

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.111



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于微生物共代谢的工业废水混合处理 研究现状与展望

王骞, 张崇军, 周丹丹

(东北师范大学 吉林省水污染控制与资源化工程实验室, 长春 130024)

摘要:随着工业的发展,工业废水产量与日俱增,废水中持久性强、毒性强的难降解有机物严重影响废水的处理效率。基于微生物共代谢理论,易降解有机质能显著提高微生物对难降解有机物的处理效率。然而,目前污、废水处理过程中易降解有机质主要来源于人工添加商业碳源,提高了运行成本,且产生大量碳排放。将部分富含易降解有机物的废水作为易降解有机质与难降解有机废水混合处理,能提高难降解有机物的处理效率,实现废水资源化。阐述工业废水的特征与危害,论述微生物共代谢机制的研究现状,重点综述基于微生物共代谢的食品工业废水、纺织废水、造纸废水、部分制药废水、生活污水及工业园区内部废水混合处理研究与应用案例,提出废水混合处理应用的前景与挑战,对其未来发展进行展望,以期对废水混合处理技术的应用提供指导,为建设绿色低碳工业园区、实现废水绿色低碳处理提供参考。

关键词:废水混合处理;工业废水;共代谢;易降解有机质;难降解有机物

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)05-0222-16

Literature review of industrial wastewater mixed treatment based on microbial co-metabolism

WANG Qian, ZHANG Chongjun, ZHOU Dandan

(Engineering Lab for Water Pollution Control and Resource Recovery of Jilin Province, Northeast Normal University, Changchun 130024, P. R. China)

Abstract: With the development of industry, the industrial wastewater output has been increased over time. However, the refractory and toxic organic compounds in industrial wastewater restrict the treatment efficiency significantly. Based on the co-metabolism theory of microorganisms, the addition of readily biodegradable organic substrates has been successfully employed to improve the removal efficiency of refractory organic compounds. However, the readily biodegradable organic substrates used in practical wastewater treatment process mainly come from the artificial addition of commercial carbon sources, which would increase the operating cost and emit a large amount of carbon. Mixing some wastewater rich in readily biodegradable organic

收稿日期:2022-05-31

基金项目:中国博士后科学基金(2022M710655);中央高校基本科研业务费(2412022QD015)

作者简介:王骞(2000-),女,主要从事水污染控制研究,E-mail:wangq464@nenu.edu.cn。

张崇军(通信作者),男,博士,E-mail:zhangcj1113@163.com。

Received: 2022-05-31

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M710655); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2412022QD015)

Author brief: WANG Qian (2000-), main research interest: water pollution control engineering, E-mail: wangq464@nenu.edu.cn. ZHANG Chongjun (corresponding author), PhD, E-mail: zhangcj1113@163.com.

substrates with refractory organic wastewater may be a good strategy, which can not only improve the refractory organic treatment efficiency, but also realize the wastewater recycling. This paper reviews the characteristics and hazards of industrial wastewater, research statues of co-metabolism mechanisms, and focuses on the research and application cases of mixed treatment of wastewater, including food wastewater, textile wastewater, paper making wastewater, some pharmaceutical wastewater, domestic sewage and wastewater in the industrial park. Meanwhile, this paper proposes the prospects and challenges of wastewater mixed treatment, as well as its future development. The aim of this paper is to provide guidance for the wastewater mixed treatment technology application, green and low-carbon industrial park construction, in order to achieve green and low-carbon wastewater treatment.

Keywords: wastewater mixed treatment; industry wastewater; co-metabolism; readily biodegradable organics; refractory organics

近年来,中国工业化水平显著提升,1978—2020年,中国工业生产总值从1 621.4亿元增加至313 071.1亿元,年均增长10.3%^[1]。然而,工业快速发展带来经济效益的同时,也产生了大量工业废水。国家统计局数据显示,2020年中国工业废水化学需氧量与氨氮排放量分别占全国废水排放总量的1.94%和2.16%^[2]。同时,工业废水中也含有大量高浓度难降解的有机污染物^[3],在水处理过程中难以去除,且在水环境中极易累积,严重威胁水生态环境安全与人体健康。

目前,工业废水主要采用“物化+生化”联合工艺处理^[4-5]。由于微生物处理工艺具有成本低、效率高、易于管理等优势,常作为污、废水处理的主要核心工艺^[6]。但工业废水具有成分复杂、有机负荷高、持久性强及毒性强等特征,对微生物具有较强的抑制作用,难以实现高效降解^[7],严重限制了微生物处理工艺在废水处理中的广泛应用。微生物共代谢策略可能是解决这一问题的有效途径。共代谢定义为在生长基质或可生物降解有机物(易降解有机质)存在时,微生物能够降解转化非生长基质(难降解有机物)^[8]。研究表明^[9],微生物共代谢策略是促进微生物降解难降解有机物的有效手段。基于微生物共代谢可实现石油类化合物^[10]、药物与个人护理产品^[11]及农药^[12]等难降解有机物的高效转化甚至矿化。因此,易降解有机质的存在对工业废水中难降解有机物的微生物高效去除至关重要。

目前,在污、废水处理的研究与实际工程中主要采用人工添加甲醇^[13]、醋酸盐^[14]及葡萄糖^[15]等作为易降解有机质,显著增加了废水处理成本^[16],同时产生大量温室气体^[17-18]。而餐厨废水、啤酒废水及部分制药厂提取液废水等工业废水中含有大量易降解有机成分^[19-21],将其与难降解有机废水或生活污水混合处理,在提高难降解有机污、废水处理效率的同时,也可以显著降低处理成本与温室气体排

放。近年来,由于工业园区具有产业聚集和基础设施共享等优势,已经成为全球重要的工业生产空间和主要布局方式^[22]。目前,中国各类工业园区数量达15 000多家,其中,国家级和省级工业园区2 543家^[23],对全国工业产值的贡献达50%以上^[24]。工业园区的发展为多种废水混合处理提供了便利。由此可见,基于微生物共代谢的基本原理,充分利用污、废水中的易降解有机质,将污、废水混合处理,对于节约碳源购买成本、降低运行成本、减少碳排放量具有重要意义。在中国“双碳”战略实施的时代背景下,基于微生物共代谢的废水混合处理方法在工业废水的绿色低碳处理方面具有广阔的应用前景。笔者首先阐述工业废水的特征与危害,论述微生物共代谢机制的研究现状与进展,综述基于微生物共代谢的废水混合处理方法研究与应用现状,提出废水混合处理应用的前景与挑战,并对废水混合处理的发展进行进一步展望。

1 工业废水水质特征与危害

1.1 工业废水的水质特征

工业废水包括化工废水、制药废水、造纸废水及啤酒废水等,主要指工业生产过程中产生的中间产物、副产品、清洗液及浸提溶剂等。不同来源的工业废水中所含污染物的种类、浓度差异较大,具有不同的水质特征与可生化性。

一部分工业废水中难降解有机物含量较高,可生化性较差,如化工废水通常含有大量反应原料、溶剂、分散剂或表面活性剂等,具有水质成分复杂、有毒有害物质多及可生化性差等特征^[25];发酵类、化学合成类、生物工程类及中药类制药废水化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)浓度可高达 10^4 mg/L^[26],其中含有大量难降解有机物;抗生素、生物碱、木质素、纤维素、有机色素类、蒽醌和鞣质体等^[27]可生化性较差,对微生物具有较强的抑制和

毒害作用。另外,造纸废水中蒸煮废液含有木质素、纤维素、糖类、总碱,其pH值范围为11~13,五日生化需氧量(Five-day Biochemical Oxygen Demand, BOD₅)浓度范围为3 000~5 000 mg/L, COD浓度范围为7 000~12 000 mg/L^[28],毒性较大。因此,此类废水通常具有有机负荷高、毒性强、持久性强等特征,微生物处理效率较低,而易降解有机质的存在能够显著提高污染物处理效率,可以与易降解有机废水混合处理。

另一部分工业废水中易降解有机物含量较高,可生化性较强。如制药废水中用于从母液中提取药物后残留的废滤液、废母液和溶剂回收残液等,通常含有大量的乙醇等有机溶剂、部分残留的糖类、苷类、蛋白质及少量产物^[29],此类废水BOD₅可达2 000~10 000 mg/L^[30],经稀释后生物毒性低;造纸废水的中段废水含有木素、纤维素和树脂酸盐等,BOD₅浓度范围为400~1 000 mg/L, COD浓度范围为1 200~3 000 mg/L^[31],可生化性好;啤酒废水通常含有糖类、蛋白质、醇酸类、矿物盐、纤维素及多种维生素^[32], COD浓度范围一般为500~700 mg/L, BOD₅浓度范围一般为300~500 mg/L^[33],可生化性好;餐厨废水COD浓度范围为500~1 000 mg/L, BOD₅浓度范围为300~500 mg/L^[34],通常含有大量的动植物油脂、蛋白质、淀粉等有机物^[35],采用隔油法进行预处理后一般无毒性,具有很好的可生化性。虽然此类废水可生化性好,易降解有机质含量高,可直接采用微生物工艺处理,但其中大量的有机碳源被转化成CO₂,浪费资源的同时,也造成了大量的碳排放。因此,此类废水可作为易降解有机质与难降解有机废水混合处理。

1.2 工业废水的危害

工业废水未经妥善处理进入环境中会对水生态环境与人体健康构成严重威胁。1)含有易降解有机质的工业废水,如啤酒废水和餐厨废水等含有大量的生物易降解有机质,排放至水体中,微藻会通过异养代谢消耗。此外,此类废水中含有大量的氮、磷等营养元素,导致水环境发生水体富营养化,溶解氧大量消耗,水生生物缺氧死亡,产生黑臭水体,破坏水生态系统。目前,中国有88.6%的湖泊处于富营养化状态,太湖、滇池等大型湖泊已经处于重度富营养化状态,这与其周围工业园区发达,大量工业废水排放密切相关^[36]。2)含有毒有害难降解物质的工业废水,如化工废水,含有大量多环芳烃、吡啶和喹啉等难生物降解有机物^[37-39],在水环境中难以降解,容易发生累积,对水生生物具有较强的毒性,如30 mg/L的8-羟基喹啉96 h后对草鱼致

死率达到100%^[40]。研究表明,工业废水排放量每增加1%,居民报告生病的几率上升0.32%,而身体质量指数(Body Mass Index, BMI)指标偏离健康区间的几率上升0.20%^[41]。部分污染物会导致人体产生中毒、过敏现象,对人体具有“三致”作用。因此,工业废水对生态环境与人体健康造成的威胁与危害不容忽视。

2 工业废水典型处理技术

目前,工业废水常用的典型处理技术可分为物化法和生物法。物化法主要包括混凝沉淀、吸附、化学氧化和膜分离等^[42-45]。生物法主要包括好氧/厌氧活性污泥法、生物膜法等^[46-48]。上述工业废水典型处理技术的优缺点如表1所示。物化法处理效率高,但难以实现污染物的有效矿化,且药剂、设备投资显著增加处理成本,容易造成二次污染,因此,部分作预处理工艺与生物法组合使用。生物法具有工艺成熟、运行稳定及成本低等优点,常作为废水处理的主体工艺,但由于部分毒性较强的难降解有机废水对微生物具有一定的毒性抑制作用,导致生物处理工艺对此类工业废水处理效果有限。微生物共代谢技术是指当生物降解过程中有易降解有机质存在时,会增强微生物的毒性抵抗力,诱导微生物产生关键降解酶,有效弥补生物处理工业废水的缺陷,提高微生物对有毒难降解有机物的降解效率。因此,微生物共代谢策略适用于难降解有机工业废水的处理,尤其在废水种类多、分质收集、集约化管理的工业园区,采用富含易降解有机物的工业废水与难降解有机废水混合处理具有广阔的应用前景。

3 微生物共代谢及其机制

3.1 微生物共代谢

微生物共代谢理论在20世纪50年代被提出,用于促进微生物降解芳香族和石油烃类化合物^[49]。如图1所示,有机污染物的微生物降解主要通过直接代谢和共代谢两种方式,其中,微生物共代谢是难降解有机物降解的最主要方式^[50]。在有机物的微生物降解过程中,难降解有机物含量通常较低(ng/L~μg/L),但毒性较大,因此,难以作为生长基质维持微生物的生长与代谢^[51]。而易降解有机质能够为微生物的生长提供碳源与能量^[52],并且诱导微生物产生关键降解酶及辅因子^[53],进而促进非生长基质(难降解有机物)的共代谢降解与矿化。近年来,随着微生物组学测试方法及共代谢理论的发展与应用,对共代谢机制也进行了更加全面深入的探索。

表 1 工业废水典型处理技术
Table 1 Typical treatment technologies for industrial wastewater

分类	典型处理技术	适用范围	优点	缺点	参考文献
物化法	混凝沉淀	去除废水中的悬浮物、色度, 初步去除有机物, 适用于悬浮物浓度高、色度高的工业废水预处理。	1) 大幅降低废水中的悬浮物、有机物和色度, 减轻后续生物处理负荷; 2) 投资和运行成本较低。	1) 投加大量的混凝剂和助凝剂, 造成二次污染; 2) 配置搅拌机和加药装置, 增加设备购买运行费用。	[42]
	吸附	去除废水中的重金属、色度、臭味、溶解性有机物等, 普遍适用于常规工业废水的预处理。	1) 条件温和, 易于操作; 2) 吸附剂种类多样, 来源广泛, 可选择性高; 3) 可实现吸附质回收利用。	1) 部分吸附剂再生困难, 容易造成二次污染; 2) 吸附剂购买成本较高; 3) 吸附效率不稳定。	[43]
	化学氧化	利用强氧化剂氧化分解废水中的污染物, 适用于难降解有机工业废水处理。	1) 应用范围广, 可氧化分解多种难降解有机物; 2) 处理效果好, 氧化效率高; 3) 设备简单, 可单独或组合处理。	1) 药剂投加大量; 2) 产生的沉淀为危险废物, 需单独处理; 3) 对反应的酸碱度等条件有要求。	[44]
	膜分离	主要包括微滤、超滤、纳滤和反渗透技术, 适用于难降解有机物及重金属废水的分离处理。	1) 分离效率高, 可实现废水中可利用资源的回收利用; 2) 能耗低, 设备和操作简单, 占地面积小; 3) 无污泥产生。	1) 膜面易发生污染, 需定期清洗和更换; 2) 稳定性、耐热性、耐溶剂能力有限, 使用范围受限; 3) 投资和运行费用较高。	[45]
生物法	好氧活性污泥	在好氧条件下, 活性污泥中的微生物分解废水中的有机物, 适用于可生化性好的有机废水。	1) 工艺成熟, 运行经验多, 运行效果相对稳定; 2) 程序、设备简单; 3) 可实现脱氮除磷。	1) 对工业废水中的难降解有机物难以有效分解; 2) 对于可生化性差、有生物毒性的废水处理效率低; 3) 耐冲击负荷能力较低。	[46]
	厌氧活性污泥	厌氧条件下, 微生物分解废水中的有机物, 产生甲烷, 适用于高浓度有机工业废水处理。	1) 有机负荷高, 可处理高浓度的有机废水; 2) 产生沼气, 运行费用低; 3) 污泥产生量少。	1) 产甲烷阶段对环境条件要求高; 2) 出水有机物浓度仍较高, 需进一步处理。	[47]
	生物膜	以生物膜为净化主体的固定化微生物处理技术, 适用于可生化性好的有机工业废水。	1) 抗冲击负荷能力强; 2) 具有脱氮功能; 3) 不存在污泥回流和污泥膨胀问题, 运行管理方便; 4) 排泥量少, 占地面积小。	1) 启动挂膜所需时间较长; 2) 布水、布气不易均匀, 可能存在局部死角。	[48]

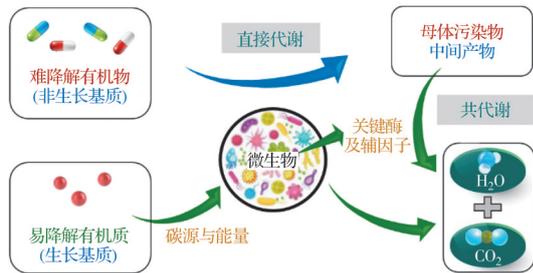


图 1 有机污染物的微生物降解机制

Fig. 1 Biodegradation mechanism of organic pollutants

3.2 微生物共代谢过程中易降解有机质的作用

3.2.1 为微生物提供碳源与能量

微生物的生长与代谢需要能量, 但多数难降解有机污染物不能作为唯一碳源和能源被微生物利用, 只能通过易降解有机质将其添加作为营养物质, 促进微生物的生长和繁殖, 进而提高微生物对

难降解有机污染物的降解能力。如表 2 所示, 在好氧条件下, 浓度为 400 mg/L 的葡萄糖作为易降解基质可以使微生物对吡啶、喹啉、联苯和萘的降解率分别提高 26.9%、18.5%、22.3% 和 14.4%^[54]; 在活性翠蓝的微生物好氧降解过程中, 加入 1 200 mg/L 葡萄糖作为易降解有机质, 可使 20 mg/L 活性翠蓝降解率由 37.4% 提高至 73.6%。而厌氧菌不能以活性翠蓝为唯一碳源完成生物降解过程, 只能通过葡萄糖和活性翠蓝的共代谢作用降解活性翠蓝, 使得 20 mg/L 活性翠蓝的厌氧降解率提高 81.5%, 比好氧降解率高 4.9%~27.2%^[55]; 以 100 mg/L 的苯酚作为易降解有机质, 可使 20 mg/L 的 2,4,6-三氯苯酚降解率提高 62.5%^[56]; 以 200 mg/L 苯酚作为易降解有机质, 可使 20 mg/L 双酚 A 降解率提高 40%^[57]。上述研究表明, 微生物不能或难以利用难

表 2 不同微生物共代谢机制研究与应用现状

Table 2 Research and application status of microbial co-metabolism mechanisms

共代谢机制	易降解有机质	功能微生物	难降解有机污染物	难降解有机物降解率提高量/%	参考文献	
为微生物提供碳源与能量	葡萄糖(400 mg/L)	好氧驯化活性污泥	吡啶(50 mg/L)	26.9	[54]	
			喹啉(50 mg/L)	18.5		
			联苯(50 mg/L)	22.3		
			萘(50 mg/L)	14.4		
	葡萄糖(1 200 mg/L)	好氧驯化活性污泥	活性翠蓝(20 mg/L)	36.2		[55]
	葡萄糖(1 200 mg/L)	厌氧驯化活性污泥	活性翠蓝(20 mg/L)	81.5		
为污染物降解过程提供电子供体	苯酚(100 mg/L)	<i>Burkholderia xenovorans</i>	2,4,6-三氯苯酚(20 mg/L)	62.5	[56]	
	苯酚(200 mg/L)	<i>R. eutropha</i>	双酚 A(20 mg/L)	40	[57]	
	草酸(0.01 mmol/L)	喹啉降解菌	喹啉(0.31 mmol/L)	19	[58]	
	草酸(0.02 mmol/L)	喹啉降解菌	喹啉(0.31 mmol/L)	50		
	甲酸(1 mmol/L)	好氧驯化活性污泥	2,4,6-三氯酚(20 mg/L)	66	[60]	
	乙酸(1 mmol/L)	好氧驯化活性污泥	2,4,6-三氯酚(20 mg/L)	88		
	琥珀酸盐(0.31 mmol/L)	驯化活性污泥	吡啶(1.3 mmol/L)	25	[61]	
	醋酸盐(0.54 mmol/L)	驯化活性污泥	吡啶(1.3 mmol/L)	25		
	甲酸盐(2.17 mmol/L)	驯化活性污泥	吡啶(1.3 mmol/L)	25		
	优化微生物群落结构	醋酸钠(8.0 mmol/L)	<i>Geobacter, Azospirillum, Dechloromonas</i>	氯酚(1 mg/L)	42	[62]
		醋酸钠(255 mg/L)	<i>Bacteriovorax, Thauera</i>	四环素(30 mg/L)	5	[9]
	诱导关键降解酶的表达	醋酸钠(4 g/L)	<i>Chlamydomonas Mexicana</i>	环丙沙星(2 mg/L)	43	[63]
甲醇(0.06%)		<i>Chlamydomonas Mexicana</i>	环丙沙星(2 mg/L)	19	[63]	
醋酸盐(100 mg/L)		<i>nitrifying bacteria</i>	氯贝酸(100 μg/L)	25	[64]	
醋酸盐(100 mg/L)		<i>nitrifying bacteria</i>	双氯芬酸(100 μg/L)	30		
氨氮(481.3 mg/L)		<i>Ammonia Oxidizing Bacteria</i>	磺胺甲恶唑(100 μg/L)	61	[65]	
醋酸钠(0.9 mmol/L)		<i>Lelliottia aquatilis</i>	阿莫西林(0.055 mmol/L)	60	[66]	
醋酸钠(0.6 mmol/L)		<i>Chlorella</i>	阿莫西林(2 mg/L)	76	[67]	
提高微生物的毒性抵抗能力		葡萄糖(0.3 mg/L)	<i>Spirulina platensis</i>	卡马西平(1 mg/L)	20~50	[68]
	醋酸钠(100 mg/L)	<i>Cyanobacteria, Actinobacteria</i>	阿莫西林(50 mg/L)	63	[69]	

降解有机污染物作为唯一碳源进行分解代谢,进而导致微生物合成代谢所需的营养物质和能量缺乏,微生物生长受到抑制,而易降解有机质的加入为微生物提供了碳源和能量,维持了微生物的生长,从而促进了微生物对难降解有机物的降解。

3.2.2 为污染物降解过程提供电子供体

研究表明,难降解有机物的降解过程需要电子供体,而易降解有机质可以为微生物的降解过程提供电子供体,促进难降解有机污染物的微生物降解。如表 2 所示,以 0.01、0.02 mmol/L 的草酸作为易降解有机质,草酸生物氧化过程中产生的电子供体能够刺激喹啉以及喹啉生物降解的中间体 2-羟基喹啉发生单加氧反应,从而加速喹啉的氧化和最终矿化,使 0.31 mmol/L 的喹啉降解率分别提高了 19% 和 50%^[58];外加甲酸作为电子供体,能够加速 2,4,6-三氯酚生物降解过程中的还原脱氯和单加氧反应^[59],使降解速率提高了 66%,且加入乙酸作为电子供体时,由于乙酸的电子当量数多于甲酸,使 2,

4,6-三氯酚降解速率进一步提高了 22%,0.25 mmol/L 乙酸加速 2,4,6-三氯酚生物降解速率与 1 mmol/L 甲酸加入后效果相当,表明电子当量数与 2,4,6-三氯酚的生物降解速率成正比^[60];利用相同电子当量的琥珀酸盐、醋酸盐和甲酸盐作为易降解有机质,为吡啶的降解过程提供电子供体,均会成为最初单加氧化和矿化过程的驱动力,使微生物对吡啶的降解速率提高了 25%^[61]。因此,易降解有机质作为电子供体可以有效驱动难降解有机物的转化与矿化,提高微生物的降解能力。

3.2.3 优化微生物群落结构

微生物群落结构决定了其生态功能以及对污染物的降解能力。研究表明,易降解有机质的存在能够优化微生物的群落结构,进而影响其对污染物的降解能力。如表 2 所示,前期研究表明^[62],微生物燃料电池中添加的醋酸钠浓度由 1.5 mmol/L 增加至 4 mmol/L 时,微生物燃料电池中的优势菌属 *Geobacter* 相对丰度提高了 15%,同时, *Azospirillum*

和 *Dechloromonas* 等与芳香环降解和脱氯相关的菌属得到富集,使氯酚的降解率提高了42%,微生物燃料电池的电流密度提高了4.3倍;另一项研究表明^[9],以醋酸钠作为易降解有机质,不仅可为微生物提供碳源、能量及电子供体,增强微生物的活性,并且能够优化微生物的群落结构, *Bacteriovorax* 和 *Thauera* 菌属相对丰度分别增加了7%和12%,使光催化和生物降解近场耦合体系中四环素的降解率提高了5%,矿化程度提高了20%。因此,易降解有机质的存在能够显著优化微生物的群落结构,进而提高微生物体系对难降解有机物的降解能力。

3.2.4 诱导关键降解酶的表达

有机物的微生物降解过程主要依靠关键酶的作用。研究表明,微生物共代谢体系中,易降解有机质的存在能够诱导微生物难降解有机物关键降解酶的表达,进而促进难降解有机污染物的降解。如表2所示,以4 g/L醋酸钠为易降解有机质,可以诱导单加氧酶和N-脱乙酰酶的表达,使2 mg/L的环丙沙星降解效率提高3倍^[63];当100 mg/L醋酸盐作为易降解有机质时,会促进单加氧酶与双加氧酶等非专一性酶的表达,使微生物对氯贝酸和双氯芬酸的转化率分别提高25%和30%^[64];氨氧化菌利用其关键酶之一——氨单加氧酶同时氧化氨氮和去除难降解有机污染物,当单位生物浓度(MLVSS)的氨氧化速率由0~0.4 mg/(g·min)提高至1.6~2.1 mg/(g·min),磺胺甲恶唑的去除率提高61%^[65]。如图2^[66]所示,以0.9 mmol/L醋酸钠为易降解有机质,可诱导微生物(*Lelliottia aquatilis*)表达β-内酰胺水解酶、酰胺酶、转氨酶及酰胺C-N水解酶,使0.055 mmol/L典型抗生素阿莫西林的降解效率提高近60%,高达90%;如图3^[67]所示,以0.6 mmol/L

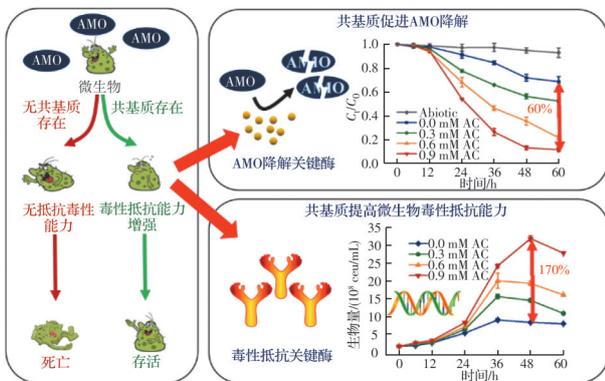


图2 共基质的加入上调降解相关酶的表达和提高细胞抵抗力、加速阿莫西林降解和解毒^[66]

Fig. 2 Co-substrate addition accelerated amoxicillin degradation and detoxification by up-regulating degradation relate enzymes and promoting cell resistance^[66]

醋酸钠作为易降解有机质,也可诱导小球藻(*Chlorella*)表达水解酶、氧化还原酶、还原酶和转移酶,对阿莫西林的降解率提高76%。因此,易降解有机质的存在能够诱导难降解有机物降解过程中所需要的关键酶,进而有效促进微生物对难降解有机物的转化与矿化。

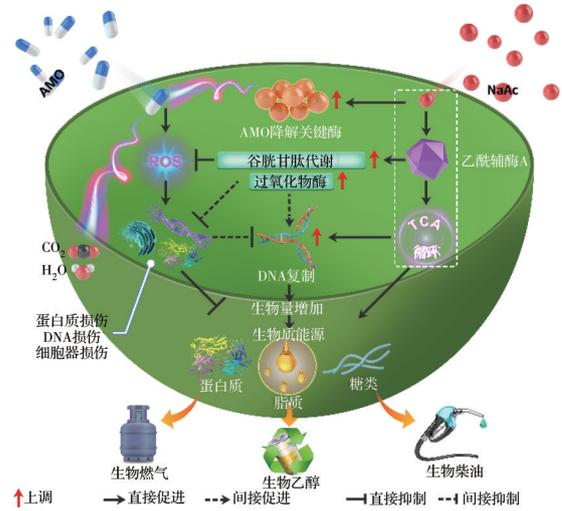


图3 易降解基质对小球藻毒性抵御影响机制^[67]

Fig. 3 Effect mechanism of degradable substrates on resistance to *Chlorella* toxicity^[67]

3.2.5 提高微生物的毒性抵抗能力

大部分难降解有机物对微生物的生长表现为较强的毒性和抑制性,严重抑制微生物的生长与降解能力,而易降解有机质的添加能够增强微生物的毒性抵抗能力,缓解微生物受到的毒性抑制作用。当卡马西平浓度超过1 mg/L时,对钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)表现出毒性抑制作用,100 mg/L卡马西平对*S. platensis*最大抑制率达到34%,高浓度的卡马西平(50~100 mg/L)导致胞内活性氧(ROS)的过度累积,其强氧化特性严重破坏*S. platensis*细胞器的结构和功能。作为一种兼性微藻,*S. platensis*通过同化易降解基质葡萄糖,增加胞内超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性以及叶绿素、类胡萝卜素、碳水化合物和脂质含量,促进细胞生长,激发微藻活性,增强对卡马西平的毒性抵抗力。如表2所示,加入0.3 mg/L的葡萄糖作为易降解有机质,使*S. platensis*的生物量增加12%~37%,对卡马西平的去除率提高20%~50%^[68];另外,如图2^[66]所示,典型抗生素阿莫西林的毒性作用使微生物胞内产生活性氧(ROS),损伤蛋白质、DNA和细胞器,以醋酸钠作为易降解有机质,可以驱动下游TCA循环,促进中间产物毒性官能团的破坏,并使抗生素对微生物的抑制作用削减15%。外排泵基

因、青霉素结合蛋白基因、 β -内酰胺酶基因表达上调,抑制肽聚糖生物合成的基因表达下调,细胞密度增加近170%,DNA复制代谢通路相关基因表达增强,提高了对阿莫西林的降解能力;同时,在SBR生物反应器中,醋酸钠的加入提高了抗生素抗性基因的优势宿主 *Proteobacteria* 外排抗性基因 *adeF* 和 *mdsC* 的丰度,抗生素外排蛋白将有毒分子排出至细胞外,缓解了抗生素对微生物的毒性胁迫,使得抗生素抗性基因的丰度下降30%,传播风险降低^[69];在小球藻(*Chlorella*)降解阿莫西林的过程中(图3),加入0.6 mmol/L醋酸钠能够促进小球藻的合成代谢,使得小球藻比生长速率提高77%,生物量增加36%,提高了小球藻的光合作用活性,调控微生物谷胱甘肽代谢和过氧化物酶体代谢通路,从而缓解阿莫西林对细胞器的损害,提高小球藻对抗生素的毒性抵抗能力^[67]。因此,针对难降解有机物毒性作用较强的特征,易降解有机质的存在可以显著增强微生物的毒性抵抗能力,缓解毒性抑制作用,进而提高微生物的降解能力。

目前,微生物共代谢机制已经被深入研究,但难降解有机物结构的多样性与复杂性决定了微生物共代谢降解过程的复杂性,污染物的类型、微生物种类及易降解有机质的多样性也决定了共代谢路径与机理的差异与多样性。功能基因的转录与表达是决定微生物代谢及污染物降解相关功能的主要因素,基于多种微生物组学揭示微生物的共代谢机制是有效手段,可为强化微生物对工业废水中难降解有机污染物的降解提供理论基础与技术支撑,但共代谢理论与作用机理仍需深入探讨。

3.3 易降解有机质的种类与应用进展

目前,在科学研究和实际污、废水处理中采用的易降解有机质主要包括糖类(葡萄糖、蔗糖、乳糖、果糖、淀粉)^[55-56,68]、醇类(甲醇、乙醇)^[63,70]、有机酸类(甲酸、乙酸)^[60]、乙酸盐类(醋酸钠)^[9,62-64,66-67]以及一些营养基质(氮源与磷源)^[65]等。目前,多种难降解有机污染物的微生物降解率通过添加易降解有机质都得到了提高,如喹啉、吡啶、环丙沙星、阿莫西林、四环素、双酚及四溴双酚A等^[9,55-69],部分难降解有机污染物甚至可以完全矿化。虽然此类商业易降解有机质的添加能够显著提高微生物对难降解有机物的降解效率,但昂贵的价格导致污水处理成本急剧增加,如甲醇2800元/t,30%纯度的乙酸钠1000元/t,10万t/d的污水处理厂投加碳源的费用高达100~500万元/年^[71]。此外,额外添加商业易降解有机质也增加了碳排放量,因添加商业易降解有机质,10万t/d的污水处理厂每年增加碳排

放量500 t^[72]。

目前,在污、废水处理过程中,人工添加碳源不仅显著增加处理成本,并且浪费了大量资源,同时会显著增加碳排放。将含有易降解有机质的废水按照适当的比例与含有难降解有机污染物的废水混合处理,既能实现易降解与难降解有机废物的同时降解,又能降低废水处理成本,符合低碳发展需求,具有重要的现实意义和应用价值。然而,在废水混合处理过程中,不同种类易降解有机质在实际应用过程中的掺杂比例、对微生物的影响机制、作用效果及运输成本等均需要深入研究与探讨。

4 基于微生物共代谢的工业废水混合处理方法研究与应用

4.1 工业废水中的易降解有机质

工业废水种类繁多,常见的含有易降解有机质的废水主要包括食品工业废水、纺织废水、造纸废水及部分制药废水等。其中含有的易降解有机质组分与含量各不相同,食品工业废水中含有大量脂肪、蛋白质、淀粉及糖类等易降解有机质^[34];纺织废水一般含有油脂、浆料、染料、助剂等多种有机物^[73];造纸废水中的糖类和醇类^[74]可以作为易降解有机质;部分制药废水中含有高浓度的发酵残余有机物(糖类、蛋白质、脂质)以及乙醇等有机提取剂^[27,75],具有作为微生物共代谢所需易降解有机质的潜力,并且目前已有将上述工业废水作为易降解有机质进行废水混合处理的研究和应用实例。

4.2 基于微生物共代谢的工业废水混合处理研究与应用现状

4.2.1 食品工业废水的混合处理

食品工业废水排放量大,有机物含量高,根据《中国环境统计年鉴》统计数据,2020年中国食品工业废水排放COD达10.8万t(占行业排放量的24.9%),排放氨氮0.46万t(占行业排放量的24.4%)^[2]。食品工业废水含有的主要物质取决于所生产加工的食品类型与生产工序,如啤酒厂浸麦废水多含葡萄糖、蔗糖、纤维素等糖类物质,而肉类加工废水主要含有蛋白质、脂肪等。食品工业废水具有良好的可生化性,多种溶解性有机质可被微生物作为易降解有机质利用。

目前,食品工业废水处理以生物法为主,部分采用物化-生物相结合的处理方法。将食品工业废水与其他废水混合处理已经在研究与实践中应用。如在传统活性污泥法处理腈纶废水时,将醋酸加工废水(平均COD=4600 mg/L)与腈纶废水按照50:350比例混合,出水COD去除率提高了12.3%,最

终出水COD降低了21 mg/L^[76]。因此,将醋酸加工废水引入腈纶废水处理,不仅不会导致出水恶化,反而会促进生化处理。近年来,中国关于食品工业废水混合处理的政策标准也在不断完善。2020年12月,生态环境部与国家市场监督管理总局联合发布了《啤酒工业污染物排放标准》(GB 19821—2005)修改单,明确了“酒类企业废水可为污水处理厂稳定补充优质碳源,协同推进污水处理厂稳定运行”。在有利政策的引导下,工程实践中也涌现出了一批将食品工业废水与其他污、废水混合处理的实际案例。2021年3月,常州市排水管理处在江苏省内率先试点与华润雪花啤酒(常州)有限公司签订生产废水委托处理协议,啤酒厂生产废水经简单预处理后按照协议排放标准排入市政污水管网,在提高污水氮磷去除率的同时,全年购买碳源费用减少了150万元,减少碳排放达730 t。2021年8月,青岛啤酒(黄石)有限公司啤酒生产废水经预处理后按照协议排放标准排入市政污水管网,被黄石中冶水务团城山污水处理厂收集处理,预计每年可为青岛啤酒黄石有限公司节约污水处理成本20余万元。2021年,青岛啤酒股份有限公司与下游污水处理厂合作,采用简单处理后的啤酒废水为下游污水处理厂补充碳源,预计每年可为3家啤酒厂节约废水处理相关费用近300万元,为下游3家污水处理企业节约碳源购买成本约600万元,每年减少碳排放量达5 000 t^[77]。另外,深圳市深水水头污水处理有限公司与不凡帝范梅勒糖果深圳有限公司签署了《糖果生产废水委托处理协议》,糖果生产企业的废水委托水质净化厂处理后,一方面水质净化厂得到了原水所需的碳源,另一方面企业的污水处理运营成本可下降约11%,并且每年可节省数十万元的运营费用^[78]。

目前,废水混合处理案例中食品工业废水混合处理应用案例相对较多,并且已经发布了指导性的政策标准,主要归因于食品工业废水的成分容易辨识,易降解有基质含量高,可生化性强,基本无毒性,具有混合处理的应用潜质。此外,在企业聚集的工业园区,还可以因地制宜将食品工业废水与染料废水、合成纤维废水、抗生素废水等工业废水混合处理,实现食品工业废水中易降解有机质的资源化,提高难降解废水的可生化性,促进废水中难降解有机物的降解,节省双方企业的废水处理成本,并显著降低废水处理过程中的碳排放。然而,部分食品工业废水中含有的添加剂成分也不容忽视,如着色剂(胭脂红、柠檬黄、靛蓝等合成色素)、防腐剂(苯甲酸钠、山梨酸钾等)、增白剂(过氧化苯甲酰)

等,食品添加剂在混合处理过程中是否会产生有害副产物还需要进一步深入研究。同时,食品工业废水的混合处理仍需更多指导性政策加以引导,使其得到进一步推广应用。

4.2.2 纺织工业废水的混合处理

纺织行业具有高污染特征,根据《中国环境统计年鉴》统计数据,2020年中国纺织工业废水排放COD达6.4万t(占行业排放量的14.7%),排放氨氮0.19万t(占行业排放量的10.0%)^[2]。纺织工业废水具有间歇排放的特点,由于工序不同,其水质和水量差异较大,如漂洗和脱水工序产生大量的洗水,占纺织工业废水的60%以上,其中主要含有洗下的染料、浆料、助剂等,COD浓度范围一般为300~500 mg/L,BOD₅浓度范围一般为100~150 mg/L,色度一般为300~500倍,可生化性好,具有作为易降解有机质的潜力;退浆和染色工序产生的浆染废水占纺织工业废水的20%以上,其中含有浆料变性淀粉、聚乙烯醇、染料、硫化碱、匀染剂和渗透剂等多种印染助剂,COD浓度范围一般为2 000~6 000 mg/L,BOD₅浓度范围一般为1 000~2 000 mg/L,色度一般为1 000~2 500倍,BOD₅/COD一般小于0.45^[79],可与其他可生化性强的污、废水混合处理。

目前,纺织工业废水主要采用吸附、过滤、高级氧化等物化处理法以及好氧/厌氧活性污泥、生物膜法等生物处理法,但物化法存在运行成本高、容易造成二次污染等问题,在实际工程中生物法应用更为广泛。研究表明,采用水解酸化-生物接触氧化法处理牛仔服洗水,由于有机物浓度低,处理效果不佳,将洗水与浆染废水按照进水1:1混合处理,COD去除率提高了10%,高达90%,脱色率达到80%,能够实现达标排放^[80]。由于片区内管网不健全,南方某市政污水处理厂进水有机物浓度偏低(COD_{Cr} 40~70 mg/L,BOD₅ 22~35 mg/L,TN 7~15 mg/L,NH₄⁺-N 5~12 mg/L,TP 0.8~1.5 mg/L),导致污泥浓度保持困难,处理效果较差,难以实现达标排放。将低浓度生活污水与印染废水按5:1混合进行好氧生物处理,对COD、总氮及总磷的去除率分别达到86%、28%和69%,且无需对印染废水进行pH值调节和水解酸化的预处理,生活污水处理系统可以直接混掺20%牛仔布生产印染废水,混合废水对生物处理系统没有负面影响^[81]。

目前,有关纺织工业废水混合处理的研究与案例相对较少,纺织工业废水中的洗水可生化性相对较好,但浆染废水是一类含有高浓度难降解有机物的废水,通常水量不大。因此,可以直接在纺织工

业生产企业内部与浆染废水混合处理,降低废水的输送成本,但洗水与浆染废水的混合比例需进一步探讨。另外,可以对纺织工业废水进行分质收集,探明废水的可生化性与毒性效应,与其他污、废水混合处理,也是纺织工业废水“节能低碳”处理的研究和应用方向。

4.2.3 造纸工业废水的混合处理

造纸工业废水具有水量大、成分复杂、有机物浓度高等特点。根据《中国环境统计年鉴》统计数据,造纸工业废水排放量占全国工业废水排放量的20%~30%,2020年中国造纸工业废水排放COD达5.4万t(占行业排放量的12.5%),排放氨氮0.15万t(占行业排放量的7.7%)^[2]。造纸工业废水中含有大量的溶解性有机物、无机碱、纤维素、木质素、单宁、蛋白质等,难降解物质含量较高,且含有机硫化物、有机氯化物、硫酸盐、硫化氢等有毒物质^[82-83]。

目前,造纸工业废水处理以活性污泥、生物膜、厌氧消化法为主,研究表明,按照 $F/M=0.1$ 将生活污水与纸浆造纸废水混合处理,活性污泥对制浆造纸废水的处理效率显著提高, NH_3-N 、TP、SS、COD、 BOD_5 的去除率分别高达99%、88%、99%、93%、97%^[84]。单独采用生物膜法处理染料废水,COD的去除率为80%;将废纸造纸废水与染料废水混合处理,当染料废水浓度低于0.4 mg/L时,废水对微生物的毒性影响在可接受范围内,当染料废水浓度为0.25 mg/L时,经过3 h厌氧预处理和16 h好氧处理后,COD的去除率提高了10%左右,分别达到89.2%和90.2%^[85]。

目前,关于造纸工业废水混合处理的研究与应用较为缺乏,但造纸工业废水具有较大的混合处理应用潜力。造纸工业废水成分复杂,含有大量的纤维素、木质素等难降解有机物,但分解产物均为小分子的糖类等易降解有机物。可通过预处理的方式将纤维素、木质素等难降解有机物分解为易降解有机物,将之作为易降解有机质进一步与其他难降解工业废水混合处理,实现造纸工业废水的资源化。因此,亟需开发出高效、廉价的造纸废水预处理方法。另外,部分造纸工业废水中易降解基质含量较高,可生化性好,如废纸造纸废水,主要成分为低分子量半纤维素、甲醇、乙酸、糖类等,可以直接作为易降解有机质与其他难降解有机废水混合处理。

4.2.4 制药工业废水的混合处理

制药工业废水成分复杂,水质、水量波动较大。根据《中国环境统计年鉴》统计数据,2020年中国制药工业废水排放COD达1.3万t(占行业排放量的

3.0%),排放氨氮0.06万t(占行业排放量的3.2%)^[2]。制药工业废水主要包括提取废水、洗涤废水和冷却水等,含有糖类、脂质、蛋白质、无机盐类、酸碱和有机溶剂等,COD浓度高,部分废水含有抑菌作用的抗生素等难降解毒性物质^[86]。

目前,制药工业废水多采用物化-生物联合处理工艺进行处理,前端采用如混凝、微电解、气浮、高级氧化和膜分离等方法对制药废水进行预处理^[87-88],随后采用厌氧-好氧组合作为主体处理工艺。研究表明,将制药废水二级生化出水与城镇生活污水混合,采用城镇污水厂的“水解酸化+CASS+过滤”工艺对混合废水进行处理,无预氧化条件下二者以低比例(1:20、1:25、1:30)混合,出水可以达标排放。有预氧化条件下二者以中低比例(1:12、1:16、1:20)混合,出水也可以达标排放,据此提出“臭氧催化氧化+废水混合+水解酸化+CAST+过滤”工程化改造方案,通过经济技术指标分析,该工程能够在9年半后收回投资成本^[89]。

制药工业废水的成分与其生产药品的种类、工序密切相关,应加以区分,部分制药废水含有大量难降解有机物,如抗生素废水等西药制药废水,生物毒性大,可生化性低,难以生物降解,且中间产物仍然具有较强的毒性作用,此类废水不宜直接采用生物处理工艺降解。然而,一些提取类制药废水,如中药废水提取液,含有大量的乙醇等易降解基质,经过稀释后几乎没有毒性,是微生物良好的碳源,与其他废水混合处理具有良好的经济和环境效益,具有极大的应用潜力。然而,目前缺乏此类废水混合处理的研究与应用,尤其在医药制药业发达的北方寒区冬季污水处理过程中,在低温、毒性胁迫下,易降解有机废水的加入对微生物的毒性抵抗力、低温代谢活性以及难降解污染物的降解能力的影响需要深入探讨。在北方寒区工业园区实现低碳、经济的废水处理具有重要意义。

4.2.5 工业园区的工业废水混合处理

工业园区作为一种工业企业集约化管理的有效方式,目前已在中国大部分地区推广建立。工业园区的产业结构多样,通常以食品、纺织、医药、化工为典型产业,组成单一型或综合型工业园区。工业园区废水主要包括生产废水和生活污水,通常采用分质收集-生化处理-深度处理的方式进行处理。工业园区废水的混合处理可以在一定程度上实现“资源互补”,将可生化性好的废水与难降解有机物含量较高的废水混合处理,能够降低生化处理难度,节省预处理费用^[4]。在出水水质方面,如胶州市工业园区将废水与生活污水合并处理,结果表明,

城市污水可以均衡工业废水水量、水质,稀释有毒有害物质,保证微生物生长所需要的营养物质,有利于工业废水中难降解有机物的降解,并显著降低建设运行费用^[90]。沈阳市某经济开发区工业园区依托城镇污水处理厂对工业园区生产废水进行处理,废水占污水厂进水量约0.46%,出水仍能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准^[91]。在合肥循环经济示范园区开展的化工园区废水混合处理示范工程中,SBR颗粒污泥与生物滤池-组合人工湿地深度处理技术可以使1-甲基-2-苯基吡啶-3-甲醛等大分子难降解的农药和医药中间体含量由25.1%降低至5.8%,出水满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准^[92]。在出水毒性方面,典型工业园区废水中生物毒性污染物难以通过生化处理工艺去除,二沉池出水中斑马鱼胚胎存活率仅25%,将市政污水与工业废水混合处理,可显著促进工业废水中毒害污染物的去除及生物毒性削减,处理后出水中斑马鱼胚胎存活率提高了60%^[93]。

综上,工业园区的工业生产空间和布局方式为废水混合处理提供了优势和便利,在工业园区内、工业园区与城镇污水处理厂之间,基于微生物共代谢和“资源互补”的原理进行废水混合处理已经有多个成功的研究与应用案例。在当前建设低碳经济工业园区的背景下,工业园区废水混合处理具有良好的发展前景。然而,在工业园区内实现废水混合处理需要从区内废水水质、水量及毒性等角度出发,分类收集,探明最佳废水混合比例,合理规划园区产业结构,采用智慧水务,实现高效、精准的工业园区废水混合处理。同时,工业园区的废水混合处理亟需指导性政策加以引导,从而使废水混合处理在工业园区得到进一步推广应用。

5 基于微生物共代谢的工业废水混合处理研究与应用展望

5.1 工业废水混合处理的优势

基于上述工业废水混合处理研究与应用情况可知,工业废水混合处理的优势在于:

1)与废水分质处理相比,废水混合处理能够节省单独处理所需设备、药剂、能耗、用地等方面的费用,节省污、废水处理厂购买碳源的费用,降低运行成本,具有良好的经济效益;

2)根据微生物的共代谢理论,富含易降解有机质的工业废水与其他难降解有机废水混合处理能够提高微生物对难降解有机物的降解效率,具有以废治废、变废为宝的良好环境效益;

3)废水的混合处理有利于最大限度地利用污、废水中的资源和能源,实现污水系统的能源自利和资源输出,从而减少传统能源结构导致CO₂大量排放的问题,在当前“双碳”目标背景下更具优势。

目前,已有废水混合处理的小试、中试实验研究,且有多个食品工业废水与城市污水混合处理的相关政策与实际工程案例,废水混合处理在未来的污、废水处理中具有较大优势。

5.2 工业废水混合处理的挑战

虽然工业废水混合处理具有较大优势,但在大范围推广应用过程中也存在一定挑战。

1)工业废水成分复杂,部分工业废水中含有有毒、有害难降解物质,与其他废水直接混合处理需要进行成分测定和可行性评估,但目前相关的政策、标准还较缺乏,既缺少将含有易降解有机质的废水作为优质碳源进行资源化利用的引导性政策,也缺乏对水质、水量、混合比例进行规定的技术标准。因此,相关废水混合处理的大规模工程实践项目缺乏科学的政策指导。

2)废水混合处理后出水毒性残留及长期运行的毒性累积有待进一步评估,如部分食品工业废水中含有添加剂等成分,印染废水中含有碱性、高毒、难降解的染料,过高比例的难降解废水会造成有毒物质的累积,导致长期运行处理效率降低。

3)由于一些工业废水可生化性差,需要增加初沉池、水解酸化池等预处理设施,对工程建设改造提出了一定要求,在短时间内会增加投资成本。

4)工业园区废水混合处理需要从粗放式混合向精准混合转变,目前一些废水未经成分分析而直接全部混合至污水处理厂集中处理,因而处理效果不佳,故需要从源头开始分类收集、分质管理、专线输送,根据资源互补的原则进行精准混合,确保废水混合处理的效果,对工业园区废水排放智慧化管理也提出了更高的要求。

综上所述,废水混合处理在工业园区实现广泛的工程应用还有待从科学研究、工程实践、标准制定及科学管控等方面形成一体化的实施体系。

5.3 工业废水混合处理的研究与应用展望

目前,基于微生物共代谢的工业废水混合处理方法在食品工业废水、纺织工业废水、造纸工业废水、制药工业废水中已经进行了研究和实践,按照适当比例混合,废水可生化性提高,毒性降低,微生物对难降解有机物的处理效果得到显著提高,极具推广应用潜力。然而,仍有以下几方面需要进行深入研究与探讨。

1)由于工业废水成分复杂,处理过程中及处理

后的出水中是否含有毒有害副产物还有待进一步研究,混合后废水成分之间的相互反应、废水成分与微生物的相互作用机理尚需进一步探讨。

2)目前,由于缺乏相应的法律法规、政策标准,中国对废水混合处理的研究还停留在中试阶段,实际的工程项目案例较少,亟需根据不同工业废水的特征,设置工业废水排放比例,制定相关的混合比例与排放标准,保障生物处理效率。

3)充分利用工业园区聚集性优势,优先进行小范围推广,与智慧水务系统相结合,精准控制混合比例和处理效果,最大程度利用污水中的资源,建设绿色低碳工业园区,最终实现节能低碳的废水混合处理技术的大范围推广应用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook (2011) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴(2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of China, Department of Ecological Environment. China Environmental Statistics Yearbook (2021) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)
- [3] MAO G Z, HAN Y X, LIU X, et al. Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis [J]. Chemosphere, 2022, 288(2): 132483.
- [4] OBOTEY EZUGBE E, RATHILAL S. Membrane technologies in wastewater treatment: A review [J]. Membranes, 2020, 10(5): 89.
- [5] DONKADOKULA N Y, KOLA A K, NAZ I, et al. A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2020, 19(3): 543-560.
- [6] CRINI G, LICHTFOUSE E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(1): 145-155.
- [7] DOS SANTOS C R, LEBRON Y A R, MOREIRA V R, et al. Biodegradability, environmental risk assessment and ecological footprint in wastewater technologies for pharmaceutically active compounds removal [J]. Bioresource Technology, 2022, 343: 126150.
- [8] JENSEN H L. Carbon nutrition of some microorganisms decomposing halogen-substituted aliphatic acids [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 1963, 13(4): 404-412.
- [9] XIONG H F, DONG S S, ZHANG J, et al. Roles of an easily biodegradable co-substrate in enhancing tetracycline treatment in an intimately coupled photocatalytic-biological reactor [J]. Water Research, 2018, 136: 75-83.
- [10] JAIN M, MAJUMDER A, GHOSAL P S, et al. A review on treatment of petroleum refinery and petrochemical plant wastewater: A special emphasis on constructed wetlands [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 272: 111057.
- [11] YAN R F, WANG Y B, LI J H, et al. Determination of the lower limits of antibiotic biodegradation and the fate of antibiotic resistant genes in activated sludge: Both nitrifying bacteria and heterotrophic bacteria matter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 425: 127764.
- [12] 赵治权, 李多, 张崇军, 等. A/O联合化学沉淀法处理江水补给农药生产废水[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 104-107.
ZHAO Z Q, LI D, ZHANG C J, et al. A/O combined with chemical precipitation process for treatment of pesticide production wastewater replenished by river water [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47 (10): 104-107. (in Chinese)
- [13] BADIA A, KIM M, DAGNEW M. Nitrite denitrification using biomass acclimatized with methanol as complementary carbon source: Long-term performance and kinetics study [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2021, 7(1): 93-106.
- [14] 殷同昕, 操家顺, 张腾, 等. 不同碳源下反硝化亚硝酸盐积累情况研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(11): 2919-2925.
YIN T X, CAO J S, ZHANG T, et al. Research progress on nitrite accumulation during denitrification with different carbon sources [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(11): 2919-2925. (in Chinese)
- [15] FU X R, HOU R R, YANG P, et al. Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review [J]. The Science of the Total Environment, 2022, 817: 153061.
- [16] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 168-181.
XIONG Z K, ZHENG H L, SHANG J F, et al. State-of-the-art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 168-181. (in Chinese)
- [17] PAHUNANG R R, BUONERBA A, SENATORE

- V, et al. Advances in technological control of greenhouse gas emissions from wastewater in the context of circular economy [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 792: 148479.
- [18] 韦朝海,周红桃,黄晶,等. 污水的内含能及污水处理过程的耗能与节能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(5): 151-163.
WEI C H, ZHOU H T, HUANG J, et al. Embodied energy of wastewater and energy consumption and saving in its treatment processes [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(5): 151-163. (in Chinese)
- [19] HU H D, MA S J, ZHANG X X, et al. Characteristics of dissolved organic nitrogen in effluent from a biological nitrogen removal process using sludge alkaline fermentation liquid as an external carbon source [J]. *Water Research*, 2020, 176: 115741.
- [20] NEGASSA L W, MOHIUDDIN M, TIRUYE G A. Treatment of brewery industrial wastewater and generation of sustainable bioelectricity by microbial fuel cell inoculated with locally isolated microorganisms [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 41: 102018.
- [21] RORKE D C S, LEKHA P, KANA G E B, et al. Effect of pharmaceutical wastewater as nitrogen source on the optimization of simultaneous saccharification and fermentation hydrogen production from paper mill sludge [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 25: 100619.
- [22] YU X, ZHENG H R, SUN L, et al. An emissions accounting framework for industrial parks in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118712.
- [23] 国家发改委,科技部,国土资源部,等. 中国开发区审核公告目录(2018年版)[EB/OL]. (2018-02-26). http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201803/t20180302_878800.html.
National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Land and Resources, et al. *China Development Zone Review Bulletin Directory (2018 edition)* [EB/OL]. (2018-02-26). http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201803/t20180302_878800.html. (in Chinese)
- [24] HONG H R, GASPARATOS A. Eco-industrial parks in China: Key institutional aspects, sustainability impacts, and implementation challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 122853.
- [25] SHI J X, HUANG W P, HAN H J, et al. Review on treatment technology of salt wastewater in coal chemical industry of China [J]. *Desalination*, 2020, 493: 114640.
- [26] ZAIED B K, RASHID M, NASRULLAH M, et al. A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138095.
- [27] HUANG C, HUANG Z Y, HU Y, et al. Treatment of wastewater generated from traditional Chinese medicine processing and utilization: Recent advances and future outlook [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125927.
- [28] TANG G M, ZHANG Y B, WEI Y J, et al. Advanced treatment of bio-treated Chinese patent medicine wastewater using ozone/peroxymonosulfate-upflow biological aerated filter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 390: 124527.
- [29] ZHONG W W, ZHAO Y N, CHEN S Q, et al. Resources recycle of traditional Chinese medicine (TCM) wastewater 1: Effectiveness of the UF-MD hybrid system and MD process optimization [J]. *Desalination*, 2021, 504: 114953.
- [30] PENG Y C, YE G R, DU Y L, et al. Fe₃O₄ hollow nanospheres on graphene oxide as an efficient heterogeneous photo-Fenton catalyst for the advanced treatment of biotreated papermaking effluent [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(29): 39199-39209.
- [31] 吴芳磊,贺航运,梁庸,等. 造纸废水处理强化生化系统 COD 去除的实例[J]. *工业水处理*, 2022, 42(3): 186-190.
WU F L, HE H Y, LIANG Y, et al. Examples of improving COD removal by strengthening biochemical system in papermaking wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(3): 186-190. (in Chinese)
- [32] RAM C, RANI P, GEBRU K A, et al. Pulp and paper industry wastewater treatment: Use of microbes and their enzymes [J]. *Physical Sciences Reviews*, 2020, 5(10): 20190050.
- [33] OLAJIRE A A. The brewing industry and environmental challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 102817.
- [34] SHRIVASTAVA V, ALI I, MARJUB M M, et al. Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential [J]. *Chemosphere*, 2022, 293: 133553.
- [35] MUHAMAD NG S N, IDRUS S, AHSAN A, et al. Treatment of wastewater from a food and beverage industry using conventional wastewater treatment integrated with membrane bioreactor system: A pilot-scale case study [J]. *Membranes*, 2021, 11(6): 456.
- [36] 李建英. 工业废水排放对河流水体质量影响研究[J]. 环

