

## • 综述 •

## “双碳”目标背景下中药制药废水处理技术的研究现状与发展前景

石菁凤<sup>1</sup>, 刘安萍<sup>1</sup>, 杨文靓<sup>1</sup>, 张逸菲<sup>1</sup>, 慈志敏<sup>1</sup>, 马鸿雁<sup>1\*</sup>, 张定堃<sup>1,2\*</sup>

1. 成都中医药大学 中药种质资源创新与高效利用四川省重点实验室, 四川 成都 611137

2. 成都中医药大学 天府中医药创新港 四川省经典名方二次创新开发工程研究中心, 四川 彭州 611930

**摘要:** 中药制药废水处理是行业绿色转型、生态环境保护的关键, 能削减高浓度污染物, 避免水土污染, 保障生态与人体健康, 助力行业可持续发展。然而中药原料组分复杂且提取工艺多样, 其产生的废水含有大量有机物、悬浮物及难降解物质, 呈现出有机物浓度高、水质波动大、有毒性和异味等特征。传统处理工艺能耗高、降解效率低, 产生大量碳排放, 加重环境负担, 处理难度远高于常规工业废水。基于“碳达峰、碳中和”政策, 聚焦“降低能耗、提高能源回用”2大核心, 梳理制药废水处理技术, 总结中药制药废水低碳处理的策略与技术, 剖析其技术路径与应用要点, 并探讨未来发展趋势, 为中药制药行业的绿色转型与低碳发展提供切实可行的思路。

**关键词:** 中药制药废水; 废水处理技术; “双碳”目标; 绿色低碳; 碳足迹

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)12-4855-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.12.027

## Research status and development prospects of wastewater treatment technologies for traditional Chinese medicine manufacturing under context of “dual carbon” goals

SHI Jingfeng<sup>1</sup>, LIU Anping<sup>1</sup>, YANG Wenliang<sup>1</sup>, ZHANG Yifei<sup>1</sup>, CI Zhimin<sup>1</sup>, MA Hongyan<sup>1</sup>, ZHANG Dingkun<sup>1,2</sup>

1. Chinese Medicine Germplasm Resources Innovation and Effective Uses Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China

2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of Innovative Re-development of Famous Classical Formulas, Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Pengzhou 611930, China

**Abstract:** The treatment of wastewater from traditional Chinese medicine (TCM) pharmaceutical production is crucial for the industry's green transformation and ecological conservation. It reduces removes high-concentration pollutants, prevents soil and water contamination, safeguards ecological and human health, and supports sustainable industry development. However, due to the complex composition of TCM raw materials and diverse extraction processes, the resulting wastewater contains substantial amounts of organic matter, suspended solids, and refractory substances. It exhibits characteristics such as high organic pollutant concentration, significant water quality fluctuations, and strong toxicity and unpleasant odors. Traditional treatment processes consume high energy, exhibit low degradation efficiency, generate substantial carbon emissions, and impose greater environmental burdens, making treatment significantly more challenging than for conventional industrial wastewater. Guided by the “dual carbon” policy and focusing on the two core objectives of “reducing energy consumption and enhancing energy reuse,” this study reviews pharmaceutical wastewater treatment technologies. It summarizes low-carbon treatment strategies and techniques for TCM pharmaceutical wastewater, analyzes their technical pathways and application essentials, and explores future development trends. The aim is to provide practical insights for the green transformation and low-carbon development of the TCM pharmaceutical industry.

收稿日期: 2025-12-11

基金项目: 四川省中医药管理局科学技术研究专项课题 (2024MS596)

作者简介: 石菁凤, 硕士研究生, 研究方向为中药质量控制与评价。E-mail: 18794132003@163.com

\*通信作者: 张定堃, 博士, 教授, 博士生导师, 从事中药制剂新技术与质量评价研究。E-mail: zhangdingkun@cducm.edu.cn

马鸿雁, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事中药质量控制与评价研究。E-mail: 253557538@qq.com

**Key words:** traditional Chinese medicine wastewater; wastewater treatment technology; “dual carbon” goals; green and low-carbon; carbon footprint

随着国家“振兴中药事业”战略的实施，我国涌现出大量的中药生产企业，根据国家药品监督管理局2024年公布的《药品监督管理统计年度数据》，截至2024年底，我国生产中药企业合计4760家，其中生产中成药企业2457家，中药饮片企业2455家<sup>[1]</sup>。具体分布见图1。

随着全球气候变暖加剧，碳排放的问题愈发严峻。工业是实现“碳达峰、碳中和”（以下简称“双碳”）目标的关键领域<sup>[2]</sup>，作为工业重要分支，中药

制药行业既是我国社会经济发展的支柱产业，也是高耗能、高碳排放领域之一。其工业化生产阶段能耗巨大，以煤、电力、燃气为主要能源，碳排放总量居高不下<sup>[3]</sup>。在企业运行体系中，废水处理既是关键环节，也是能源消耗与碳排放的重要贡献源。尤其对于中药制药行业而言，其产生的废水产量大、成分复杂、含有毒性物质等，使得这类废水的处理难度大大增加<sup>[4]</sup>。随着制药工业产能持续扩张，废水处理问题已成为社会广泛关注的焦点。

