL]. 应用化工.
- [16] 宣亮,汪烨伟,孔韡,梅红.两种不同纳滤膜的分离效能研究[J].工业用水与废水,2025,56(3):12-20.
- [17] 秦显祥,李子浩,王正晓,唐晓虎,宋海旺,张 燕,程丽华,毕学军.不同进水条件下再生水多段反渗透工艺的运行效能[J].中国给水排水,2024,40(23):64-69.
- [18] 刘春晶.高级氧化技术在废水处理中的应用进展研究[J].皮革制作与环保科技,2024.??(?):5-7.
- [19] 薛禄,钟豪杰,张建,王艳龙,胡术刚,刘华清.聚二甲基硅氧烷修饰生物炭吸附水体中多环芳烃的效能与机制[J].用用化工,2024,53(4):802-813.
- [20] 陶伟,徐亚,何乐萍,张军,魏婧,王鹏.人工湿地综合效益评估体系研究及应用[J].环境污染与防治,2025,47(4): 109-113.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS