制药行业污染物排放特征与控制技术研究进展

竹 涛[1*],陈星月[1],杨鑫玉[1],李 丽[2],刘艳新[3],曾 周[3],赵宇龙[3]
(1.中国矿业大学(北京)化学与环境学院,,北京 100083;
2.北京中鼎恒业科技股份有限公司,北京 100071;
3.神舟生物科技有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010206)

摘要:系统综述了制药行业大气、水体及固废的污染排放特征以及现有末端治理技术与溶媒回收、智能化生产等过程控制手段的应用现状。在此基础上,从技术创新、政策标准完善及产业结构优化3个方面,探讨了废水废碱资源化与数字孪生技术耦合的绿色低碳发展路径,旨在为制药行业的绿色可持续发展提供理论参考与实践借鉴。

关键词:制药行业;排放特征;再利用;绿色低碳;路径分析
中图分类号:X787 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0071-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.013

Research progress on pollution emission characteristics and control technologies in the pharmaceutical industry

ZHU Tao[1*], *CHEN Xing-yue*[1], *YANG Xin-yu*[1], *LI Li*[2], *LIU Yan-xin*[3], *ZENG Zhou*[3], *ZHAO Yu-long*[3]
(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2.Beijing ZhongDingHengYe Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China; 3.Shenzhou Biotech Co., Ltd., Hohhot 010206, China)

Abstract:This paper systematically reviews pollution characteristics across air, water, and solid waste, and evaluates current abatement technologies alongside process controls like solvent recovery and intelligent manufacturing. Furthermore, it explores green low-carbon pathways, specifically integrating wastewater and waste alkali resource utilization with digital twin technology-from the perspectives of technological innovation, policy and standard improvement, and industrial optimization. These insights aim to provide theoretical and practical references for the industry's sustainable transformation.

Key words:pharmaceutical industry; emission characteristics; reuse; green and low-carbon; path analysis

医药工业不仅是国民经济的战略性新兴产业,更是衡量国家科技创新能力与民生保障水平的重要标尺。作为“中国制造2025”规划的重点领域,我国医药产业在政策红利与市场需求的双重驱动下,呈现出高速增长态势,已成为全球医药市场的重要组成部分[1]。然而,产业的高速增长亦伴随着环境负荷的加剧,制药行业“高污染、高能耗、高排放”的粗放型发展模式已难以适应生态文明建设的新要求。

从产业结构来看,我国药企呈现“多、小、散”格局,产业集中度不足20%,远低于发达国家50%以上的水平,导致生产资源配置效率低下;从生产技术来看,部分企业生产工艺装备自动化程度低,原辅材料转化率不高,导致“三废”排放量居高不下;从环境成本来看,污染治理费用占企业生产成本的比例较高,部分中小企业为降低成本甚至存在违规排放行为,对生态环境造成严重威胁[2-5]。

制药行业的污染具有“全流程、多介质、高复杂”的特点,涉及数百种化学物质,包括有毒有害及难降解的物质[6-7]。因此,深入剖析制药行业的污染排放特征并总结现有治理技术,对于推动行业高质量发展具有重要的理论与现实意义。

1 制药行业污染物排放特征

制药行业作为过程制造业的典型代表,生产链条长、工艺复杂,导致污染排放呈现出显著的“全流程、多介质、高复杂”特征。发酵、化学合成、提取等不同生产工艺所对应的污染物种类及理化性质差异巨大[8]。基于此,本研究从大气、水、固废及其他污染物4个维度,详细阐述其排放特征。

收稿日期:2026-01-14;**修回日期**:2026-09-02
基金项目:呼和浩特市引进高层次创新创业人才(团队)项目(2023RC-高层次-4);鄂尔多斯重点研发计划项目(YF20240008)
作者简介:竹涛(1979-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为大气环境管理与污染控制,通讯联系人,bamboozt@cumtb.edu.cn。

1.1 大气污染物排放特征

制药废气主要源自生产合成、物料储运及末端治理设施的次生排放。其中,挥发性有机物(volatile organic compounds,VOCs)和恶臭气体是最主要的污染物,具有来源分散、嗅阈值低且难收集处理的特点。

1.1.1 生产过程废气

根据生产工艺的不同,生产过程废气又包括化学合成工艺废气、发酵废气、提取废气、干燥废气等。废气中 VOCs 及恶臭气体排放量大,处理难度高。生物制药行业废气核心特点如表 1 所示。

表 1 生物制药行业废气核心特点

排放环节	主要污染物	排放特性
发酵车间	恶臭物质(氨、硫化氢、甲硫醇、吲哚)、低浓度 VOCs(醇类、酯类)、微生物、水蒸气	高湿度(相对湿度 80%~95%)、恶臭强度高、VOCs 浓度低(<500 mg/m^3)、间歇性排放
提取/精制车间	中高浓度 VOCs(有机溶剂:甲醇、乙醇、丙酮、乙酸乙酯)、少量恶臭物质	VOCs 浓度波动大(500~3000 mg/m^3)、有一定毒性、部分溶剂易燃
化学合成车间	高浓度 VOCs(卤代烃、芳香烃等)、酸性气体(HCl、H_2SO_4 雾)、有毒杂质	VOCs 浓度高(>3000 mg/m^3)、成分复杂(含多环芳烃、卤代物)、腐蚀性强
废水处理站	恶臭物质(氨、硫化氢、胺类)、低浓度 VOCs(挥发酚、烷烃)、异味	恶臭扰民性强、浓度极低(VOCs<200 mg/m^3)、湿度高

发酵废气呈现出典型的“大风量、高湿度、低浓度、臭气强”的特征。发酵前的高温灭菌阶段会产生大量水汽,VOCs 浓度较低,主要为原料及营养物质的挥发气,排放具有间歇性(持续时间短);而发酵阶段的废气成分极为复杂,包含发酵代谢产物、少量培养基物质等,VOCs 种类多但含量不高,臭气浓度却高达 5 000~7 500(无量纲)。典型离子包括青霉素生产过程中产生的刺激性气味、硫氰酸红霉素发酵时的恶臭,这类气味因混合了菌群代谢产物与发酵产物的特殊气味,感官刺激极强[9-10]。

化学合成废气因涉及硝化、磺化、酰化等复杂反应单元,且化学原料药生产具有品种多、更新快、工艺复杂等特点,原辅材料涉及酸、碱、有机溶剂等数百种物质,导致废气种类繁杂、排放量巨大,其污染物组成随原辅材料与反应路线变化而显著变化[11-13]。

以上 2 种废气可以参照化工尾气处理工艺进行处理,一般采用吸收吸附法、热氧化法进行处理并达标排放。根据 VOCs 的组分和浓度,合理采用冷凝、化学吸收、物理吸附、浓缩以及直燃、蓄热燃烧、催化燃烧等方式进行处理。

而提取与干燥废气中,提取过程需使用大量有机溶媒(如甲醇、乙醇、丙酮、乙酸乙酯等),这些溶媒在高温条件下极易挥发,形成高浓度溶媒废气;原料药结晶干燥前,需用有机溶剂水溶液清洗表面残留物,干燥过程中有机溶剂挥发形成干燥废气,若排放量多、浓度高,还需对母液进行回收处理[14]。

1.1.2 污染治理过程废气

污染治理过程废气主要来源于污水处理站。制药废水因有机物浓度高、色度深、含难降解及有毒物质,在处理过程中(如调节池、厌氧池、沉淀池、好氧池、污泥脱水间等单元)会逸散出 H_2S、VOCs 等恶臭气体。这些气体种类多、异味强,是导致企业周边环境投诉的主要原因之一,因此多数制药废水处理设施需采取密闭措施,将废气统一收集处理[15-16]。

总之,不同过程产生的 VOCs 及恶臭气体在种类和浓度上都存在较大差异。以发酵臭气为例,发酵过程中,原料中的蛋白质、氨基酸在微生物的作用下发生脱羧和脱氨产生异臭味,臭气浓度一般在 5 000~7 500(无量纲)之间,此外,发酵菌种代谢产物也可能具有特殊气味,发酵尾气中多种气味混合后,导致尾气的异味特征非常复杂,形成特殊的“发酵味”[17-18]。以污水处理站废气为例,污水处理站产生的 VOCs 和异味物质种类较多,异臭味污染较为严重,这也是很多制药废水处理设施需要密闭的原因,废气可以统一收集后进行相应的处理。

原辅材料不同、生产品种不同、工艺不同等因素,导致不同生产过程产生的 VOCs 和臭气在种类和浓度上也各不同,这都极大地提高了废气的治理难度。VOCs 及臭气问题的彻底解决仍是困扰化学原料药企业发展的重要瓶颈,亟需解决。

1.2 水污染物排放特征

化学药品原料药制造是制药行业中污染负荷最大的子行业,废水处理难度居各行业之首。

1.2.1 废水来源

废水来源主要包括车间工艺用水(如反应釜冷却水、稀释用水)、设备及管线清场清洗废水(含残

留原料及产品)、药物提取或精制工序的固液分离废水(如过滤、离心产生的母液)等。废水中不仅含有未反应的原辅材料、药物中间体、残留产品,还包含生产过程中产生的未知副产物,以及废水在有氧/缺氧条件下生成的新物质[19-20]。

1.2.2　废水特性

发酵制药废水主要包括废滤液、母液、溶剂回收残液等,其水质主要含有以下几个特征:污染物浓度高,如废滤液、母液的 COD 一般都在 10 000 mg/L 以上;含氮量高,C/N 低,严重影响微生物的生长与代谢,经普通生化处理后,氨氮往往不达标;硫酸盐浓度高,对废水的厌氧生物处理带来严重影响;发酵制药废水色度高,普通生物二级处理难以实现达标排放,仍需深度处理[21-23]。

化学合成废水由于原料利用率低,大量原辅材料进入废水并呈现以下特点:产生的废水量巨大,内部成分复杂,含有大量高毒性有机物和药物中间体;工艺多采取的间歇式生产模式,相应的化工废水也是间歇式排放,水质、水量变化大;产生的废水污染物浓度更高,内部成分更复杂,废水中所含污染物种类多,包括原辅材料、难生化降解的化学合成物质、残留药物成分以及药物降解中间产物等,还含有大量的氯化物、硫酸盐等盐类物质[24]。

1.3　固体废弃物排放特征

制药行业的固体废弃物以危险废物为主,处理成本高、资源化利用难度大,是行业环境管理的重点与难点。

1.3.1　废渣种类及定性

根据《国家危险废物名录》,化学合成原料药生产过程中产生的蒸馏残余物、废母液及反应基废物被明确列为危险废物(HW02 类)。此外,常见的废渣还包括发酵过程产生的废菌丝,其中含大量蛋白质,但可能携带抗生素残留;废水处理站产生的污泥(含重金属、难降解有机物等);高浓度有机废水蒸发结晶产生的工业废盐(成分复杂,含多种有机污染物);脱色处理使用后的废活性炭,其中吸附了大量有机污染物[25]。

1.3.2　废渣处理难点

危险废物处理成本高昂,国内固体危废处理费用普遍在 3 000 元/t 以上;资源化利用技术不成熟,如废菌丝虽含蛋白质,但因残留药物毒性难以直接作为饲料;工业废盐因成分复杂,缺乏规范的分盐技术,难以实现资源化利用;污泥含水率高(通常在 80%以上),降低含水率需投入大量成本,且焚烧处置时易产生二噁英等二次污染物。

1.4　其他污染物排放特征

1.4.1　溶媒

溶媒是原料药生产中不可或缺的物料,主要用于吸附、萃取、洗涤等环节,常用种类包括甲醇、乙醇、丙酮、二氯甲烷、丁醇、乙酸乙酯、叔丁胺等。

制药生产常用溶媒普遍具有较强挥发性,且不同组分沸点接近、杂质组成复杂,增加了分离与回收难度[17]。

1.4.2　废碱

生产过程中大量使用氢氧化钠、碳酸氢钠、氨水等碱液,用于吸附柱再生、pH 调节、脱色等环节。若不回收利用,不仅会增加原料成本,还会提高废水的 pH 和碱度,加重后续生化处理负担(如抑制微生物活性)。

2　制药行业污染治理技术现状

针对上述污染特征,行业已形成涵盖源头控制、过程削减、末端治理等多个环节,以下按污染物类型详细阐述。

2.1　VOCs 及恶臭气体治理技术

目前我国制药行业大气污染物排放需满足《挥发性有机物无组织排放标准》(GB 37822—2019)和《制药工业大气污染物排放标准》(GB 37823—2019),其中对 VOCs、硫化氢、臭气浓度等指标制定了严格限值,例如,化学合成类原料药企业 VOCs 排放浓度限值为 60 mg/m^3,臭气浓度限值为 2 000[26-27]。

当前采用“源头削减+过程控制+末端治理”的全过程管控模式;源头削减通过清洁生产技术革新,选用低挥发性原辅材料,优化生产工艺(如采用密闭反应装置),减少生产及物料储运环节的气体散逸;过程控制对易挥发环节(如储罐呼吸口、反应釜进料口)采取密闭收集措施,确保废气收集效率≥90%;末端治理根据废气成分、浓度及性质,选择适宜的处理工艺,确保达标排放[28],如图 1 所示。

针对发酵废气气量大、浓度低的特性,常采用“预处理(洗涤除雾)+吸附(活性炭或分子筛)”或“预处理+生物滤池”工艺;高浓度时段可叠加催化燃烧技术。对于化学合成废气成分复杂且浓度波动大的特性,常用“冷凝回收(高浓度有机废气)+化学吸收(酸碱中和)+蓄热燃烧(RTO)”组合工艺,其中 RTO 对 VOCs 的去除率可达 95%以上。针对提取与干燥废气以溶媒回收为核心的特性,采用“冷凝+吸附”工艺,如甲醇、乙醇等可通过低温冷凝回收(回

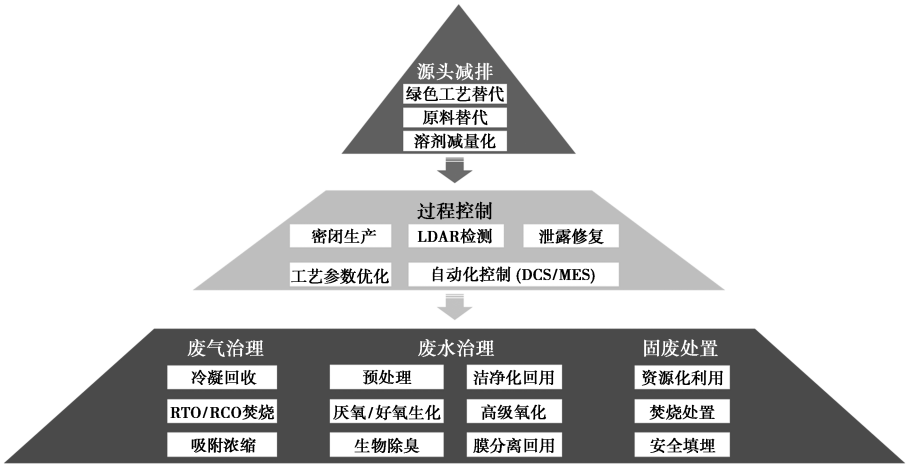


图 1 制药行业全过程污染管控模式示意图

收率可达 80%以上),再经吸附法深度处理。而对于污水处理站废气,常采用“密闭收集+化学洗涤(如碱洗除 H_2S)+生物除臭”工艺,恶臭去除率可达 90%以上[29]。

2.2 制药废水治理技术

针对制药废水治理,国家于 2010 年 7 月 1 日颁布《制药工业水污染排放标准》(GB 21903—2008),将制药废水细分为发酵类、化学合成类、提取类等类别并采用“预处理+生化处理+深度处理”的三段式治理工艺,示意图如图 2 所示。预处理阶段主要通过混凝沉淀、高级氧化等技术降低污染物浓度、改善可生化性;生化处理阶段采用“厌氧(如 UASB、IC 反应器)+好氧(如 SBR、MBR)”组合工艺降解有机污染物;而深度处理阶段采用纳滤(nanofiltration,NF)、反渗透(reverse osmosis,RO)或活性炭吸附等技术确保达标排放。

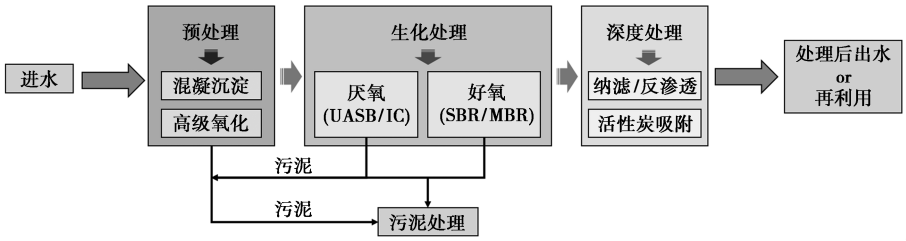


图 2 制药废水“预处理+生化处理+深度处理”三级工艺流程

化学原料药生产利润微薄,而废水治理成本占生产成本的 10%~20%,部分企业因资金不足导致治理设施运行不稳定。技术层面虽可实现达标排放,但如何在成本可控范围内优化工艺是行业普遍面临的挑战。

2.3 废渣无害化处置及资源化利用技术

废渣无害化处置原则主要基于源头减量、分类处置以及成本控制,其中源头减量主要通过优化生产工艺,减少废渣产生;分类处置主要针对危险废物并将其交由有资质单位焚烧或安全填埋;而成本控制主要通过高效压滤机将污泥含水率从 80%降至 60%以下,减少处置成本。其中废菌丝经高温灭活后可作为有机肥原料或饲料添加剂,但需检测药物残留;工业废盐可采用纳滤分盐和蒸发结晶工艺制备工业级精盐;而污泥可采用高效焚烧实现污泥减量化与热能量回收以此实现资源化利用。

目前废渣无害化处置缺乏统一的废盐资源化标准及技术规范,导致多数企业无法实现危废解控;资源化技术成本高,中小企业难以承受。

2.4 溶媒回收技术

溶媒回收是制药行业实现经济效益与环境效益双赢的关键。其原理主要基于溶媒沸点差异,通过精馏、吸附及膜分离等技术实现分离回收。

目前主要有母液回收、废气回收和低沸点溶媒专项回收 3 种回收技术,其中母液回收主要通过精馏塔对结晶母液进行蒸馏,回收其中的溶媒;废气回收主要采用“冷凝+吸附”一体化系统,从提取、干燥废气中回收溶媒;而低沸点溶媒专项回收技术主要针对甲醇等易挥发溶媒,通过多级冷凝与吸附耦合技术提升回收率[17]。

溶媒价格昂贵,提高回收率可显著降低生产成本,如回收率提升 10%,年产能 1 万 t 的企业可增收上千万元,同时减少废气、废水污染负荷,图 3 为典型溶媒废气多级冷凝回收技术流程。

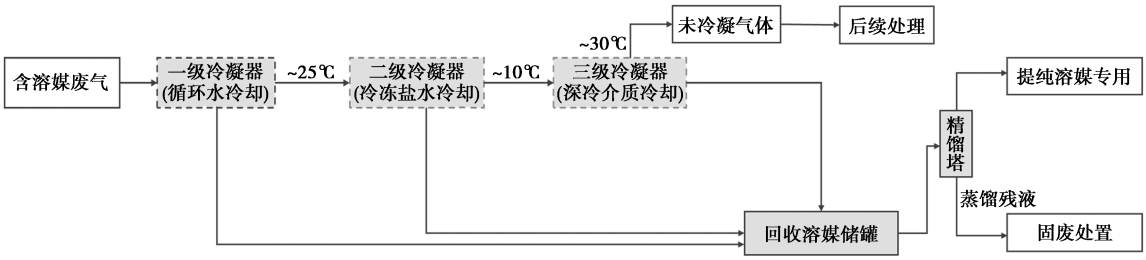


图 3　溶媒废气冷凝回收工艺示意图

2.5　智能化生产技术

智能化是提升治污水平的内生动力,可提升生产稳定性与资源利用率,减少人为操作导致的污染波动。例如 7-ACA 发酵工艺采用自动化控制系统后,可实现进料、pH 的全自动控制,使得产品质量稳定性显著提升。另外,一步反应过程中需实时监测罐内物料状态、控制温度压力,且化学原料药工艺复杂,目前行业整体智能化水平仍较低,未来将向全流程智能化、机器人操作及系统柔性化生成发展,以满足“健康中国”战略对医药产业绿色化、高效化的要求。

3　行业发展展望

制药工业的绿色低碳发展是一项系统性工程,未来应聚焦于技术创新、政策完善与产业结构优化等路径。

(1)重点研发原子经济性反应等绿色工艺,从源头减少“三废”产生,开发低能耗 VOCs 治理、高抗污染的膜材料、低成本的废盐资源化技术,利用数字孪生技术与制药生产融合,实现工艺参数的精准调控与污染预警。

(2)出台工业废盐、废菌丝等危废资源化利用标准,明确解控条件,实施差异化的环保政策,激励绿色工艺的应用,加强全过程在线监测。

(3)推动企业兼并重组,提高产业集中度至 50%以上,建设医药产业园区,推行“共享环保设施”模式(如集中污水处理厂、危废处置中心),构建“生产-治理-循环”闭环体系。

参考文献

[1] 程颖,徐勃,王秀艳,等.制药行业典型企业 VOCs 排放特征及处理技术比较[J].环境工程学报,2022,16(7):2257-2266.

[2] Maria W M,Barbara T C,Janusz R R.Risk assessment method for pharmaceutics removal in treated wastewater-challenges of new Directive (EU) on urban wastewater treatment[J].Science of the Total Environment,2025,996:180141.

[3] Zhu W J,Cui Y W,Yang H J.Treatment of volatile ethanol gas emitted by pharmaceutical manufacturing industry in a combination process of spraying absorption and wastewater biological treatment [J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2024,12(6):114582.

[4] Shi X Q,Leong K Y,Ng H Y.Anaerobic treatment of pharmaceutical wastewater:A critical review[J].Bioresource Technology,2017,245(PA):1238-1244.

[5] Bian X Q,Liu F Y,Zhang J X,*et al*.Photocatalytic degradation of tetracycline antibiotics in swine wastewater using Fe^{3+}-loaded $NaBiO_3$ coupled with sodium persulfate[J].Catalysis Communications,2023,174:106579.

[6] Balarak D,Mostafapour K F,Akbari H,*et al*.Adsorption of amoxicillin antibiotic from pharmaceutical wastewater by activated carbon prepared from azolla filiculoides[J].Journal of Pharmaceutical Research International,2017,18(3):1-13.

[7] 刘新军,周冰,刘志建,等.石家庄典型制药行业废水中抗生素污染特征[J].绿色科技,2025,27(8):70-74.

[8] Zhang H H,Wang Z W,Wei L,*et al*.Recent progress on VOC pollution control *via* the catalytic method[J].Chinese Journal of Catalysis,2024,61:71-96.

[9] 翟增秀,崔焕文,王亘,等.典型制药企业污水站 VOCs 废气和恶臭排放特征[J].环境化学,2025,44(2):549-557.

[10] Chen K T,Gu X,Cai M,*et al*.Emission characteristics,environmental impacts and health risk assessment of volatile organic compounds from the typical chemical industry in China[J].Journal of Environmental Sciences,2025,149:113-125.

[11] Zhao H C,Cheng Y,Liu Y L,*et al*.Characteristics of volatile organic compounds emissions and odor impact in the pharmaceutical industry[J].Atmosphere,2024,15(11):1338.

[12] 王琛,杨佳莹,王宝琳,等.山东省化学合成类制药 VOCs 排放特征及影响[J].环境科学,2024,45(12):7012-7020.

[13] Zhang G F,Fei B,Xiu G L.Characteristics of volatile organic compound leaks from equipment components:A study of the pharmaceutical industry in China[J].Sustainability,2021,13(11):6274.

(下转第 80 页)

omatic reactivity at bimetallic catalysts[J].The Journal of Physical Chemistry C,2024,128(12):5084-5092.
[12] Wang W,Li M F,Zhang Y,*et al*.Structure-performance relationship between zeolites properties and hydrocracking performance of tetralin over NiMo/Al_2O_3-Y catalysts: A machine-learning-assisted study[J].Fuel,2025,390:134652.
[13] Feng H S,Zhang M,Ge Z,*et al*.Designing efficient single-atom alloy catalysts for selective C═O hydrogenation: A first-principles, active learning and microkinetic study[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2023,15(48):55903-55915.
[14] Alexandra J N,Attila G,Fiser B,*et al*.Towards machine learning in heterogeneous catalysis: A case study of 2,4-dinitrotoluene hydrogenation[J].International Journal of Molecular Sciences,2023,24(14):11461.
[15] Liu Q Y,Shang C,Liu Z P.In situ active site for CO activation in Fe-catalyzed fischer-tropsch synthesis from machine learning[J].Journal of the American Chemical Society,2021:143(29):11109-11120.
[16] Fang R B,Zhang Q J,Yao C,*et al*.Prediction of catalytic performance of metal oxide catalysts for alkyne hydrogenation reaction based on machine learning[J].Applied Catalysis A:General,2024,687:119969.
[17] Shi Y F,Kang P L,Shang C,*et al*.Methanol synthesis from CO_2/CO mixture on Cu-Zn catalysts from microkinetics-guided machine learning pathway search[J].Journal of the American Chemical Society,2022,144(29):13401-13414.
[18] Wu F,Ye K,Jiang J.Identifying adsorption states of OER intermediates on single-atom catalysts via a spectral machine learning framework[J].The Journal of Physical Chemistry Letters,2025,16(31):7780-7788.
[19] Ma Q L,Nie H,Yang P,*et al*.Insights into structure-activity relationships between Y zeolites and their n-C_{10} hydrocracking performances via machine learning approaches[J].Chinese Journal of Catalysis,2025,71:187-196.
[20] Hu Z Y,He Z Z,Chen L,*et al*.In situ selective site-blocking dictates benzene partial hydrogenation to cyclohexene on Zn-promoted Ru-based catalysts[J].ACS Catalysis,2025:15(9):7015-7027.
[21] Diptendu R,Shyama C M,Biswarup P,*et al*.Machine learning-driven high-throughput screening of alloy-based catalysts for selective CO_2 hydrogenation to methanol[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2021,13(47):56151-56163.
[22] Wang J Y,Xu H X,Wu J G,*et al*.Rational design of alloy catalysts for alkyne semihydrogenation via descriptor-based high-throughput screening[J].ACS Catalysis,2024,14(2):1220-1230.
[23] 黄成,刘操,黄磊,等.基于机器学习的 CO_2 催化加氢制航空煤油筒式反应器数学模拟分析与优化[J].低碳化学与化工,2024,49(7):120-128.
[24] Ge X H,Yin J,Ren Z H,*et al*.Atomic design of alkyne semihydrogenation catalysts via active learning[J].ACS,2024,146(7):4993-5004.
[25] 董毅.基于机器学习的多元金属氧化物基催化剂的高效开发与性能研究[D].杭州:浙江大学,2024.
[26] Lee H W,Kim K,An J J,*et al*.Toward the practical application of direct CO_2 hydrogenation technology for methanol production[J].International Journal of Energy Research,2020,44(11):8229-8239.
[27] 胡建钰,杨峻毅,胡素磊,等.可解释机器学习辅助建立催化科学理论[J].中国科学:化学,2025,55(6):1704-1714.
[28] Li A M,Cui P,Wang X,*et al*.The artificial intelligence-catalyst pipeline:Accelerating catalyst innovation from laboratory to industry[J].Chemical Engineering Science,2025,19(7):55.
[29] Alkadhem A,Botella E P,Braune S P,*et al*.Engineering catalysts at the multiscale: Past, present, and future of catalyst manufacturing and shaping processes[J].ChemCatChem,2025,18:e01109.■

(上接第 75 页)

[14] Zhong Z L,Ji Y J,Zhao M K,*et al*.Comparison of emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds of typical pharmaceutical industries in central plains,China[J].Atmospheric Pollution Research,2025,16(3):102396.
[15] 张昱,冯皓迪,唐妹,等.β-内酰胺类抗生素的环境行为与制药行业源头控制技术研究进展[J].环境工程学报,2020,14(8):1993-2010.
[16] 李胜,曾晓希,王格,等.四环素类抗生素的微生物降解研究进展[J].工业微生物,2024,54(5):13-15.
[17] 王丽,韩成龙.有机溶媒回收工艺在工业生产中的应用[J].化工管理,2024,(20):142-145.
[18] 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.
[19] 李俊生,李思航,李嘉慧,等.光催化氧化技术处理制药废水的研究进展[J].应用化工,2024,53(8):1949-1954.
[20] Ganiyu S O,Martínez-Huitle C A,Oturan M A.Electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: Advances in formation and detection of reactive species and mechanisms[J].Current Opinion in Electrochemistry,2021,27:100678.
[21] Fang Z,Yao P,Lin Hua,*et al*.Fugitive emissions of volatile organic compounds from the pharmaceutical industry in China based on leak detection and repair monitoring,atmospheric prediction,and health risk assessment[J].Journal of Environmental Science and health.Part A,Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering,2023,58(7):11-14.
[22] 钟敏.制药废水处理技术及应用概述[J].大众标准化,2022,(6):147-148,151.
[23] 王晓杰,冷雪,杜浩升,等.厌氧生物技术在工业废水处理中的应用分析[J].工业微生物,2025,55(2):62-64.
[24] Li M S,Wang X,Ma M Y,*et al*.Efficient treatment of high-concentration pharmaceutical wastewater with high-salinity by chemical synthesis coupling with evaporation: From lab-scale to pilot-scale[J].Chemical Engineering Journal,2024,496:154278.
[25] 生态环境部,国家发展和改革委员会,公安部,等.国家危险废物名录(2025 年版)[J].中华人民共和国国务院公报,2025,(7):17-47.
[26] 生态环境部.GB 378222019 挥发性有机物无组织排放控制标准[J].中国人造板,2019,26(7):41.
[27] 生态环境部.GB 41616—2022 印刷工业大气污染物排放标准[J].广东印刷,2023,(1):8.
[28] 常城.复合处理工艺对于生物发酵废气处理效果的研究[J].科学技术创新,2021,(12):192-194.
[29] Bai L J.Nanofiltration membrane wastewater treatment technology for pharmaceutical enterprise wastewater[J].Journal of Biotech Research,2024,16:264-274.■