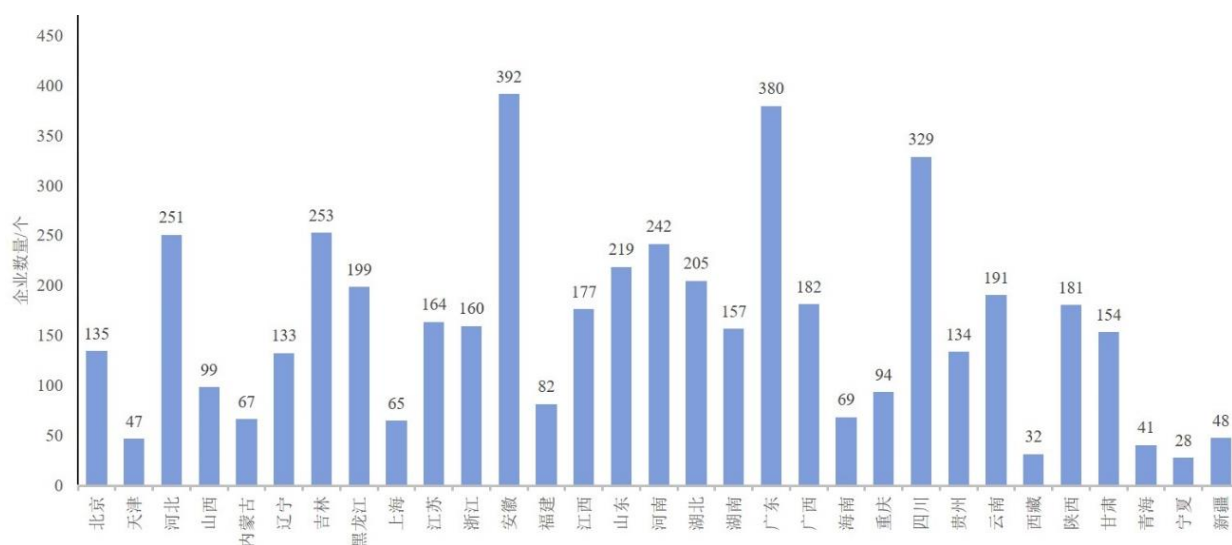


图1 各行政区划中药企业数量

Fig. 1 Number of traditional Chinese medicine enterprises in each administrative region

中药废水主要分为工艺废水和清洗废水<sup>[1]</sup>，其主要污染物为有机物、悬浮物、色度、氨氮等，主要成分为糖类、木脂素、蛋白质、色素、纤维素等<sup>[5]</sup>，主要源自中药材前处理、炮制、提取、浓缩及制剂等生产环节<sup>[6-7]</sup>。由于原材料的多样性和生产工艺的特殊性，导致中药废水具有以下特点。（1）可生化性差：其成分复杂且有机物含量高，含有大量悬浮物、残留药物、添加剂等污染物，部分还含有高浓度重金属离子，导致常规生化处理难以有效降解其中的污染物，使其成为难处理的工业废水之一<sup>[8]</sup>。（2）高酸碱性：酸碱性源于酸浸、碱提等工艺中酸碱试剂的引入，且废水中伴随的盐类及提取物衍生物增强了缓冲能力，不仅易腐蚀处理设备，还会抑制生化系统微生物活性、干扰物化处理效果，严重制约废水处理系统的稳定运行<sup>[1]</sup>。（3）污染物成分

复杂：其污染源涵盖多个生产环节，废水中不仅含有糖类、有机酸等易降解小分子天然有机物，还富集木脂素、生物碱等难降解大分子物质，同时伴随大量悬浮态污染物共存，最终形成多元复合污染体系<sup>[9]</sup>。（4）水质水量波动大：受中药生产非连续性工艺的制约，废水呈间歇性、不均匀排放特征，导致不同企业之间、同一企业不同时间段的废水水量与水质均存在显著波动<sup>[6]</sup>。（5）毒性与异味：其毒性源于生产残留的生物碱、萜类、酚类等物质，异味与药物提取、煮沸等过程产生的挥发性有机物、有机物分解产物及中药原料自身挥发性成分相关，且与高色度、高浓度难降解有机物等污染特性相伴生，是该类废水感官污染治理的重要内容<sup>[10]</sup>。

鉴于以上特点，中药制药废水处理难度大、成本高，且该类废水若直接排放或不达标排放，都会引起

严重的环境污染。2020年9月22日,我国提出力争在2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和目标。在“双碳”目标的背景下,中药制药废水处理面临双重挑战,既要降低处理过程中的碳排放,又需提升能源利用效率。因此,聚焦中药制药废水处理环节,探索兼顾节能与降碳的技术路径和应对策略,具有重要现实意义。

### 1 中药制药废水传统处理技术

中药废水的处理一般包括预处理阶段、主体处理阶段和深度处理阶段3个阶段,分别承担不同功能,具体特点见表1。

#### 1.1 物理处理法

物理处理法是指不加化学试剂只利用废水自

身的物理性质或通过仪器设备辅助去除废水中的污染物<sup>[11]</sup>,主要包含絮凝沉降法、气浮法、吸附法、膜分离技术等方法<sup>[12]</sup>。

絮凝沉淀法是通过向废水中添加絮凝剂中和废水中的带电荷物质,使悬浮颗粒物形成大絮团加速沉降的水处理技术<sup>[13]</sup>。王洪勃等<sup>[14]</sup>通过对比无机絮凝剂、有机絮凝剂和复合絮凝剂3类絮凝剂发现,二硫代氨基甲酸盐(dithiocarbamates, DTC)类絮凝剂对“高有机物-低可生化”复杂水质适配性极强,污水毒性高、成分波动大时仍能稳定去除杂质,结合中药废水高有机物、高悬浮物特点,该类絮凝剂处理优势显著:投加量预计20 mg/L,远低于传统药剂。其他絮凝剂对比结果见表2。

表1 中药废水处理3个阶段的特点

Table 1 Characteristics of three stages of traditional Chinese medicine wastewater treatment

阶段	核心目标	关键技术	处理对象	依赖机制
预处理	去除悬浮物、调节水质、提高可生化性	格栅、混凝、微电解、Fenton氧化	大颗粒、胶体、大分子有机物	物理/化学反应
主体处理	降低生化需氧量/化学需氧量、脱氮除磷	升流式厌氧污泥床、生物脱氮工艺、移动床生物膜反应器	溶解性有机物、氨氮、总磷	微生物代谢
深度处理	去除难降解物、色度、微量毒物	高级氧化、活性炭吸附、人工湿地	难降解有机物、色度	化学氧化/物理吸附

表2 无机絮凝剂、有机絮凝剂和复合絮凝剂的对比结果

Table 2 Comparison of inorganic, organic and composite flocculants

絮凝剂大类	核心类型	核心特点	适配污水水质特点
无机絮凝剂	小分子(铝/铁盐)、高分子(PAC、PAFC)	成本低;高分子除油优于小分子,投加大、絮体多	有机物含量低-中,悬浮物以无机颗粒为主,可生化性中等,无强毒性干扰
有机絮凝剂	合成高分子(阳离子PAM、两性淀粉接枝PAM)	阳离子除油率高,两性性能优;部分易堵设备	有机物含量高,含大量带负电有机胶体,可生化性差
	合成小分子(DTC)	制备简单、作用快、Fe <sup>2+</sup> 配位网捕强、低药耗低能耗、适配中药废水	有机物含量高-极高,含难降解油溶性有机物,悬浮物与有机物交织,可生化性差
	生物基(改性壳聚糖/淀粉)	环保可降解;改性后除油提升	有机物含量中低,不含强毒性物质,对处理剂生物相容性要求高,可生化性中等偏优
复合絮凝剂	无机-有机复合(PAC-PAM、磁性壳聚糖复合)	絮体致密,除油强	有机物含量极高,含无机颗粒+有机胶体混合污染物,可生化性差

PAC-聚合氯化铝; PAFC-复合铝铁; PAM-聚丙烯酰胺。

PAC-polyaluminum chloride; PAFC-polyferric aluminum chloride; PAM-polyacrylamide.

气浮法是指空气以高度分散的微小气泡作为载体,黏附于制药废水中的污染物上,使其浮力大于重力和上浮阻力,从而使污染物上浮至水面,实现“固-液分离”或“液-液分离”,主要适用于胶体类污染物或悬浮物浓度较高的废水处理。微纳米气泡技术是一种新型技术,具有成本低、绿色环保、易操作、性能高等优势,顾文林等<sup>[15]</sup>采用新型微纳米气泡发生器添加了阳离子改性淀粉作为助凝剂,

废水化学需氧量去除率达到52.7%,悬浮物去除率达到85.3%。改良气浮法通过微纳米气泡提升气浮效率,配合阳离子改性淀粉增强悬浮物去除能力,虽单一工艺的盐和有机物去除效果有限,但作为联合工艺的前端处理单元时,可有效降低后续操作的负荷。

吸附法是利用多孔性吸附剂将废水中的污染物吸附于表从而降低水中污染物的浓度,具有操作

简单、成本低廉等优点。吸附剂是吸附法的关键，主要分为生物吸附剂、天然矿物质吸附剂、合成高分子吸附剂、纳米材料吸附剂4类，主要包括活性炭、硅酸盐、氧化物、合成树脂等<sup>[16]</sup>。Rahman等<sup>[17]</sup>以稻壳为原料，经溶剂蒸发诱导相分离技术结合30%磷酸功能化，制备出功能化稻壳生物炭，将其用于固定床柱吸附处理废水，对 $\text{Pb}^{2+}$ 、亚甲基蓝染料的最大吸附容量分别达179.77、173.01 mg/g。该方法可推广至中药制药废水处理。以中药渣为原料制备生物炭，经磷酸改性增强吸附性能，可高效吸附废水中药效成分残留及重金属，兼具固废资源化利用与废水净化双重价值，实现环境与经济双赢。Ferrer-Polonio等<sup>[18]</sup>研究发现，将介孔颗粒活性炭与序批式反应器（sequencing batch reactor, SBR）结合，形成活性炭混合系统（SBR-PhC+AC），药物去除效果显著，实现了对水中目标药物的彻底去除，并且化学需氧量的处理效果优于常规活性污泥法（SBR-PhC），出水浊度更低，水质更清澈，溶解性微生物产物浓度更低，进一步提升了出水的纯净度。

## 1.2 化学处理法

化学处理法是一种通过化学反应去除废水中的金属离子、有毒成分等污染物，并将其转化为无害物质的废水处理技术。常用的化学法包括化学沉淀法、中和法、高级氧化法（advanced oxidation processes, AOPs）、离子交换法、微电解法等。

化学沉淀法是通过向废水中投入化学试剂，使其与水中某些溶解性物质发生化学反应生成沉淀，降低废水中这些溶解性物质的含量的方法，可除去大部分溶解性物质 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Pb}^{2+}$ 等，沉淀物需要通过滤过或沉淀分离。薛祥等<sup>[19]</sup>采用“通过 $\text{CaO}$ 或 $\text{NaOH}$ 先调节 $\text{pH}$ →液固分离→添加 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ →再次液固分离”的分步滤过模式， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度降低效果显著。王冬姣<sup>[20]</sup>以 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 为最佳温度，采用“混凝-化学沉淀”组合工艺，使用 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与 $\text{CaCl}_2$ 复合投加，最终除钙率达93%， $\text{CaSO}_4$ 完全去除，水质达标且利于后续处理。

AOPs是一种利用强氧化性活性物质，通过氧化反应降解水中难降解有机污染物的水处理技术。其核心是借助特定反应产生高活性氧化物种，高效破坏污染物的化学结构，使其分解为无害物质或易降解小分子，从而实现水质净化。包括Fenton氧化、类Fenton氧化法、臭氧氧化法、光催化氧化法等。

Fenton氧化法通过 $\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的催化反应，

生成高活性羟基自由基，将水体中有机污染物氧化降解为低毒小分子物质，可实现有机污染物总量的高效削减<sup>[21]</sup>。适用于处理难降解的有机污染物，有反应高效、设备简单和成本较低等特点<sup>[22]</sup>。类Fenton氧化法是基于Fenton工艺通过创新催化剂设计与反应调控，在难降解废水处理等领域展现出高效性与实用性，解决了传统Fenton工艺的痛点，可以减少污泥产生同时拓宽 $\text{pH}$ 适用范围<sup>[23]</sup>。

臭氧氧化法是一种以臭氧作为强氧化剂，通过氧化分解作用处理污染物的高级氧化技术<sup>[24]</sup>。具有氧化能力强、工艺灵活性好、环境友好等特点<sup>[25]</sup>。陈义等<sup>[26]</sup>提出“臭氧流量-反应时间-反应温度-氟硅酸含量”四维优化体系，阐明了酸性条件下臭氧氧化 $\text{Cl}^-$ 的反应路径： $\text{Cl}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- \rightarrow \text{Cl}_2$ ，且反应无需添加化学药剂，可避免二次污染，条件温和，耗能较低。可将此方法延伸到中药制药废水的处理，中药废水常含有高浓度有机氯污染物（如氯代有机物、含氯农药残留），臭氧的强氧化性可有效破坏 $\text{C-Cl}$ 键，实现有机氯的无害化，提高废水的可生化性，减少污泥产量。

离子交换法是一种基于离子交换原理的废水处理与物质分离技术，核心是利用离子交换剂表面携带的可交换离子，与废水中目标离子发生可逆性离子交换反应，从而实现目标离子的去除、回收或溶液纯化，具高效性、可回收性、低二次污染等特点，设备简单且操作容易<sup>[27-28]</sup>。在工艺过程中，树脂的类型、功能特性及性能参数，是决定离子交换法能否高效去除目标重金属离子的关键<sup>[29]</sup>，目前主要的几类离子交换树脂见表3。

微电解法主要是通过铁、铝等金属与碳材料构成原电池，在废水中形成无数个微小原电池，利用金属的腐蚀过程产生具有强还原性的新生态氢和金属离子，通过氧化还原、电沉积、絮凝沉淀、吸附等多种机制，实现对有机污染物或重金属的去除。常晓亮等<sup>[32]</sup>发现在初始浓度为 $6000\text{ mg/L}$ 、铁碳质量比为 $1:1$ 、 $\text{pH}$ 为 $5.6$ 的条件下反应 $50\text{ min}$ ，化学需氧量的去除率可达 $93.42\%$ ；杨海威<sup>[33]</sup>提出铝炭及改性微电解思路，用铝替代铁作为阳极，形成“铝-炭微电解”，突破铁碳法只能在酸性条件下运行的限制，且铝的电极电位（ $-1.667\text{ V}$ ）远低于铁（ $-0.44\text{ V}$ ），可以形成更大电位差，产 $[\text{H}]$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 更快，氧化还原、絮凝、脱色效率可同步提升。中药制药废水普遍具有高化学需氧量、高色度、可生化性差、

表3 离子交换树脂的类型及其特点

Table 3 Types and characteristics of ion exchange resins

树脂	典型类型	功能基团	核心特点	适用范围	文献
强酸性阳离子交换树脂	001×7、D001、Dowex 50W-x8、CH-90、CH-90 树脂	-SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH 1~14、交换容量高、选择性固定、再生性好	重金属阳离子去除、水质软化、特定金属回收	27,29-31
弱酸性阳离子交换树脂	Amberlite IRC-50 树脂	-COOH	pH 6~9、交换容量高、再生成本低	低浓度中性重金属废水、避免酸污染的场景	27
强碱性阴离子交换树脂	201×4、201×7、D296、D403 树脂	-N <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	pH 1~14、吸附容量大、抗污染性差异、再生效率高	含铬废水、高氟废水、高氯废水	27-28, 30,32
弱碱性阴离子交换树脂	D301R、D301G、Amberlite IRA96 树脂	-N <sup>+</sup> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	pH 1~6、选择性强、再生成本低	低浓度酸性含铬废水、低浓度阴离子去除	29-30
螯合树脂	IDA-D851、Purolite S930、PAO-g-PS、PVC-TETA 螯合树脂等	亚氨基醋酸基、偕胺胍基	选择性强; 吸附容量大; 稳定性强	低浓度高干扰重金属废水、特异性重金属去除、重金属回收	27,30-31

偏碱性 (pH 8~11) 的特点, 正好对应铝炭/改性微电解的优势区间, 并且反应无酸消耗, 为后续生化创造良好进水条件, 同时可避免铁碳法的返色与钝化弊端。

### 1.3 生物处理法

生物处理法是利用微生物的新陈代谢作用, 将废水中的有机污染物和部分无机污染物转化为无害物质, 从而实现废水净化。该方法适用于中药废水、染料废水等生物降解性好的废水处理<sup>[34]</sup>。根据微生物对氧气的需求, 生物处理法主要分为好氧处理和厌氧处理 2 类, 也可组合使用。

厌氧生物法具有能耗低、污泥产量少、可产沼气、耐高有机负荷等优点, 尤其适用于高浓度有机废水的前处理, 但其在高盐或难降解废水中的效率受限。崔立莉等<sup>[35]</sup>通过驯化耐盐菌和嗜盐微生物, 显著提升了厌氧工艺在高盐染料废水中的适应性和处理效能, 创新性地将生物强化与物化法耦合, 实现了染料的高效降解与脱色。借鉴该策略, 将其用于中药制药废水处理, 有望突破中药废水中高盐、高毒性、难降解有机物对微生物的抑制瓶颈, 提升厌氧段的可生化性和整体处理效率, 为中药废水的高效、低耗处理提供可行路径。

好氧生物法是指在充分供氧条件下, 利用好氧微生物的代谢活动, 将废水中的大分子有机物氧化分解为无害的小分子物质 (如 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等), 实现污染物高效去除的生物处理技术<sup>[36]</sup>。好氧生物法主要分为: 活性污泥法、生物膜法、生物接触氧化和深井曝气法等<sup>[37]</sup>。

活性污泥法是污水生物处理的核心技术之一, 其以活性污泥中的微生物为核心, 通过微生物代谢作用降解污水中污染物, 经历了微生物与污染物接

触、代谢降解、污泥沉降分离等过程。颜启辰<sup>[38]</sup>对比了全程好氧与缺氧/好氧 (anoxic/oxic, A/O) 2 种模式, 全程好氧模式操作简单, 但易出现丝状菌与菌胶团细菌竞争优势不明显、污泥絮体松散等问题, 净化效果不佳; A/O 模式则通过利用 A/O 的交替环境, 促进菌胶团细菌增殖, 减少骨架丝状菌数量, 优化污泥沉降性能, 同时提升微生物多样性与活性, 显著改善污染物去除效果。

生物膜法作为一类重要的好氧生物处理技术, 在污水处理体系中, 微生物菌群可附着于固体载体表面形成黏性生物膜, 该膜能够高效降解并去除污水中的有机污染物<sup>[39]</sup>。体积处理率高、运行成本低、操作简单、稳定性强等特点<sup>[40]</sup>。

生物接触氧化法是融合生物膜法与活性污泥法优势的污水生物处理技术<sup>[41]</sup>, 具有占地面积小、处理效率高、耐冲击负荷、无需复杂污泥回流系统的特点。熊霞等<sup>[42]</sup>融合了活性污泥法与生物膜法处理合流制水体, 出水化学需氧量、氨氮、总磷均值低且稳定, 达到准地表 IV 类水标准。

## 2 新型低碳技术

在“双碳”目标推动下, 中药制药废水处理技术正朝着低能耗、高资源回收率和低碳排放的方向发展<sup>[43]</sup>。膜分离技术与生物电化学系统 (bioelectrochemical system, BES) 作为 2 类代表性低碳技术, 通过材料创新与过程优化, 显著提升了废水处理的效率与可持续性。

### 2.1 膜分离技术

膜分离技术凭借其高效、低能耗和无需相变的特点, 已成为中药制药废水深度处理与资源化的核心手段<sup>[4]</sup>。该技术通过选择性分离膜实现了对废水中有机物、盐分和水的高效分离, 兼具污染物去除

与水资源回用的双重优势。在中药废水处理中，微滤、超滤、纳滤和反渗透等膜过程常组合应用，形成“双膜法”或“多膜集成工艺”<sup>[4,44]</sup>。

膜污染是制约其大规模应用的关键问题。近年来，研究者通过开发抗污染功能膜提升了技术的可持续性。Zhu 等<sup>[44]</sup>设计了一种负载芦荟大黄素与 Cu-FeOOH 的光催化 PVDF 膜，在降解废水中的鞣质时，膜通量恢复率可达 70% 以上，有效缓解了膜污染。此外，将膜技术与清洁生产结合，在制药上游环节实现废水资源减量，进一步强化了其低碳属性<sup>[45]</sup>。

### 2.2 BES

BES 是一种将电化学氧化与微生物代谢耦合的新型技术，通过电极反应与微生物协同作用，实现难降解有机物的高效去除与能源回收<sup>[46]</sup>。该系统在提升中药废水可生化性和削减化学需氧量方面表现突出，尤其适用于含生物碱、酚类等抑制性成分的高浓度废水<sup>[47]</sup>。

研究表明，BES 的核心优势在于其低碳能耗与原位资源化潜力<sup>[48]</sup>。Eray 等<sup>[49]</sup>创建了资源回收型电化学厌氧膜生物反应器，同步实现污染去除、资源回收与能源产出。该系统在实现碳、氮、磷全回收的同时，产生的甲烷纯度提高至 94%。成本估算表明，若对产生的甲烷电能进行回收利用，可覆盖反应器运行的电力与电极消耗成本，凸显其低碳与资

源化潜力。

膜分离技术与 BES 作为中药制药废水低碳处理的重要方向，分别通过材料设计与过程耦合实现了能效提升与资源回收。未来研究需进一步优化膜抗污染性能、降低 BES 能耗，并探索 2 类技术的集成工艺，以推动中药制药行业向“零排放”目标迈进。

### 3 污水处理案例分析

污水处理厂是运用多种设施、设备及工艺技术，处理生活污水和工业废水中的污染物<sup>[50]</sup>，净化水质，以实现水资源高效利用的设施。为响应国家“双碳政策与标准”，某厂以《城镇污水处理厂碳减排评估标准》(T/CUWA50055-2023) 为指导，通过碳排放影响因素分析，采用多级处理工艺，实现了高效去除污染物并降低碳排放<sup>[51]</sup>。该污水厂总规模为 10 万 m<sup>3</sup>/d，工艺流程主要包括预处理、二级生物处理、深度处理和污泥处理 4 个阶段，如图 2 所示。该设备的优化主要围绕能耗和药剂消耗的减排策略。首先曝气系统引入了基于溶解氧和氨氮反馈的精确曝气设备，从传统的恒速运行升级为变频驱动，结合前馈-反馈控制算法，减少了无效耗能；在污水处理段，针对碳源 (CH<sub>2</sub>COONa) 和除磷药剂 (PAC) 的投加，部署了精确加药设备，采用了基于进水负荷的前馈/反馈控制模式；对一体化深度脱水设备进行技改，采用新型脱水机替代传统设备，强化了机械压滤效率，消除了草木灰添加需求，技改

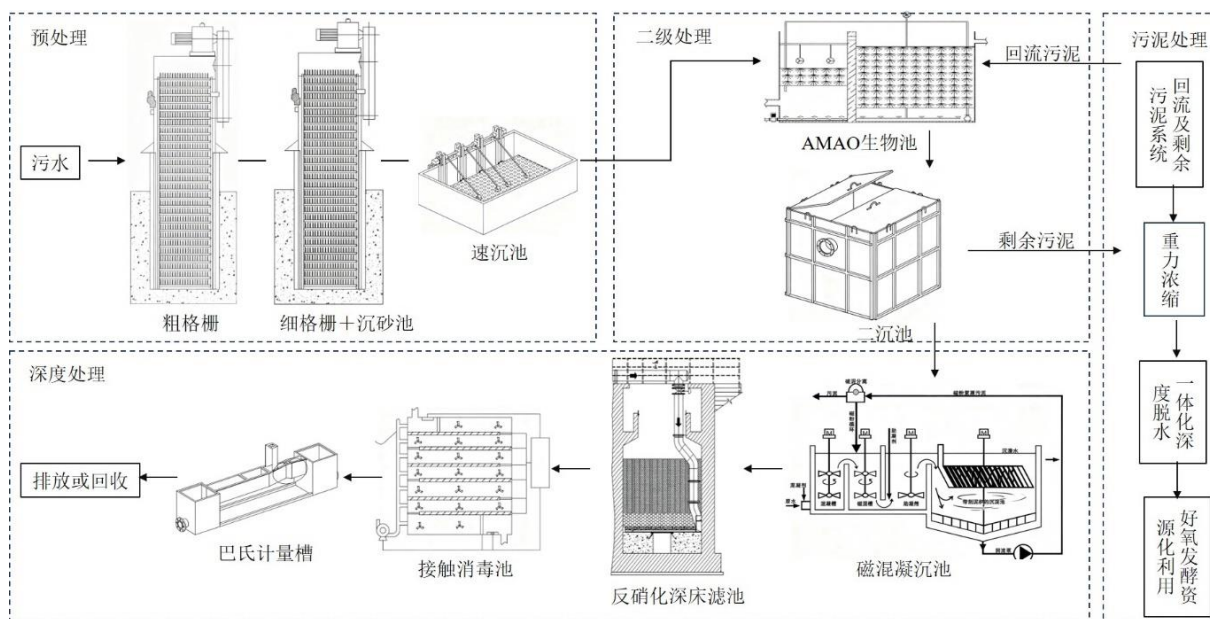


图 2 某制药厂的废水处理工艺流程图

Fig. 2 Schematic flow diagram of wastewater treatment process in pharmaceutical factory

后,脱水设备能效提升,污泥含水率稳定控制在60%以下,且减少了化学药剂相关的间接碳排放。

预处理阶段设置中、细格栅和速沉池,以应对进水的高泥沙含量,避免生物池堵塞;二级生物处理采用多段多级A/O工艺,无需污泥内回流,可充分利用进水碳源脱氮除磷;深度处理采用磁混凝沉淀结合反硝化深床滤池,进一步削减总磷和总氮指标;污泥处理则通过一体化连续深度脱水设备将含水率降至60%~65%,再进行好氧发酵。

通过上述设备优化,根据2023年度运行数据进行分析,该厂全年处理水量最大值为67 733 m<sup>3</sup>/d,最小值为21 547 m<sup>3</sup>/d,全年平均处理水量45 318 m<sup>3</sup>/d,均值水量达产率已高达90.63%,接近满负荷运行。在此条件下,全年出水水质稳定达标,优于出水标准,且在碳排放削减和处理效率方面取得了显著成果,全厂碳排放总量降低13.10%。其中,精确曝气节电15%~20%,贡献减排7.63%;精确加药降低药剂投加量20%~40%,贡献减排1.58%;脱水技改减少草木灰使用,贡献减排3.89%。碳排放强度从0.99 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>降至0.66 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>。2023年运行数据显示,在平均达产率90.63%的高负荷下,出水水质稳定达标且优于标准,印证了设备优化的可靠性。

中药制药废水常具有高化学需氧量、高氮磷及生物抑制性特点,可借鉴该厂的设备优化经验。该污水处理厂通过设备层面的精确控制与工艺技改,在曝气、加药和脱水等关键环节实现了优化,成果体现在碳排放强度降低、替碳能力提升。该优化框架为中药制药废水处理提供了可推广的范式;未来研究应聚焦智能设备与制药工艺的深度融合,以驱动行业的绿色转型。

#### 4 结语与展望

据研究统计,组合工艺因其较高的处理效率和相对成熟的经济性<sup>[52]</sup>,仍然是中药制药废水处理的主流技术路线<sup>[53]</sup>。如A/O组合工艺(如升流式厌氧污泥床+生物接触氧化)是目前应用最广泛、技术成熟度高的主流路线<sup>[54]</sup>,其优势在于能高效降解高浓度有机物并回收沼气能源,直接贡献于碳减排<sup>[55]</sup>。膜分离技术是实现废水回用和“零排放”目标的关键技术<sup>[56]</sup>,然而膜污染又带来高维护成本和浓盐水的后续处理问题<sup>[57]</sup>;同样AOPs是提高可生化性、破解有毒难降解物质的有效预处理手段<sup>[58]</sup>,但其化学品消耗大、可能产生二次污染及运行成本限制了它

的使用<sup>[59]</sup>,未来可以引进新型电催化氧化<sup>[60]</sup>等更绿色低碳的替代技术。

“双碳”目标的精髓不仅在于减排,更在于资源的循环利用。当前,中药制药废水处理技术正从传统的“末端治理”向“源头预防-过程控制-末端治理-资源回用”的全过程低碳化模式转变。多数中药废水中含有的有机酸、生物碱、黄酮类等物质本身具有价值,可以使用膜技术、吸附法等实现这些成分的选择性分离与富集<sup>[61]</sup>,这不仅能产生经济效益,也从源头削减了后续处理的污染负荷。厌氧消化产生的沼气(主要成分为甲烷)也是一种可再生能源<sup>[62]</sup>,可估算其热值及用于发电或产蒸汽所能替代的化石燃料量,从而量化地说明其对厂区碳足迹的抵消作用。深度处理后的产水回收可用于设备冲洗、冷却补水等,能大幅减少企业的新鲜水取用量。

面向“双碳”目标,中药制药废水处理技术正朝着绿色化、资源化和智慧化的方向演进。在制药工艺环节推广绿色清洁生产技术,从源头减少污染物的产生和排放,这与“双碳”的源头控制理念高度契合<sup>[4]</sup>;积极研发针对中药废水特点的高性能特种膜材料、高效电催化氧化等低能耗深度处理技术,优化厌氧生物处理技术(如内循环厌氧反应器)以提升沼气产率和能源回收效率<sup>[39]</sup>;将物理、化学、生物等方法进行优化组合,形成协同处理系统。同时,引入大数据、物联网和人工智能技术,实现对处理设施的精准曝气、智能加药和故障预警<sup>[63]</sup>,实现节能降耗、提高运营效率。

中药制药废水处理在“双碳”目标下面临着处理难度大、技术适应性、成本效益及资源化利用不足等多重挑战。未来,其发展将更加侧重于绿色低碳技术的创新与应用、资源能源的高效回收以及整个生产系统的智能化、循环化升级。中药制药废水处理的绿色发展不仅是环境工程问题,更是关系到中药产业可持续发展、生态文明建设和“健康中国”战略实现的重要一环。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 唐志宇. 某厂中药制药废水处理工程研究与优化 [D]. 湘潭:湘潭大学,2024.
- [2] 左喜梅,赵文婷. 2000—2021年中国工业碳排放生态足迹的时空动态演变与减排潜力 [J]. 干旱区研究,2025,42(9):1703-1714.

- [3] 刘协斌, 郭灵燕, 罗小荣. 中药制药企业面对“双碳”目标的节能降碳应对措施 [J]. 低碳世界, 2023, 13(11): 7-9.
- [4] 朱华旭, 唐志书, 李博, 等. 中药制药废水膜法处理的“零排放”技术方案及其实现途径探讨 [J]. 南京中医药大学学报, 2020, 36(5): 579-583.
- [5] 钟志君, 朱孟建, 甘玲, 等. 预处理/UASB/水解酸化/MBR 工艺处理中药废水 [J]. 中国给水排水, 2025, 41(8): 109-113.
- [6] 刘瑞娜. 厌氧处理中药废水效能强化及微生物机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [7] Liu X L, Yuan Y X, Ren N Q. Hydrodynamic behavior and start-up performance of a periodic anaerobic baffled reactor in an “every second” switching manner treating traditional Chinese medicine wastewater [J]. *Front Microbiol*, 2023, 14: 1282906.
- [8] 马玲玲, 赵兰婷, 刘慧, 等. 已上市中药生产工艺变更共性问题探讨及对策分析 [J]. 药学研究, 2025, 44(3): 302-306.
- [9] 李彬, 张晨阳, 陶伟伟. 制药废水处理技术研究进展 [J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 7-17.
- [10] 张为, 刘锋刚, 罗进, 等. 制药废水处理工程实例研究 [J]. 给水排水, 2023, 49(2): 85-89.
- [11] 张梅梅, 陈洁, 王嘉雯, 等. 中药废水处理技术研究进展 [J]. 当代化工, 2021, 50(5): 1249-1252.
- [12] 王青. 中药废水处理技术与发展的研究进展 [J]. 广东化工, 2021, 48(10): 132-133.
- [13] 李瑞, 李宁, 梁澜, 等. 水环境中微塑料去除技术的研究进展 [J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 1-5.
- [14] 王洪勃, 张娟, 杨子浩, 等. 混凝/絮凝技术在油田污水处理中的应用 [J]. 山东大学学报: 理学版, 2025, 60(10): 42-58.
- [15] 顾文林, 李彬芳. 高盐废水高效预处理工艺优化研究 [A] // “产业链空间配置优化与国土空间规划创新研讨会”暨第三届中国国土经济学会国土空间规划学术年会论文集 [C]. 石家庄, “产业链空间配置优化与国土空间规划创新研讨会”暨第三届中国国土经济学会国土空间规划学术年会, 2025: 29-32.
- [16] 陈倩倩, 孙冰冰, 闫帅腾, 等. 吸附法去除水中新污染物研究进展 [J]. 工业水处理, 2025, 45(11): 38-45.
- [17] Rahman M M, Maniruzzaman M, Ealam N, *et al.* Adsorptive removal of toxic heavy metal and dyes from wastewater by rice husk (lignocellulosic biomass) derived activated biochar: A fixed-bed column adsorption study [J]. *Carbohydr Polym Technol Appl*, 2025, 9: 100698.
- [18] Ferrer-Polonio E, Fernández-Navarro J, Iborra-Clar M I, *et al.* Removal of pharmaceutical compounds commonly-found in wastewater through a hybrid biological and adsorption process [J]. *J Environ Manag*, 2020, 263: 110368.
- [19] 薛祥, 谢洪珍, 王俊娥, 等. 锂云母水浸液化学沉淀法除杂工艺研究 [J]. 中国有色冶金, 2025, 54(4): 69-76.
- [20] 王冬姣. 造纸工业废水处理中化学沉淀法除钙工艺研究 [J]. 造纸科学与技术, 2023, 42(4): 70-73.
- [21] 班福忱, 张辰瑞. 高级氧化法-超滤联用工艺水处理技术研究进展 [J]. 水处理技术, 2025, 51(3): 10-16.
- [22] 段玉环, 郭腾蛟, 胡益民. 高级氧化法在皮革加工废水处理中的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(12): 7-9.
- [23] 戴昕, 高尚, 刘军, 等. 类 Fenton 氧化法用于填埋场垃圾渗滤液的深度处理 [J]. 工业水处理, 2022, 42(8): 108-112.
- [24] 张佳奇, 魏婕, 魏静新. 臭氧氧化法降解印染废水研究现状 [J]. 辽宁化工, 2025, 54(7): 1226-1229.
- [25] Lu H, Chen X L, Cong Q, *et al.* Research progress of ozone/peroxymonosulfate advanced oxidation technology for degrading antibiotics in drinking water and wastewater effluent: A review [J]. *Molecules*, 2024, 29(5): 1170.
- [26] 陈义, 李天祥, 刘松林, 等. 臭氧氧化法去除氟硅酸中氯的工艺研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57(12): 56-62.
- [27] Marin N M, Nita Lazar M, Popa M, *et al.* Current trends in development and use of polymeric ion-exchange resins in wastewater treatment [J]. *Materials*, 2024, 17(23): 5994.
- [28] 张萌晰, 姜高亮, 段理哲, 等. 工业废水中氯离子去除技术研究进展 [J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(4): 84-94.
- [29] 陈臻, 胡传伍, 姜占坤, 等. 阳离子交换树脂在吸附去除水中金属离子的应用进展 [J]. 广州化工, 2025, 53(11): 12-15.
- [30] 徐洋. 离子交换法去除模拟废水中 Cr (IV) 的实验研究 [J]. 鞍钢技术, 2025(3): 39-43.
- [31] 王悦, 杜小雨, 黄鑫, 等. 废水中重金属离子的处理方法及研究现状 [J]. 印染, 2023, 49(9): 91-96.
- [32] 常晓亮, 苏赛赛, 李轲, 等. 铁碳微电解法处理高 COD 废水的实验研究 [J]. 山西化工, 2021, 41(3): 22-24.
- [33] 杨海威. 铝炭微电解及改性微电解法处理印染废水的研究 [J]. 化工管理, 2022(25): 70-72.
- [34] 王瑞, 刘尧, 梁洪普, 等. 染料废水处理技术研究进展 [J]. 广州化工, 2024, 52(2): 21-23.
- [35] 崔立莉, 谢寅盼, 焦莉. 生物法处理高盐染料有机废水的研究进展 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(18): 26.
- [36] 祁义函, 赵霞, 刘敬维, 等. 苯胺类废水处理技术的研究进展 [J]. 广东化工, 2024, 51(6): 63-65.
- [37] 陈晓轩, 李方旭, 杨敬坡, 等. 抗生素废水处理技术的研究进展 [J]. 绿色科技, 2020, 22(4): 23-24.

- [38] 颜启辰. 基于 SBR 活性污泥法的净化厂污水净化处理工艺 [J]. 山西化工, 2025, 45(8): 252-254.
- [39] 温会涛. 高效生物处理技术在污水处理中的应用与优化 [J]. 石化技术, 2025, 32(8): 152-154.
- [40] 鄂正阳, 许子聪, 阎登科, 等. 不同生物脱氮系统中 N<sub>2</sub>O 的排放特征和减排路径研究 [J]. 安全与环境学报, 2026, 26(3): 1150-1160.
- [41] 吴利国, 王贻. 生物接触氧化技术在含磷生活污水处理中的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(17): 132-134.
- [42] 熊霞, 吴昭东, 汪向阳, 等. 生物接触氧化+混凝沉淀组合工艺处理合流制水体的研究 [J]. 广东化工, 2024, 51(14): 105-108.
- [43] 赵丽红, 郭佳艺. 膜分离技术在再生水中的应用及膜污染研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 7874-7883.
- [44] Zhu M Z, Li J J, Chen M H, *et al.* The electron shuttle of Aloe-emodin promotes the Cu-FeOOH solid solution photocatalytic membrane to activate hydrogen peroxide for the degradation of tannic in traditional Chinese medicine wastewater [J]. *Appl Catal B Environ Energy*, 2025, 361: 124566.
- [45] 慈志敏, 余强, 马鸿雁, 等. 双碳背景下中药制药企业碳足迹产生环节与核算模型 [J]. 中草药, 2022, 53(24): 7980-7988.
- [46] Yuan Y, Wang Y H, Zhang L L, *et al.* Alternating current-driven bioelectrochemical regulation prevents acidogenic accumulation in carbohydrate-rich anaerobic digestion [J]. *Chem Eng J*, 2025, 517: 164459.
- [47] 张泽玺. 复合电场耦合微生物协同处理中药提取废水的实验研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [48] Deng L J, Ngo H H, Guo W S, *et al.* Recent advances in circular bioeconomy based clean technologies for sustainable environment [J]. *J Water Process Eng*, 2022, 46: 102534.
- [49] Eray E, Candelario V M, Boffa V, *et al.* A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration: Recent advancements, challenges, and perspectives [J]. *Chem Eng J*, 2021, 414: 128826.
- [50] 王卫红, 冉丽君, 杨金涛, 等. 我国工业园区污水处理厂废水管控现状及建议 [J]. 环境工程学报, 2025, 19(7): 1619-1626.
- [51] 李学瑞, 贾建伟, 党晓宏, 等. 西北某污水处理厂碳排放核算及碳减排潜力分析 [J]. 给水排水, 2025, 51(1): 64-69.
- [52] 易中彪. 脱硫塔浆液循环泵经济优化调度 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [53] 廉鹏. 铁碳-炭滤组合工艺在某竹产业废水处理站改扩建设计中的应用 [J]. 净水技术, 2025, 44(10): 196-203.
- [54] Zhou L J, Yang X F, Gu W, *et al.* Removal and prediction of chemicals in anaerobic-anoxic-aerobic wastewater treatment system: Case study on organophosphates [J]. *Emerg Contam*, 2024, 10(4): 100344.
- [55] Areskou T, Mendoza J A, Modin O, *et al.* Sustainable carbon management in aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresour Technol*, 2025, 431: 132624.
- [56] 张成林, 裘洋波, 王超, 等. 工业废水资源化的膜分离技术前沿与进展研究 [J]. 水处理技术, 2025, 51(8): 23-28.
- [57] 郭鑫, 芦超杰, 张少朋, 等. 膜分离导电隔网设计及膜污染缓解机制 [J]. 环境工程学报, 2025, 19(12): 3160-3170.
- [58] 孙佳薇, 张洋, 金建华, 等. 高级氧化法对废水可生化性和生物抑制性的影响 [J]. 中国给水排水, 2025, 41(17): 120-125.
- [59] 刘玉学, 李彭, 王拯. 我国污水处理厂中典型抗生素的分布及处理研究 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 23-30.
- [60] Sarasidis V C, Dutzi J, Petsi P N, *et al.* Decontamination of high salinity supercritical water gasification wastewater by an integrated electrocoagulation/electrochemical oxidation process [J]. *J Environ Chem Eng*, 2025, 13(5): 118491.
- [61] 张紫扬. 丹红注射液生产废水的量丰成分的膜法回收研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2025.
- [62] Huang M M, Pan M H, Chang F Y, *et al.* Reduction of energy consumption and greenhouse gas emissions in wastewater treatment plant: A case study of utilizing anaerobic sludge digestion [J]. *Next Energy*, 2025, 7: 100289.
- [63] Show D Y, Guo H, Ling Z H, *et al.* Optimization of denitrification carbon source, nitrification aeration and coagulants dosing with artificial intelligence in full-scale municipal wastewater treatment [J]. *Results in Engineering*, 2025, 27: 106879.

[责任编辑 赵慧亮]