- 境科学与管理, 2022, 47(2): 102-106.
- LI J Y. Impact of industrial wastewater discharge on river water quality [J]. *Environmental Science and Management*, 2022, 47(2): 102-106. (in Chinese)
- [37] ALMOMANI F, BHOSALE R, KHRAISHEH M, et al. Heavy metal ions removal from industrial wastewater using magnetic nanoparticles (MNP) [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 506: 144924.
- [38] CAI F R, LEI L R, LI Y M, et al. A review of aerobic granular sludge (AGS) treating recalcitrant wastewater: Refractory organics removal mechanism, application and prospect [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 782: 146852.
- [39] 于博洋, 崔晓春, 曹野, 等. 高级氧化-生物降解近场耦合技术研究现状与展望[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(4): 108-117.
- YU B Y, CUI X C, CAO Y, et al. Research status and prospects of intimately coupled advanced oxidation and biodegradation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(4): 108-117. (in Chinese)
- [40] 南平, 王君, 潘春梅, 等. 8-羟基喹啉对草鱼急性毒性和遗传毒性的研究[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(7): 1430-1432.
- NAN P, WANG J, PAN C M, et al. Study on the acute toxicity and genetic toxicity of 8-hydroxyquinoline on *ctenopharyngodon idellus* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(7): 1430-1432. (in Chinese)
- [41] 张勇如. 工业废水排放对居民健康的影响: 基于CHNS调查数据的分析[D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2017.
- ZHANG Y R. The impact of industrial wastewater discharge on residents: Analysis based on the CHNS data [D]. Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2017. (in Chinese)
- [42] LUO X H, LIANG C, HU Y Y. Comparison of different enhanced coagulation methods for azo dye removal from wastewater [J]. *Sustainability*, 2019, 11(17): 4760.
- [43] MU R H, LIU B, CHEN X, et al. Hydrogel adsorbent in industrial wastewater treatment and ecological environment protection [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 20: 101107.
- [44] XIONG Z K, ZHANG H, ZHANG W C, et al. Removal of nitrophenols and their derivatives by chemical redox: A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 13-31.
- [45] YALCINKAYA F, BOYRAZ E, MARYSKA J, et al. A review on membrane technology and chemical surface modification for the oily wastewater treatment [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(2): 493.
- [46] SAGHAFI S, EBRAHIMI A, MEHRDADI N, et al. Evaluation of aerobic/anaerobic industrial wastewater treatment processes: The application of multi-criteria decision analysis [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019, 38(5): 13166.
- [47] NAJAFI SAVADROUBARI E, FALLAH N, DAVARPANAH L, et al. A comparison between anaerobic and aerobic biological treatment for real wastewater containing high concentration of dimethylamine: Case study of wastewater from artificial leather production [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 220: 93-100.
- [48] CHATTOPADHYAY I, BANU J R, MOHAMED USMAN T M, et al. Exploring the role of microbial biofilm for industrial effluents treatment [J]. *Bioengineered*, 2022, 13(3): 6420-6440.
- [49] HORVATH R S. Microbial co-metabolism and the degradation of organic compounds in nature [J]. *Bacteriological Reviews*, 1972, 36(2): 146-155.
- [50] RIEKENBERG P, OAKES J, EYRE B. Shining light on priming in euphotic sediments: Nutrient enrichment stimulates export of stored organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(18): 11165-11172.
- [51] DING R, ZHANG D D, GAO Y X, et al. Characteristics of refractory organics in industrial wastewater treated using a Fenton-coagulation process [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(22): 3432-3440.
- [52] 唐诗月, 王晴, 杨淼焱, 等. 共代谢基质强化微生物修复四氯乙烯污染地下水[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(8): 1893-1902.
- TANG S Y, WANG Q, YANG M Y, et al. Co-substrates enhanced bioremediation of groundwater contaminated by tetrachloroethylene [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(8): 189-1902. (in Chinese)
- [53] 李彦澄, 刘邓平, 李蕾, 等. 难降解有机物微生物共代谢技术研究进展[J]. *现代化工*, 2019, 39(11): 25-28, 34.
- LI Y C, LIU D P, LI L, et al. Advances in co-metabolic technology of refractory organic pollutants and micro-organisms [J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, 39(11): 25-28, 34. (in Chinese)
- [54] 徐鹏. 煤气废水杂环与多环芳烃化合物生物降解及抑制性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- XU P. Research on biodegradability and inhibitory properties of heterocyclic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [55] 付莉燕, 文湘华, 徐丽婕, 等. 活性翠蓝生物降解性能的试验研究[J]. *环境科学*, 2001, 22(4): 100-103.
- FU L Y, WEN X H, XU L J, et al. Biodegradation of

- reactive turquoise blue [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2001, 22(4): 100-103. (in Chinese)
- [56] ZHANG Y M, PU X J, FANG M M, et al. 2, 4, 6-Trichlorophenol (TCP) photobiodegradation and its effect on community structure [J]. Biodegradation, 2012, 23(4): 575-583.
- [57] HEIDARI H, SEDIGHI M, ZAMIR S M, et al. Bisphenol A degradation by *Ralstonia eutropha* in the absence and presence of phenol [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 119: 37-42.
- [58] BAI Q, YANG L H, LI R J, et al. Accelerating quinoline biodegradation and oxidation with endogenous electron donors [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11536-11542.
- [59] WANG J G, SUN Z R. Exploring the effects of carbon source level on the degradation of 2, 4, 6-Trichlorophenol in the co-metabolism process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 392: 122293.
- [60] 李蓉洁. 外源电子供体在加速2, 4, 6-三氯酚生物降解中的作用[D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
- LI R J. The role of exogenous electron donors for accelerating 2, 4, 6-Trichlorophenol biodegradation [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015. (in Chinese)
- [61] TANG Y X, ZHANG Y M, YAN N, et al. The role of electron donors generated from UV photolysis for accelerating pyridine biodegradation [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2015, 112(9): 1792-1800.
- [62] YU Y, NDAYISENGA F, YU Z S, et al. Co-substrate strategy for improved power production and chlorophenol degradation in a microbial fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(36): 20312-20322.
- [63] XIONG J Q, KURADE M B, KIM J R, et al. Ciprofloxacin toxicity and its co-metabolic removal by a freshwater microalga *Chlamydomonas Mexicana* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 323(A): 212-219.
- [64] TRAN N H, URASE T, KUSAKABE O. The characteristics of enriched nitrifier culture in the degradation of selected pharmaceutically active compounds [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1/2/3): 1051-1057.
- [65] KASSOTAKI E, BUTTIGLIERI G, FERRANDOCLEMENT L, et al. Enhanced sulfamethoxazole degradation through ammonia oxidizing bacteria co-metabolism and fate of transformation products [J]. Water Research, 2016, 94: 111-119.
- [66] ZHANG C J, ZHANG Q F, DONG S S, et al. Could co-substrate sodium acetate simultaneously promote *Chlorella* to degrade amoxicillin and produce bioresources [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417: 126147.
- [67] ZHANG C J, DONG S S, CHEN C L, et al. Co-substrate addition accelerated amoxicillin degradation and detoxification by up-regulating degradation related enzymes and promoting cell resistance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 394: 122574.
- [68] WANG Q F, LIU W B, LI X T, et al. