

# PPCPs 污染物的降解技术研究现状及分析

王奕洋<sup>1</sup>, 刘红卫<sup>2</sup>, 张敬红<sup>1,3</sup>, 李乐欢<sup>2</sup>, 王乐萌<sup>1</sup>, 罗梦栩<sup>1</sup>, 张玉玲<sup>1,3\*</sup>

(1. 华北电力大学环境科学与工程系, 河北 保定 071000; 2. 华润电力沧州公司, 河北 沧州 061000;  
3. 河北省新能源环境安全与资源化重点实验室, 河北 保定 071000)

**摘要:** 综述了 PPCPs 降解技术研究进展, 分析了高级氧化、物理和生物处理技术的机理、优缺点及研究热点; 高级氧化技术矿化效率高但能耗大; 生物处理环境友好但降解速率低; 物理技术操作简便但存在吸附剂再生和膜污染问题。未来研究应聚焦优化复合技术体系, 降低能耗并提高经济性, 深入研究降解中间产物毒性与动力学, 以全面评估环境风险, 推动 PPCPs 污染治理向高效、环保、经济方向发展。

**关键词:** PPCPs; 污染物降解; 高级氧化技术; 综合评估

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0037-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.007

## Research status and analysis of degradation technology of PPCPs pollutants

WANG Yi-yang<sup>1</sup>, LIU Hong-wei<sup>2</sup>, ZHANG Jing-hong<sup>1,3</sup>, LI Le-huan<sup>2</sup>, WANG Le-meng<sup>1</sup>,  
LUO Meng-xu<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ling<sup>1,3\*</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 2. China Resources Power Cangzhou Company, Cangzhou 061000, China; 3. Hebei Key Laboratory of New Energy Environmental Security and Resource Utilization, Baoding 071000, China)

**Abstract:** This article summarizes the research progress of PPCPs degradation technology, analyzes the mechanisms, advantages and disadvantages, and research hotspots of advanced oxidation, physical and biological treatment technologies; advanced oxidation technology has high mineralization efficiency but high energy consumption; Biological treatment is environmentally friendly but has a low degradation rate; The physical technology is easy to operate, but there are issues with adsorbent regeneration and membrane fouling. Future research should focus on optimizing composite technology systems, reducing energy consumption and improving economic efficiency. In-depth studies should be conducted on the toxicity and kinetics of degradation intermediates to comprehensively assess environmental risks and promote the development of PPCPs pollution control towards high efficiency, environmental protection, and economic direction.

**Key words:** PPCPs; degradation of pollutants; advanced oxidation technology; comprehensive evaluation

药品和个人护理产品(PPCPs)在水环境中的主要来源是工业和医疗废水, 市政污水处理厂出水中未完全消除的 PPCP 也可能释放到环境中, 此外, 农业污染物、牲畜粪便和水产养殖废水的持续排放也是一个相关来源<sup>[1]</sup>。PPCPs 包括抗生素、激素药物、非甾体抗炎药、止痛药、消毒剂、香料和肥皂等各种化学品, 潜在影响包括生殖损伤、内分泌功能影响、细胞病理学损伤、遗传毒性和诱变作用<sup>[2]</sup>。传统污水处理工艺主要针对常规污染物设计, 对 PPCPs 的去除效率并不稳定, 导致大量 PPCPs 随出水进入自然水体<sup>[3]</sup>。

为了有效应对 PPCPs 污染问题, 目前已研究了多种降解技术, 但现有研究多集中于如何提高 PPCPs 的去处理率及相应的降解原理, 对于各类方

法的综合评估相对较少。本文中从矿化程度、能耗、二次污染、可操作性及适用性等多维度系统分析各类技术优劣, 以期水环境治理提供科学依据与技术参考。

## 1 现有降解技术研究现状

### 1.1 高级氧化技术

现有降解 PPCPs 的高级氧化技术(AOP)主要是芬顿法、光催化氧化、电化学氧化以及低温等离子体技术, 见表 1, 这些技术通过产生 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{SO}_4^-$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  等活性物质降解 PPCPs。虽然降解原理相似, 但发展方向却各不相同。芬顿法作为一种经典的高级氧化法, 具有反应快、成本低的优点, 但需在酸性条件下进行, 还存在铁离子沉淀、催化剂回收困

收稿日期: 2025-07-24; 修回日期: 2026-03-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52170074); 华润电力科技研发项目(CRP-R&D-LX-2024-15)

作者简介: 王奕洋(2001-), 女, 硕士生; 张玉玲(1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向为水污染控制及污水资源化和微纳米气泡技术及应用, 通讯联系人, zhangyuling\_hit@163.com。

难以氧化剂利用率有限等问题。目前的研究中常使用电芬顿、光芬顿、超声辅助芬顿等改进技术。光催化降解 PPCPs 通常采用二氧化钛 ( $\text{TiO}_2$ )、氧化锌 ( $\text{ZnO}$ )、碳氮化合物 ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ) 等材料,但需优化光利用效率。研究热点往往集中于新型高效光催化剂的设计与制备、催化剂改性以提高量子效率和可见光响应或是光催化与其他技术的耦合。

表 1 各种 AOP 技术原理及其研究热点

技术类型	原理	研究热点
芬顿法	$\text{Fe}^{2+}$ 催化 $\text{H}_2\text{O}_2$ 生成 $\cdot\text{OH}$	电芬顿、光芬顿、超声辅助芬顿等改进技术,解决传统芬顿 pH 限制大、铁泥产生、催化剂回收难等问题
光催化	光激发催化剂产生 ROS	新型高效光催化剂的设计与制备;催化剂改性;光催化与其他技术的耦合
电化学法	通过施加电压在电极表面或溶液中生成 $\cdot\text{SO}_4^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 等活性物质	高性能电极材料的开发;电化学与其他高级氧化工艺协同
低温等离子体	高压放电产生 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等多种活性物质,直接氧化或间接氧化 PPCPs	降低能耗的等离子体反应器设计;与其他 AOP 技术联用

而电化学技术则聚焦于电极材料的选择,钛基电极(如  $\text{Ti}/\text{TiO}_2\text{-NTA}/\text{Ti}_4\text{O}_7$ ) 因高氧化电位、良好的导电性和化学稳定性而被广泛应用<sup>[4]</sup>。此外,通过表面改性(如  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  改性稀土掺杂  $\text{PbO}_2$  电极)能够促进活性物质  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成从而进一步优化电极性能<sup>[5]</sup>。多技术联用是当前的研究热点,例如与光芬顿、臭氧、 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  等技术的结合,能够显著提高 PPCPs 的降解效率,减少副产物的生成<sup>[6]</sup>。低温等离子体降解作为一种新型降解方法,普遍适用于各类有机污染物、无机污染物的处理,有着较为出色的降解效率<sup>[7]</sup>,但缺点也很明显——等离子体装置运行时需要高压电路,能耗较高。因此,设计降低能耗的等离子体反应器或与其他 AOP 技术联用以提高降解效率、减少副产物,成为了当前研究的热点。

## 1.2 物理处理技术

常用的物理处理技术主要有膜分离法和吸附法。膜分离法是通过孔径截留或电荷排斥分离污染物的一种物理处理方法,见表 2。近年来,对于膜分

离法降解 PPCPs 污染物的研究集中于创新膜材料和耦合技术以及开发新的膜系统。例如,  $\text{BiOCl}/\text{TiO}_2$  复合膜因优异的光催化性能和抗污染能力,在处理复杂废水方面展现出巨大潜力<sup>[8]</sup>。尽管如此,膜污染问题仍然是实际应用中的一个关键挑战,需要进一步优化膜材料和操作条件以提高抗污染性能和分离性能。

表 2 各种物理处理技术原理及其研究热点

技术类型	原理	研究热点
膜分离	通过孔径截留或电荷排斥分离污染物	创新膜材料以提升分离性能与抗污染能力
吸附法	多孔材料(生物炭、MOFs 等)吸附污染物	高效吸附剂开发

吸附法是利用多孔材料吸附污水中某种或几种污染物以去除这些污染物,从而使污水得到净化的方法。其去除 PPCPs 污染物的重点在于寻找合适的吸附剂,包括高效吸附剂的开发。目前常用的吸附材料包括纳米材料、生物炭和金属有机框架(MOFs)等,它们都具有良好的孔隙结构和高比表面积,可以对 PPCPs 进行高效吸附和选择性降解。例如,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$  纳米颗粒通过 pH 响应磁性 Janus 颗粒催化剂,实现了对 PPCPs 的高效吸附和选择性降解<sup>[9]</sup>;  $\text{Cu-doped Mil-101(Fe)}$  在去除布洛芬(IBP)和萘普生方面表现出优异的吸附性能,最大吸附容量分别为  $497.3$ 、 $396.5 \text{ mg/g}$ <sup>[10]</sup>。

## 1.3 生物处理技术

在众多的 PPCPs 污染物处理方法中,生物处理技术凭借高效、经济、环保等优势脱颖而出。生物膜、人工湿地和微生物燃料电池(MFC)这 3 种技术在降解 PPCPs 方面展现出巨大的潜力,见表 3。生物膜技术利用附着在载体表面的微生物群落,通过代谢活动将 PPCPs 分解为无害物质,其高效性和稳定性使其在污水处理领域备受关注。如 Chen 等<sup>[3]</sup>的研究中,旋转藻类生物膜(RAB)反应器对 PPCPs 的去除效率在  $70\% \sim 100\%$  之间。其研究热点在于新型载体材料与生物膜结构的优化,以及反应器的设计与运行参数的优化。人工湿地则是一种生态友好型技术,通过植物、微生物和基质的协同作用,通过物理吸附、化学降解、生物降解去除 PPCPs。它不仅能有效去除 PPCPs,还能改善水质,维护生态平衡。而植物、微生物、基质的选择众多,寻找植物-微生物-基质的优化组合是当前研究热点之一。此

外,湿地构型、水力停留时间及运行条件的调控,包括对人工湿地进行长期运行稳定性评估也是人工湿地降解 PPCPs 的重要研究方向。MFC 则是一种新兴的生物电化学技术,巧妙地结合了微生物降解和电化学原理,在降解 PPCPs 的同时还能产生电能,实现了污染物处理与能源回收的双重目标。如 Yong 等<sup>[11]</sup>通过纳米材料修饰的生物膜电极,显著提高了氯霉素的降解效率,并实现了高效的电力输出。而不同生物膜电极对污染物的降解效率不同,进行高性能电极材料的开发以实现产能与降解效率的优化正是这一方向的研究热点。这 3 种技术的原理各异,但都以微生物的代谢活动为核心,通过不同的方式实现 PPCPs 的降解,为污水处理提供了多样化的解决方案。

表 3 各种生物处理技术原理及其研究热点

技术类型	原理	研究热点
生物膜	利用载体表面微生物群落代谢活动,将 PPCPs 分解为无害物质	新型载体材料与生物膜结构优化;反应器的设计与运行参数优化
人工湿地	植物、微生物和基质协同作用,通过物理吸附、化学降解、生物降解去除 PPCPs	植物-微生物-基质的优化组合;湿地构型、水力停留时间及运行条件的调控;长期运行稳定性评估
微生物燃料电池	结合微生物降解与电化学原理,降解 PPCPs 同时产生电能	电极材料的研发;产能与降解效率优化

## 2 综合评估

### 2.1 矿化程度

矿化程度通常指的是 PPCPs 在降解过程中被完全分解为无机物质的程度。矿化程度越高,说明降解过程越彻底,对环境的潜在风险越低。通常使用总有机碳(TOC)去除率、污染物降解率等指标来评估矿化程度。

多种 AOP 在降解 PPCPs 时都表现出较高的矿化潜力。如 Chen 等<sup>[12]</sup>的研究中,通过光催化技术实现了 98.68% 的头孢克洛(CEC)降解率;Guo 等<sup>[13]</sup>的研究中,通过硫酸根自由基体系,成功实现了 PPCPs 的高效降解和矿化,且对多种 PPCP 的去除率皆达到 75% 以上;Yu 等<sup>[14]</sup>通过低温等离子体技术,卡马西平(CBZ)的降解率达到 99.1%,TOC 去除率达到 67.1%,表现出较高的矿化潜力。

物理处理技术中吸附技术和膜分离技术在 PPCP 污染物的矿化方面各有优势。吸附技术通常结合光催化或化学氧化过程,能够有效提高污染物的降解率和矿化程度。例如, TiO<sub>2</sub>-rGO 光催化复合吸附剂在紫外线下的 CBZ 去除效率为 (95.32 ± 25)%, 在可见光下为 (70.11 ± 0.04)%, 展现出较高的矿化潜力<sup>[15]</sup>。而膜分离技术则通过截留和结合电化学或光催化过程,展现出较高的截留率和降解效率。例如,使用 2 种商业化纳滤膜(AFC 30 和 AFC 80)对磺胺甲恶唑(SMX)、甲氧苄啶(TMP)和二甲双胍(MET)的截留率分别达到了 94%、87% 和 87%(AFC 30)以及 99.5%、97.5% 和 98%(AFC 80)<sup>[16]</sup>。

生物处理方法在 PPCPs 降解中具有一定的矿化能力,但矿化速度较慢,且对某些难降解的 PPCPs 效果有限。Martínez-Quintela 等<sup>[17]</sup>的研究中,通过厌氧甲烷氧化(n-damo)过程,对不同的 PPCPs 降解效率差异很大,如对罗红霉素(ROX)的去除效率可达 70% 以上,但对 CBZ 的去除效率不到 20%。

总体而言,不同的 PPCPs 降解技术在矿化程度上存在显著差异。AOPs 在矿化效率上表现最佳,能够高效降解 PPCPs 并实现较高的 TOC 去除率,是处理 PPCPs 的最佳选择之一;物理法适合污染物的初步截留,但需要与其他技术联用以提高矿化效率;生物法则适合处理可生物降解的污染物,但矿化程度较低。单一技术在 PPCPs 降解的矿化程度上存在局限性,而结合多种技术可能是未来提高 PPCPs 矿化效率的有效途径。为了实现更高效的 PPCPs 矿化,未来的研究可探索技术耦合,以充分发挥各自的优势,提高 PPCPs 的矿化效率,降低环境风险。

### 2.2 能耗

能耗成本是技术工程化应用的关键制约因素。AOPs 在降解 PPCPs 方面具有显著效果,但其能耗特征也较为突出,见表 4。这些技术通常需要较高的能量输入,如电能(电化学氧化、低温等离子体技术)、光能(光催化)、热能(基于硫酸根自由基的氧化技术)等,以产生具有强氧化能力的自由基或其他活性物种,因此能耗较高。此外,AOPs 的能耗还与反应条件(如 pH、温度、反应物浓度等)、催化剂的活性和稳定性、水基质的复杂性等因素密切相关<sup>[18]</sup>。在复杂的实际水体中,由于存在各种干扰物质,可能需要更高的能量输入来达到相同的处理效果。主要的优化策略为对光催化剂和电催化剂进行功能改性以提高活性自由基的产率和反应效率;精

调控反应条件,如 pH、温度、氧化剂剂量、反应时间等;将 AOP 与其他处理技术联用,形成协同效应,降低对单一 AOP 的依赖。例如,AOPs 与生物处理联用可以在降解难降解有机物的同时,利用生物处理进一步降低有机负荷和毒性<sup>[19]</sup>。

表 4 各种处理技术能耗特点及其优化策略

技术类型	能耗特点	优化策略
高级氧化技术	能耗较高,依赖电能、热能、受反应条件、催化剂、水质等影响显著	开发高效催化剂;优化反应条件;技术联用
物理处理技术	高效低能耗,受膜材料、结构、操作条件影响,集中在材料制备和操作环节	优化膜材料、结构;开发新型吸附材料;优化操作条件;控制膜污染;进行技术耦合
生物处理技术	运行成本低,能耗集中于机械或曝气;MFC 可产生电能	选择生物膜来源;优化反应器设计;精准调控运行参数;耦合其他技术

在物理处理技术中,膜分离技术在降解 PPCPs 方面展现出高效、低能耗的特性。其能耗主要受膜材料、结构及操作条件影响,如亲水性、孔径、操作压力和流速等。随着技术发展,能耗呈现逐渐降低趋势,例如引入新型材料和改性技术可提高膜性能,降低能耗<sup>[20]</sup>。而吸附技术通常能耗较低,尤其在处理低浓度废水时更为经济高效。例如,UPBC-2 显示出更短的吸附平衡时间和更高的去除效率:CBZ (5 min, 655.6 mg/g) 和双氯芬酸钠 (DCF) (5 min, 601.7 mg/g), 能耗主要集中在材料制备和吸附操作环节,相对较低<sup>[21]</sup>。然而,吸附剂的再生与重复使用是一个关键问题,例如,Janus 颗粒在重复使用 5 次后,对 PPCPs 的去除率仍高于 85%,但部分催化剂形状由椭球形变为球形,吸附容量有所下降<sup>[9]</sup>。而实际水体中存在多种污染物和天然有机物也可能会干扰吸附过程,降低吸附效率。其优化策略为:开发具有高吸附能力、高耐用性和可再生的创新材料;优化操作条件,通过实验和模拟确定最佳操作压力、流速等,实现能耗与降解效率的平衡<sup>[16]</sup>;应用耦合技术,将物理处理技术与其他技术耦合使用,发挥协同作用,提高降解效率,降低能耗。如将纳滤与电催化结合,制备的电活性 UiO-66/CNTs NF 膜,对四环素截留率可达 99.3%<sup>[22]</sup>。

生物技术在能耗特征及优化策略上呈现出多样化的特点。研究发现,采用 RAB 反应器降解 PPCPs 时,运行成本相对较低,主要能耗集中在反应器的机

械运转及曝气环节,且能实现高达 70%~100% 的 PPCP 去除效率<sup>[3]</sup>。MFC 作为一种新兴的生物降解方法,在处理含 PPCPs 的废水时不仅能实现有机物的降解,还能产生电能,具有一定的能效优势。然而,PPCPs 的复杂性和多样性对微生物群落的适应性提出了挑战,高浓度 PPCPs 可能抑制微生物活性,降低 MFC 性能<sup>[23]</sup>。为了提升降解效率和能源回收率,MFC 与其他技术的联合应用正逐渐成为研究热点。针对生物技术降解 PPCPs 的弊端,可以通过合理选择生物膜来源、优化反应器设计与运行参数、结合其他技术或材料等方式进行优化。

### 2.3 二次污染物种类及毒性

在环境治理和污染控制领域,评估二次污染物的毒性至关重要,因为这些二次产物可能对环境对人体健康产生潜在的毒害影响。尽管各种降解技术的核心目标是去除目标污染物,然而,由于技术原理及反应条件的不同,可能会引发各异的降解途径,产生多样化的中间产物,并影响这些产物的毒性水平。

通常而言,降解过程中产生的中间产物的生态毒性展现出对技术的依赖性,这一点以 CBZ 的降解为例得以体现。

自由基主导体系:Cui 等<sup>[24]</sup>利用过硫酸盐激活体系降解 CBZ,发现通过自由基(如·SO<sub>4</sub>和·OH)降解产生 P1(*m/z* 267.1)等 8 种中间体,其中 P1-P7 最后都会进一步降解为 P8(*m/z* 196.3),而 P8 毒性远小于 CBZ;Lin 等<sup>[25]</sup>研究了 Tea-Fe(III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系降解 CBZ,发现其通过 3 种氧化路径持续产生·OH,有效破坏了胞外聚合物结构并促进了 CBZ 的降解,通过持续氧化作用降低 17 种降解中间体毒性。

吸附-催化协同:Bogusz 等<sup>[26]</sup>研究了沸石对 CBZ 的吸附及其生态毒性影响,发现经过焙烧处理的沸石能够显著降低 CBZ 的生态毒性,并通过吸附作用减少了中间产物的生成,在吸附后 CBZ 对 *R. subcapitata* 的毒性降低了 34.5%~60.9%,对 *A. fischeri* 的毒性降低 33%~39%,对 *D. magna* 的毒性降低 55%~60%。

生物转化体系:Yao 等<sup>[27]</sup>利用浸没式正向渗透膜生物反应器(FOMBR)降解 CBZ,发现其降解机制主要涉及氧化、羟基化和脱羧反应,生成 A2(*m/z* 253.0963)等 14 种中间产物。

从以上例子来看,AOPs 在降解 CBZ 过程中会产生较多的中间产物,但这些中间产物大多具有较

好的可生化性,毒性相对较低;而通过物理吸附手段降解 CBZ 可使污染物毒性大大降低,但需考虑吸附饱和后是否会重新释放污染物;生物转化体系中会产生多种降解中间体,但其生物毒性未被提及。实际应用时,需要根据 PPCPs 的具体种类、浓度以及处理要求,综合考量,选择合适的降解技术,确保高

效降解并减少二次污染风险。

## 2.4 可操作性

对于不同技术对 PPCPs 降解的可操作性,可以从技术的复杂性、操作条件、是否需要专业设备或复杂工艺以及是否适合大规模应用等方面进行评估,见表 5。

表 5 各种技术类型的复杂性和操作条件要求

技术类型	技术复杂性	操作条件
高级氧化技术	光催化	反应器设计需与光源匹配,较高的化学合成技能和精准的反应条件控制
	电化学	操作者需具备电化学知识和设备维护能力,需进行电极维护
	低温等离子体	需要高电压设备和气体-液体等离子体反应器
物理处理技术	吸附	通常不需要复杂工艺和专业设备
	膜分离	需专业的膜材料和设备
生物处理技术	需微生物群落驯化	常温常压,对进水水质要求高

高级氧化技术种类较多,各种不同的 AOP 可操作性也并不相同。例如,Rahman 等<sup>[28]</sup>利用废弃印刷电路板制备芬顿催化剂,操作相对简单,适合大规模应用,但芬顿技术需要控制反应条件(如 pH、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度等)。对于光催化技术,Chen 等<sup>[12]</sup>利用废弃光伏硅片制备光催化剂,具有一定的资源回收价值,然而制备 II&S 型杂化异质结不仅要求较高的化学合成技能,还需要精准控制反应条件,加之光催化反应依赖光源,因此限制了其在无光照条件下的应用。电化学技术则需要配备电化学设备,如电极、电源等,操作相对复杂,要求操作者具备一定的电化学知识和设备维护能力,且需定期进行电极维护,但其可以在常温常压下进行,根据污染物的性质和电极材料调节 pH、电流密度可以达到较快的反应速率,已被证实对多种 PPCPs 具有良好的降解效果,尽管设备成本较高,但在废水处理中的应用前景广阔。低温等离子体技术需要高电压设备和气体-液体等离子体反应器,通常在常温下进行,但需调节特定的电源频率以达到更好的降解效果。可以在较短时间内实现高去除率,适合处理高浓度 PPCPs 废水,可操作性在实验室应用中较高。

物理技术复杂性相对较低,通常不需要复杂的工艺和专业设备。部分吸附剂的制备过程相对简单,且吸附操作可在常温常压下进行,对操作条件要求不高。此外,吸附剂的再生和循环利用也较为简便,进一步降低了技术的复杂性和操作难度。类似

的,膜分离技术的操作条件相对温和,通常在常温下进行,且过程中不需要复杂的化学反应或高能耗的处理步骤。然而,膜分离技术需要专业的膜材料和设备,膜的维护和更换成本较高,这限制了其在大规模应用中的经济性。

生物处理技术在可操作性方面也有其优势与局限。Martínez-Quintela 等<sup>[17]</sup>的研究中,n-damo 过程需要培养特定的微生物群落,且对进水水质有一定的要求,但该技术可以在常温常压下进行,且运行成本较低,适合大规模应用,可操作性在实验室和工业应用中均较高,但需要较长的启动时间和稳定的运行条件。

## 3 结论与展望

系统总结了当前 PPCPs 污染物降解技术的研究现状,涵盖了高级氧化技术、物理处理技术、生物处理技术,同时对这些技术进行多角度综合评估,得出结论如下。

(1) 现有降解 PPCPs 的技术主要分为 3 大类,AOPs、物理处理技术、生物处理技术。这些技术目前研究的热点普遍集中于新材料的研发、反应器的设计、改善传统处理技术的缺陷以及多技术协同处理。

(2) 综合评估表明,AOPs 在 PPCPs 降解中表现卓越,对典型污染物(如 CBZ)的降解率可达 90%以上,矿化效率达 60%以上,但高能耗与催化剂失活

问题制约规模化应用;生物处理技术虽运行成本低,但矿化率通常较低,且对难降解 PPCPs 适应性有限;物理处理技术操作简便,但面临再生成本高与二次污染风险。

(3)复合技术优势明显,单一技术在 PPCPs 降解中存在局限性,而结合多种技术是提高 PPCPs 降解效率和矿化程度的有效途径。但是复合技术的系统复杂性和成本问题仍需要进一步研究。

未来,PPCPs 降解技术的发展应聚焦于攻克现有技术的局限,同时,由于不同的降解技术会产生多种复杂的中间产物,这些产物的生态毒性和潜在风险尚未完全明确。因此,深入研究降解过程中生成的中间产物的毒性特征、生物累积性和降解动力学,对于全面评估其环境风险至关重要。

### 参考文献

- [1] Wang H, Xi H, Xu L L, *et al.* Ecotoxicological effects, environmental fate and risks of pharmaceutical and personal care products in the water environment: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147819.
- [2] Li J, Li Y X, Chen Y X, *et al.* Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment: Biototoxicity, determination and electrochemical treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 388: 135923.
- [3] Chen S, Xie J H, Wen Z Y. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from waterbody using a revolving algal biofilm (RAB) reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 406: 124284.
- [4] Meng C L, Zhuo Q F, Wang A Q, *et al.* Efficient electrochemical oxidation of COVID-19 treatment drugs favipiravir by a novel flow-through Ti/TiO<sub>2</sub>-NTA/Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> anode [J]. *Electrochimica Acta*, 2022, 430: 141055.
- [5] Zhu D C, Wu Y F, Zheng K, *et al.* Preparation of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> modified rare earth doped PbO<sub>2</sub> electrodes for efficient removal of sulfamethoxazole [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 8068.
- [6] Nagarajan A M, Subramanian A, Gobinathan K P, *et al.* Electrochemical-based approaches for the treatment of pharmaceuticals and personal care products in wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118385.
- [7] Liu Y Y, Liang J P, Zhou X F, *et al.* Degradation of persistent organic pollutants in soil by parallel tubes-array dielectric barrier discharge plasma cooperating with catalyst [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437: 135089.
- [8] Gao M Y, Liang H O, Bao S, *et al.* Bifunctional BiOCl/TiO<sub>2</sub> decorated membrane for antibiotic photodegradation and oil-water emulsion separation [J]. *Applied Surface Science*, 2022, 578: 151960.
- [9] Shi C W, Wu Z, Yang F, *et al.* Janus particles with pH switchable properties for high-efficiency adsorption of PPCPs in water [J]. *Solid State Sciences*, 2021, 119: 106702.
- [10] Xiong P, Zhang H, Li G L, *et al.* Adsorption removal of ibuprofen and naproxen from aqueous solution with Cu-doped Mil-101 (Fe) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149179.
- [11] Yong X Y, Jiang Y Q, Wang C, *et al.* Enhanced chloramphenicol biodegradation and sustainable electricity generation via co-cultured electroactive biofilms modified with in-situ self-assembled gold nanoparticles and reduced graphene oxide [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 373: 123609.
- [12] Chen Y Y, Teng C Y, Tang Z J, *et al.* In-situ preparation of II&S-type hybrid heterojunction Ag<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>/AgCl/SiC photocatalyst from waste photovoltaic silicon for cefaclor and pharmaceutical wastewater degradation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 361: 131465.
- [13] Guo J T, Wang W Y, Xie S H, *et al.* Performance and mechanism of sulfite mediated oxidation of organic contaminants using iron (III) titanium oxide as catalyst [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110449.
- [14] Yu J M, Yan W W, Zhu B, *et al.* Degradation of carbamazepine by high-voltage direct current gas-liquid plasma with the addition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Fe<sup>2+</sup> [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(51): 77771-77787.
- [15] Joseph A, Yelekar R G, Vijayanandan A. Efficiency of titanium dioxide-reduced graphene oxide in carbamazepine removal: A comparative study of adsorption, photocatalysis, and ultrafiltration techniques [J]. *Applied Catalysis O: Open*, 2024, 193: 206967.
- [16] Anike O, Cuhorka J, Ezeogu N, *et al.* Separation of antibiotics using two commercial nanofiltration membranes—experimental study and modelling [J]. *Membranes*, 2024, 14(12): 248.
- [17] Martínez-Quintela M, Arias A, Alvarino T, *et al.* Cometabolic removal of organic micropollutants by enriched nitrite-dependent anaerobic methane oxidizing cultures [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123450.
- [18] Khajouei G, Finklea H O O, Lin L S. UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107508.
- [19] Gopalakrishnan G, Jeyakumar R B, Somanathan A. Challenges and emerging trends in advanced oxidation technologies and integration of advanced oxidation processes with biological processes for wastewater treatment [J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4235.
- [20] Zhang J, Zhu X R, Zhang Q L, *et al.* Surface grafted zwitterions modulate the microstructure of polyamide separation layer to achieve efficient antibiotic desalination [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 63: 105495.
- [21] Chen Q, Kang J, Ma Y, *et al.* Synergistic effect of hierarchical pores and self-doped heteroatoms of biochar in rapid and efficient adsorption of PPCPs residues [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 686: 162126.
- [22] Yin Z L, Liu Y L, Hu Z B, *et al.* Sustainable and ultrafast antibiotics removal, self-cleaning and disinfection with electroactive metal-organic frameworks/carbon nanotubes membrane [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 475: 134944.

- pounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 82-88.
- [20] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆凝结时间及力学性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(12): 138-144.
- [21] Chen X, Zhang J, Lu M, *et al.* Study on the effect of calcium and sulfur content on the properties of fly ash based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125650.
- [22] 宋丽娜. 陈化拜耳法赤泥基地聚合材料的制备与水化机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [23] Han X, Zhang P, Zheng Y, *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with coal fly ash/metakaolin for geopolymer composites preparation [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133060.
- [24] 高梦实. 活化赤泥制备地聚物的力学和工作性能及微观机理研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
- [25] 袁正璞, 李新颖, 陈泉源, 等. 垃圾焚烧飞灰合成地聚物及重金属稳定化效果[J]. *环境工程*, 2012, 30(6): 91-94.
- [26] Ye N, Chen Y, Yang J, *et al.* Co-disposal of MSWI fly ash and Bayer red mud using an one-part geopolymeric system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 70-78.
- [27] 毕广泽, 王伯昕, 郭嘉欢, 等. 偏高岭土-矿渣地聚物水化过程中的环境敏感性[J/OL]. *复合材料学报*, 1-10. [2025-07-15]. 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250102.007.
- [28] 刘俊芳, 张天然, 刘霖, 等. 矿渣复合物固化/稳定化铅污染沙土特性[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(28): 12287-12295.
- [29] Liang G, Zhu H, Zhang Z, *et al.* Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 872-881.
- [30] 郭凌志, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(10): 1092-1100. ■

## (上接第 42 页)

- [23] Tariq M, Wang J, Sehar S, *et al.* Organics and nutrient transformation in a Microbial Fuel Cell influenced by antibiotics [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2023, 51(6): 2200299.
- [24] Cui Q T, Fan M K, Liu X Y, *et al.* Activation ability of Yellow River (Huanghe) suspended sediment to degrade carbamazepine pollutants in water environment using peroxymonosulfate: Performance, mechanism, and potential toxicity evaluation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 337: 126422.
- [25] Lin W, Chen R L, Gong C X, *et al.* Sustained oxidation of Tea-Fe (III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> simultaneously achieves sludge reduction and carbamazepine removal: The crucial role of EPS regulation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134182.
- [26] Bogusz A, Tomczyk B, Trzcńska M, *et al.* Effect of zeolites on the reduction of the ecotoxicity of carbamazepine in the environment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 277: 116320.
- [27] Yao M C, Duan L, Wei J, *et al.* Carbamazepine removal from wastewater and the degradation mechanism in a submerged forward osmotic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123732.
- [28] Rahman K O, Aziz K H H. Utilizing scrap printed circuit boards to fabricate efficient Fenton-like catalysts for the removal of pharmaceutical diclofenac and ibuprofen from water [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 109015. ■

## (上接第 47 页)

- [18] Zhang S, Xie X, Xie R, *et al.* Preparation and interface state of phosphate tailing-based geopolymers [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(6): 1900-1914.
- [19] Zhou K, Zhou Q, Gong K, *et al.* Waste-to-resource strategy to fabricate environmentally benign flame retardants from waste phosphorus tailings [J]. *Composites Communications*, 2020, 19: 173-176.
- [20] Zheng Y, Wan Y, Zhang Y, *et al.* Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorus removal technologies [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 53(11): 1148-1172.
- [21] 成倩兰, 张豪, 刘雁, 等. 焙烧磷尾矿处理含磷废水的研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(5): 496-499.
- [22] Meng W, Ma Z, Shu J, *et al.* Efficient adsorption of methylene blue from aqueous solution by hydrothermal chemical modification phosphorus ore flotation tailings [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 281: 119496.
- [23] Wu S, Liu Y, Shang L, *et al.* Recycling of phosphate tailings for an efficient hydroxyapatite-based adsorbent to immobilize heavy metal cations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 72160-72170.
- [24] 吴珊珊, 刘意章, 周旺旺, 等. 磷尾矿钝化材料研制及其对土壤重金属的修复机制[J]. *矿物学报*, 2024, 44(3): 326-334.
- [25] Venäläinen S, Nousiainen A, Silvennoinen M, *et al.* Stabilization of As and Sb in contaminated acidic shooting range soil with apatite mine tailings: Challenge of co-contamination [J]. *Soil & Environmental Health*, 2025, 3(100124): 1-10.
- [26] Li H, Yang J, Qu G, *et al.* Solidification and stabilization of fluorine and phosphorus in phosphate mine tailings and the mechanism of F and P fixation during soilization [J]. *Chemistry Select*, 2024, 9: e202401515.
- [27] Jia L, Yang S, Feng J, *et al.* Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO by phosphate tailings-derived composite slurry: A study of phosphorus element migration and transformation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119430.
- [28] Nie Y, Dai J, Hou Y, *et al.* An efficient and environmentally friendly process for the reduction of SO<sub>2</sub> by using waste phosphate mine tailings as adsorbent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121748.
- [29] 马海翔. 含硫烟气浸提磷尾矿中磷元素及强化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024. ■