

# 有机胺废水处理技术研究进展

何志勇, 郭本帅, 汪 东, 周志斌, 赵静妍\*

(中石化南京化工研究院有限公司, 江苏 南京 210048)

**摘要:**通过回顾近 25 年以来有机胺废水处理的研究文献,阐述了物理法、化学法、生物法以及组合法的原理、应用成效与局限性。针对该类废水低碳高氮的特性及现有脱氮瓶颈,结合不同技术的反应机制与应用场景,提出了“高级氧化预处理-鸟粪石沉淀回收氨-强化生物脱氮”多级协同工艺体系。旨在构建高效处理与资源化利用相结合的技术路径,为提升有机胺废水处理效率提供可行参考,以助力相关技术的选择与工艺优化。

**关键词:**有机胺废水;处理技术;生物处理;化学处理;组合工艺

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0043-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.008

## Advances in treatment technologies for organic amine wastewater

HE Zhi-yong, GUO Ben-shuai, WANG Dong, ZHOU Zhi-bin, ZHAO Jing-yan\*

(SINOPEC Nanjing Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Nanjing 210048, China)

**Abstract:**By reviewing research literature over the past 25 years on the treatment of organic amine wastewater, this study elaborates on the principles, application efficacy, and limitations of physical, chemical, biological, and combined treatment methods. In response to the low carbon/high nitrogen characteristics of such wastewater and the nitrogen removal limitations of existing technologies, a multi-stage synergistic process system of advanced oxidation pretreatment-struvite precipitation for ammonia recovery-enhanced biological nitrogen removal is proposed, based on the reaction mechanisms and application scenarios of different technologies. This system aims to construct a technical pathway integrating efficient treatment and resource utilization, providing a practical reference for improving the treatment efficiency of organic amine wastewater and supporting the selection and optimization of relevant technologies.

**Key words:**organic amine wastewater; treatment technology; biological treatment; chemical treatment; combined process

有机胺是指由有机化合物中的氢原子被氨基取代而形成的含胺基有机化合物,作为重要的化工原料,在染料、制药及碳捕集等领域广泛应用。然而,在其生产和使用过程中会产生大量成分复杂的含有有机胺的工业废水。这类废水组成复杂,通常含有高浓度胺及胺衍生物<sup>[1]</sup>,具有浓度高、高氮低碳、可生化性差等特点<sup>[2]</sup>,且部分有机胺(如苯胺)具有致癌性<sup>[3]</sup>,若未经有效处理直接排放,将对水生态系统安全和公共健康造成危害。在“双碳”战略深入推进和环保标准日益严格的背景下,开发兼具高效性、经济性与环境友好性的有机胺废水处理技术已成为行业

迫切需求。本文中旨在系统综述有机胺废水处理技术的研究现状,剖析不同方法的优势与局限性,并在此基础上,探讨该领域未来的研究方向与发展前景,以为为高效、经济、绿色的有机胺废水治理提供参考。

## 1 有机胺废水处理技术发展现状

基于 Web of Science 核心合集数据库,以有机胺、废水、处理为主题词,对 2000—2025 年间有机胺废水处理相关文献进行了调研。共筛选出 400 篇研究型文献,并对其技术方法与目标污染物进行统计分析(图 1)。结果显示,该领域研究关注度自 2000 年

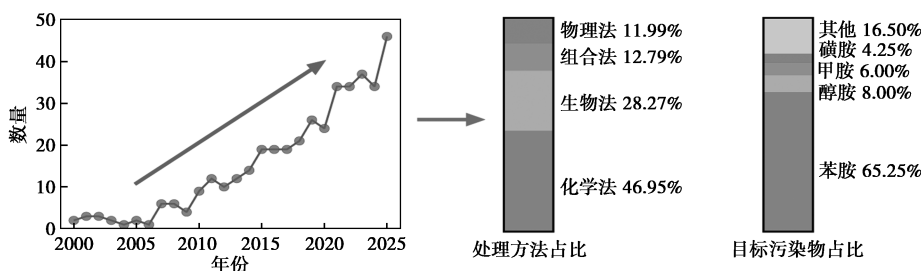


图 1 2000—2025 年发文量变化趋势及有机胺废水处理方法与目标污染物类型占比

收稿日期:2026-01-23;修回日期:2026-03-08

作者简介:何志勇(1975-),博士,正高级工程师,研究方向为 CO<sub>2</sub> 捕集和资源化利用,hezy.nhgs@sinopec.com;赵静妍(1996-),硕士,助理研究员,研究方向为 CO<sub>2</sub> 捕集和资源化利用,通讯联系人,zhaojy26.nhgs@sinopec.com。

以来持续上升。技术方法中以化学法占比最高,其次为生物法,组合工艺与物理法合计约占 25%。目标污染物中苯胺类化合物最受关注,其次为醇胺、甲胺和磺胺,这与我国将苯胺类化合物列为环境优先污染物有关<sup>[3]</sup>。

在处理方法的技术构成方面(图 2),物理法以

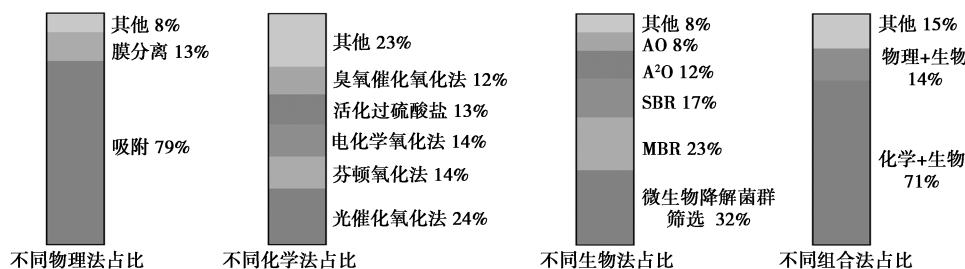


图 2 有机胺废水物理、化学、生物、组合处理法中不同技术类型占比

## 2 有机胺废水处理技术

### 2.1 物理法

#### 2.1.1 吸附法

吸附法是利用多孔吸附剂的高比表面积和选择性亲和力去除废水中污染物的技术。在有机胺废水处理中,活性炭等传统吸附剂应用广泛,但存在再生困难、再生后效率降低等问题。然而,吸附法效率受废水复杂成分影响,且对不同有机胺具有选择性,难以普适于成分多变的实际废水。

#### 2.1.2 膜分离法

膜分离技术依靠孔径筛分或溶解扩散机制实现有机胺的截留,包括微滤(MF)、纳滤(NF)、正渗透(FO)及反渗透(RO)。Shao 等<sup>[4]</sup>采用 FO 膜处理有机胺废水,实现了对苯胺 90% 以上的去除率。在实际应用中,膜工艺常与预处理联用,“混凝沉淀+MF+NF+高盐膜+RO”组合可有效降低膜堵塞风险<sup>[5]</sup>。此外,针对高盐有机胺废水,高压反渗透与高盐膜联用能提升系统回收率,但能耗较高。

#### 2.1.3 其他物理法

减压蒸馏通过降低沸点分离有机胺,对高浓度有机胺废水的总氮去除率可达 99% 以上,且能耗低于常压蒸馏<sup>[6]</sup>。然而,该方法对低沸点胺类分离效果有限,且设备投资较大。萃取法利用胺类在有机相与水相间的分配差异进行富集,磷酸三丁酯-煤油体系对苯胺的萃取率超过 99%,但萃取剂残留可能造成二次污染。近年来,超临界流体萃取等绿色技术因溶剂可回收而受到关注,但目前仍主要处于实验室研究阶段。

吸附为主,膜分离次之;化学法中,光催化、臭氧氧化等高级氧化技术占 77%;生物法方面,32% 聚焦于高效降解菌群筛选,68% 研究集中于厌氧-好氧(AO)、厌氧-缺氧-好氧(A<sup>2</sup>O)、序批式活性污泥法(SBR)及膜生物反应器(MBR)等工艺;组合法则以化学+生物耦合工艺为主。

### 2.2 化学法

化学法处理有机胺废水以高级氧化技术为主,机理是通过产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )与硫酸根自由基( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ )等强氧化性物种,将难降解有机物转化为小分子物质、无机盐或彻底矿化(图 3)。该技术多用于预处理阶段,以提升废水的可生化性,利于后续处理。

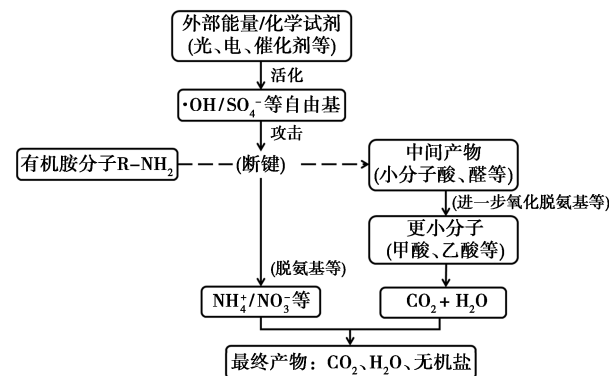


图 3 有机胺废水化学处理法作用机理

#### 2.2.1 活化过硫酸盐

活化过硫酸盐技术利用热、紫外光(UV)、过渡金属离子(如  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等)、金属氧化物(如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{ZrO}_2$  等)或电化学等方式活化过硫酸盐(PS),生成  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  和  $\cdot\text{OH}$  等自由基以降解污染物<sup>[7]</sup>。Yan 等<sup>[8]</sup>采用  $\text{Fe}^{2+}$ /PS 体系总有机碳(TOC)去除率约 50%,但效果受药剂投加量、pH 等影响,且伴生卤代副产物与铁泥。UV/PS 工艺对化学需氧量(COD)去除率仅 42%<sup>[9]</sup>。而热活化与超声则因能耗较高应用受限。此外,水体中常见的碳酸氢根、磷酸盐等阴离子会淬灭自由基,或螯合金属催化

剂,抑制反应效率<sup>[7]</sup>;同时过硫酸盐投加量高会导致出水硫酸根浓度上升。尽管该技术具有反应速率快、适用 pH 范围广等优点,但在实际工程中仍需根据水质优化活化方式,关注副产物控制与二次污染问题,以提升经济性与环境友好性。

### 2.2.2 芬顿氧化

芬顿(Fenton)氧化利用  $\text{Fe}^{2+}$  催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  产生  $\cdot\text{OH}$  降解有机物。Harimurti 等<sup>[10]</sup>利用该方法处理高浓度醇胺类废水时 COD 去除率为 30%~55%。针对传统均相芬顿技术药耗大、需在酸性条件(pH 2~4)下反应及产泥等局限,改良技术如流化床 Fenton、电 Fenton 及非均相 Fenton 应运而生。在最佳操作条件下,流化床 Fenton 和电 Fenton 对有机苯胺废水 COD 去除率分别为 41%和 45%,但易受水体中常见氯离子、磷酸盐等无机盐的抑制<sup>[11]</sup>。相较而言,非均相芬顿技术,例如采用 Fe-ZSM-5 分子筛作为催化剂,对苯胺废水 TOC 的去除率能达到 72.5%,且催化剂可循环使用,减少了铁泥产生<sup>[3]</sup>。总体而言,芬顿技术仍普遍面临铁泥产生、pH 适应范围窄及实际水质干扰等挑战,未来需开发更高效稳定的非均相催化剂以提升适用性与处理效率。

### 2.2.3 臭氧氧化

臭氧( $\text{O}_3$ )通过直接氧化或分解  $\cdot\text{OH}$  间接降解有机物转化为易降解小分子。研究发现,单独  $\text{O}_3$  氧化对有机胺废水 TOC 去除率仅为 23%<sup>[12]</sup>。为提高效率,催化剂催化  $\text{O}_3$  氧化技术得到发展和应用。Chen 等<sup>[13]</sup>采用 Ca-C/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂催化  $\text{O}_3$  氧化处理有机废水,COD 去除率从单独  $\text{O}_3$  氧化的 32.5%提升至 64.4%。此外, $\text{O}_3$  氧化还面临制备能耗高,且  $\text{O}_3$  或  $\cdot\text{OH}$  氧化溴化物形成溴酸盐致癌物等风险。

### 2.2.4 光催化氧化

光催化氧化技术利用半导体材料(如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}_2$  等)在光激发下产生氧化性自由基降解有机物<sup>[14]</sup>。机理为光子激发产生电子-空穴对,空穴直接氧化污染物或生成  $\cdot\text{OH}$ ,电子则与溶解氧反应形成  $\cdot\text{O}_2^-$  等活性物种,共同实现有机物矿化。Abdollahi 等<sup>[15]</sup>利用 UV/ $\text{TiO}_2$  体系对有机胺废水 COD 去除率约为 56.87%,但存在  $\text{TiO}_2$  吸附能力弱、载流子易复合等局限。催化剂改性是增强光催化活性的重要途径。Bommavaram 等<sup>[14]</sup>通过金属掺杂(如 Fe、Co、Ni、Cu)改性  $\text{TiO}_2$  催化剂可显著提效,使亚硝胺等降解效率达 86%~93%。该技术反应条件温和、二次污染少,未来可通过开发高效复合催化剂进一步提高处理效率与适用范围。

### 2.2.5 电化学氧化

电化学氧化通过阳极界面的直接电子转移或通过电解水及溶解氧在电极表面生成  $\cdot\text{OH}$  等活性物种降解有机污染物。研究表明,以  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  作为阳极、钛板作为阴极处理有机胺废水,COD 与氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )去除率分别达 55.8%~60.1%和 94.5%~97.2%<sup>[16]</sup>。相比其他高级氧化法,该技术无需投加化学氧化剂、无二次污染,且能同步高效降解有机物与脱氮。但目前该技术受限于电极成本高、能耗高、寿命短等瓶颈,未来需开发低成本、长寿命的电极材料以拓宽其应用。

### 2.2.6 其他化学法

除上述技术外,絮凝、化学沉淀及湿式氧化等方法也常用于有机胺废水处理。絮凝法通过投加絮凝剂使胶体与悬浮物聚集分离。Wang 等<sup>[17]</sup>采用该方法(如聚合硫酸铁、聚合氯化铝等)处理有机胺废水,COD 去除率可达 38%,同时可将生物降解性提升约 2 倍,但对溶解性小分子有机胺的去除能力有限,且会产生化学污泥。化学沉淀法适用于高  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  有机胺废水的预处理,如鸟粪石沉淀法,通过投加镁盐和磷酸盐,使  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  转化为磷酸铵镁( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )沉淀而去除。张展等<sup>[18]</sup>利用该方法可将有机胺废水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  从 659.03 mg/L 显著降至 58.52 mg/L。此法可实现沉淀物的资源化利用,但对有机物去除效果有限。湿式氧化及其强化技术(如催化湿式氧化、超临界水氧化)在高温(125~320℃)高压(0.5~20 MPa)甚至更高条件下将有机物彻底氧化,适用于高浓度、难降解废水,但因设备要求严、成本高,应用受限。

## 2.3 生物法

### 2.3.1 活性污泥法

活性污泥法是利用微生物代谢作用净化污水的生物技术,可在好氧、缺氧和厌氧条件下运行(图 4)<sup>[1]</sup>。好氧阶段,微生物降解含氮有机物,同时硝化菌将  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  氧化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ;缺氧阶段,反硝化菌以有机物为电子供体,将  $\text{NO}_3^--\text{N}$  还原为  $\text{N}_2$ ,实现脱氮。与物理化学法相比,该法运行成本低、二次污染少,适用于处理成分复杂的低浓度有机胺废水。



图 4 有机胺废水生物降解过程

目前用于有机胺废水处理的典型生物工艺主要包括 AO、 $\text{A}^2\text{O}$ 、SBR、MBR,工艺流程如图 5 所示。

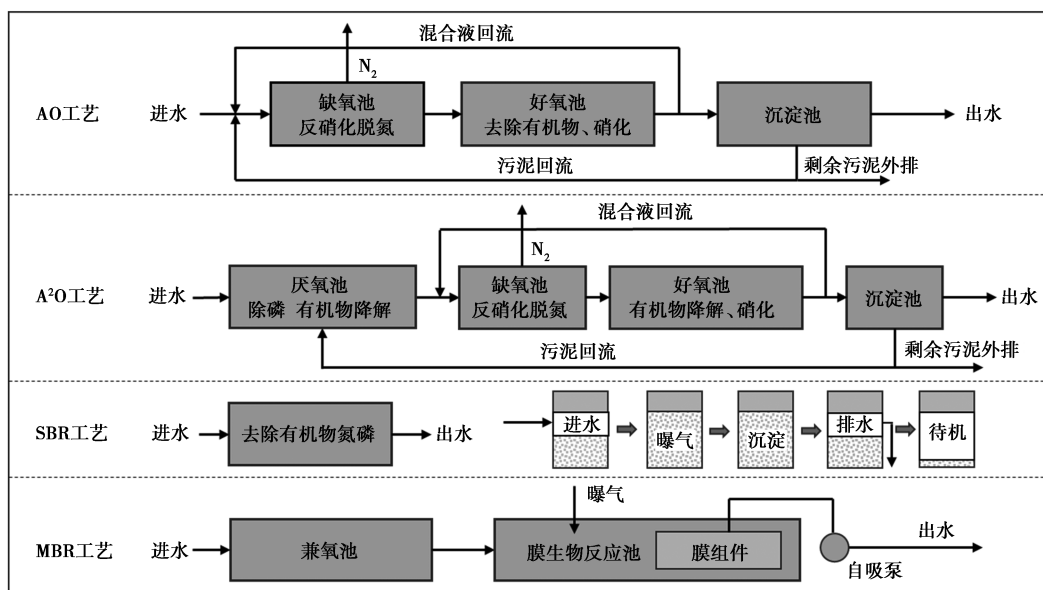


图 5 有机胺废水处理主要工艺及流程

AO 与 A<sup>2</sup>O 工艺技术成熟、应用广泛。例如, Sun 等<sup>[19]</sup>采用 AO 工艺处理单乙醇胺废水, COD 和 TN 的去除率分别能达到 95% 和 74%, 并指出碳氮比是影响脱氮效率的关键因素。Domingo 等<sup>[1]</sup>利用 A<sup>2</sup>O 工艺处理醇胺类废水, COD 和 TN 去除率亦分别达到 97% 和 79%。

SBR 作为间歇运行的活性污泥工艺, 运行过程涵盖注水、反应、沉淀、排水与待机 5 个阶段, 并在同一反应器内完成。该工艺结构简单、操作灵活等特点, 适用于水质水量波动较大的有机胺废水处理。Wu 等<sup>[20]</sup>采用 SBR 工艺处理含单乙醇胺废水, COD 去除率可达 80%, 而 TN 去除率仅为 23%, 发现 MEA 可通过抑制硝化功能基因的表达, 从而降低硝化速率。

MBR 工艺通过膜分离替代传统二沉池, 有效截留污泥与大分子有机物, 在维持高生物量的同时增强对难降解物的去除能力。该工艺还可实现水力停留时间与污泥龄的独立控制, 从而提高处理效率与出水水质。研究显示, 采用 MBR 处理碳捕集废水时 MEA 降解率超过 99%, 总氮去除率为 77%<sup>[2]</sup>; 但当有机胺含量在 9~120 mmol/L 时, 硝化速率会被抑制 50%<sup>[21]</sup>。总体而言, 生物法对有机胺废水 COD 去除效果良好, 但脱氮效率普遍偏低, 主要与废水本身高氮低碳以及毒性特性有关。

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 是一种高效生物脱氮工艺, 厌氧氨氧化菌在缺氧条件下, 以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为电子供体、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 为电子受体, 将两者转化为 N<sub>2</sub>, 无

需有机碳源且能耗低。通过构建短程硝化-厌氧氨氧化、短程反硝化-厌氧氨氧化脱氮过程 (图 6), 可提升污水脱氮效率和经济性。研究表明, 采用生物膜-活性污泥复合系统耦合处理高氨氮有机模拟废水, COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的去除率分别达 95%、100% 和 93%<sup>[22]</sup>。通过调控现有废水生物处理工艺条件, 促进厌氧氨氧化过程, 可为当前废水脱氮提供新的解决思路。

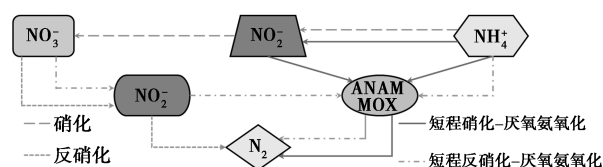


图 6 有机胺废水处理短程硝化/反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮

### 2.3.2 生物强化技术

为提升有机胺的生物降解效率, 研究者常从活性污泥中定向筛选并驯化高效降解菌株。目前已成功筛选葡萄球菌 (*Staphylococcus*)、芽孢杆菌 (*Bacillus*)、假单胞菌 (*Pseudomonas*) 以及欧文氏菌 (*Erwinia*) 等多类高效降解菌 (表 1)。这些菌株能够以目标有机胺为碳源或氮源, 在优化温度、pH、盐度等条件下, 有机胺的降解率可达 90% 以上, 部分甚至能实现完全降解。

然而, 环境条件的动态变化会影响降解菌的活性与效率。 *Staphylococcus* 和 *Bacillus* 降解十二胺的速率在 pH 为 3.5~7.5、温度为 15~30℃ 范围内分

表 1 筛选的有机胺降解菌及降解效率

菌属	有机胺类型	反应条件					降解率/%
		浓度	盐度/%	反应时间/h	pH	温度/℃	
<i>Staphylococcus and Bacillus</i> <sup>[23]</sup>	十二胺	500 mg/L	3	48	7.5	30	95
<i>Pseudomonas</i> <sup>[24]</sup>	戊胺	150~200 mg/L	—	24	7.0	30	93
<i>Erwinia</i> <sup>[25]</sup>	苯胺	5000 mg/L	0~10	24	5~11	30	100
<i>Delftia</i> <sup>[26]</sup>	苯胺	5000 mg/L	—	72	7	30	100
<i>Bacillus firmus</i> <sup>[27]</sup>	硝基苯胺	200~1000 μmol/L	—	40	7~11	30~40	35~100

别与 pH、温度呈正相关,与污染物初始浓度呈负相关,并受盐度波动制约<sup>[23]</sup>。*Pseudomonas* 降解戊胺和苯胺的效率受溶解氧的影响,当溶解氧由接近 0 mg/L 升高至 6 mg/L 时,两者去除率分别提高 1.3 倍和 3 倍<sup>[24]</sup>。此外,实际废水常含有锰、铅、铬等有毒重金属离子,能抑制微生物活性。因此,筛选菌株时需兼顾其对环境因子及有毒共存物质的耐受能力。

### 2.3.3 植物修复技术

人工湿地是模拟自然湿地构建的复合生态系统,通过基质吸附过滤、植物吸收转化以及微生物降解等协同作用处理低浓度废水。目前用于有机胺废水处理的人工湿地分为垂直流和水平流 2 种类型。在水力停留时间 8.9~14.9 d 的条件下,垂直流与水平流人工湿地对废水中三甲胺的去除率分别达到 98% 和 95%<sup>[28]</sup>。但该技术也存在水力停留时间长、占地面积大等局限,且易受进水负荷与碳源条件影响。Zhao 等<sup>[29]</sup>指出当硝基苯胺浓度从 10 mg/L 升高至 100 mg/L 时,人工湿地的去除效率下降约 23%;适当投加外源碳不仅能促进硝基苯胺的转化,还可减轻其对植物和微生物的毒性。此外,植物种类与季节温度变化也影响系统稳定性,通常生物量大的植物净化能力更强,而冬季植物凋萎会导致效率下降。因此,需通过调控进水负荷、优化碳源供给、选用适应性高生物量植物,并结合定期维护,以提升人工湿地的处理性能。

### 2.4 组合法

针对成分复杂、浓度高的有机胺废水,化学-生物联合处理是提升降解效率的有效途径。高级氧化法如 Fenton、O<sub>3</sub> 氧化常用作废水的预处理。如 Xiao 等<sup>[30]</sup>利用 Ce-Fe@ZSM-5 催化 O<sub>3</sub> 氧化-生物耦合处理三乙胺废水,降解率与 TOC 去除率分别为 89.5% 与 71.5%,较单一生物法提升 7.5%。需要注意的是,化学预处理可能产生抑制生物处理的副产物(如 O<sub>3</sub> 氧化预处理苯胺废水会产生硝基苯),抑制后续的生物处理过程。因此,在氧化预处理阶段需精准调控参数并优化工艺衔接条件,以平衡降解效率与生物相容性。

针对高浓度有机胺废水,特别是 CO<sub>2</sub> 捕集过程产生的醇胺类废弃液(低碳高氮),常规处理方法成本高且造成资源流失。尽管膜分离、吸附、蒸馏等工艺可用于有机废水中的资源回收,但这类工艺能耗大,且对复杂组分废水缺乏普适性。对此,可对现有组合工艺进行优化,采用高级氧化法进行预处理,将有机物部分降解,并促进有机氮向氨氮的转化;随后通过鸟粪石沉淀回收氨资源;最后利用如短程硝化/反硝化-厌氧氨氧化反应器 OR SBR、MBR 或 A<sup>2</sup>O 等生物反应器进行深度处理(图 7)。该优化方案通过针对性的工艺链重构与参数精准调控,为实现废水的达标处理与资源回收提供契合绿色环保与循环经济理念的新路径。

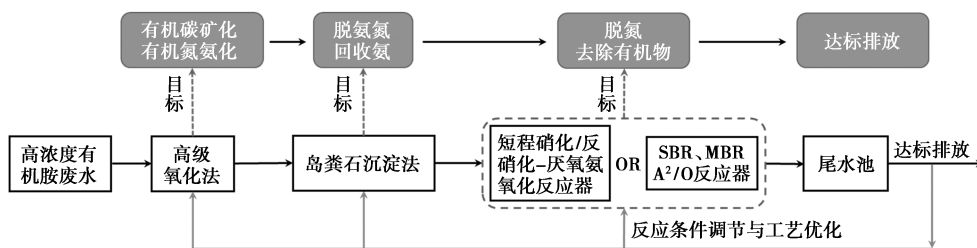


图 7 有机胺废水资源化利用及处理流程示意图

### 3 总结与展望

当前有机胺废水处理已形成涵盖物理、高级氧化、生物及组合工艺的多元化技术体系。物理法能实现污染物的高效分离与资源回收,但存在吸附选择性、膜污染及能耗较高等局限。高级氧化能有效降解难生化有机物并提升可生化性,但仍面临催化剂效率与稳定性不足、成本较高及可能产生有毒副产物等挑战。生物法运行成本低、环境友好,但脱氮效率普遍偏低,且效能受温度、pH、盐度等环境因素制约。组合工艺(尤其是“化学预处理-生物深度处理”)通过技术协同,表现出更好的处理潜力与适应性。

未来有机胺废水处理技术的研究与发展应聚焦以下几个方向:一是开发高效、稳定、低成本的新型功能材料(如高性能吸附剂、膜材料、电极材料),以提升物化处理效率并降低二次污染风险;二是深化生物处理机理研究,加强功能菌群筛选、驯化与调控,提高系统对水质波动和毒性物质的耐受性,发展短程硝化/反硝化与厌氧氨氧化耦合等高效工艺,优化单元衔接与协同运行;三是推动废水资源化利用,突破氮等有价值成分的定向回收技术,推动处理模式由末端治理向资源循环转变,实现环境与经济效益协同提升。

### 参考文献

- [1] Domingo J, Palmarin M J, Young S. Biological treatment of industrial wastewater from post-combustion carbon capture [J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 287: 119766.
- [2] Hauser I, Colao A B, Skjaeran J A, *et al.* Biological N removal from wastes generated from amine-based CO<sub>2</sub> capture: Case monoethanolamine [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 169 (4): 1449-1458.
- [3] Jiang S T, Zhu J Z, Bai S L, *et al.* Research on Fe-loaded ZSM-5 molecular sieve catalyst in high-concentration aniline wastewater treatment [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57 (2): 791-798.
- [4] Shao M, Li Y, Meng L, *et al.* Simultaneous removal of antimony, chromium and aniline by forward osmosis membrane: Preparation, performance and mechanism [J]. *Desalination*, 2021, 520: 115363.
- [5] 张慧凤. 有机胺废水的综合处理工艺研究 [J]. *资源节约与环保*, 2021, (3): 108-109.
- [6] 岳秀伟, 姜丽娜, 张保军, 等. 减压蒸馏法处理有机胺废水的研究 [J]. *清洗世界*, 2021, 37 (6): 29-30.
- [7] Wang J, Wang S. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1502-1517.
- [8] Yan Z, Gu Y, Wang X, *et al.* Degradation of aniline by ferrous ions activated persulfate: Impacts, mechanisms, and by-products [J]. *Chemosphere*, 2021, 268: 129237.
- [9] 陈莉荣, 成路姣, 谷振超, 等. 天然磁铁矿/UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> 对焦化废水中不同种类有机物的去除特性 [J]. *化工学报*, 2018, 69 (12): 5292-5300.
- [10] Harimurti S, Dutta B K, Ariff I F B M, *et al.* Degradation of monoethanolamine in aqueous solution by fenton's reagent with biological post-treatment [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2010, 211 (1/2/3/4): 273-286.
- [11] Anotai J, Su C C, Tsai Y C, *et al.* Comparison of aniline oxidation by electro-fenton and fluidized-bed fenton processes [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2011, 137 (5): 363-370.
- [12] Gong Z L, Hu W J, Qu Y, *et al.* The treatment of high concentration wastewater in the natural gas processing industry [J]. *RSC Advances*, 2024, 14 (29): 20595-20603.
- [13] Chen J, Tu Y, Shao G, *et al.* Catalytic ozonation performance of calcium-loaded catalyst (Ca-C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) for effective treatment of high salt organic wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 301: 121937.
- [14] Bommavaram K, Ali F M, Ibrahim H. Degradation of wastewater from carbon capture plants using metal-impregnated TiO<sub>2</sub> photocatalyst [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2023, 101 (12): 6827-6844.
- [15] Abdollahi S, Fallah N, Davarpanah L. Treatment of real artificial leather manufacturing wastewater containing Dimethylamine (DMA) by photocatalytic method [J]. *Chemical Papers*, 2020, 74 (12): 4203-4212.
- [16] 王为, 郑彦清. 催化氧化法在有机胺废水深度处理中的工艺参数优化 [J]. *化学工程与装备*, 2025, (10): 30-33.
- [17] Wang T, Wang W, Hu H, *et al.* Effect of coagulation on bio-treatment of textile wastewater: Quantitative evaluation and application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127798.
- [18] 张展, 周元祥, 王婉贞. 化学沉淀法处理有机胺废水的实验研究 [J]. *环境科学与管理*, 2010, 35 (9): 63-65, 92.
- [19] Sun J, Wang W, Wu Q, *et al.* Multi-stage AO optimization for nitrogen removal in semiconductor wastewater: Carbon source-driven biodegradation of organic amines (MEA, NMP, TMAH) [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 71: 107391.
- [20] Wu Y J, Chen H Y, Chang B C, *et al.* Biological treatment of high strength monoethanolamine (MEA)-containing wastewater from printed circuit board manufacturing industry [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 163: 613-620.
- [21] Henry I A, Einbu A, Svendsen H F, *et al.* Inhibition factors in bio-film N removal systems treating wastes generated by amine based CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 45: 200-206.
- [22] 汪天浩, 周鑫, 邸达. IFAS 系统同步短程硝化/反硝化耦合厌氧氨氧化启动特性 [J]. *中国环境科学*, 2025, 45 (8): 4266-4274.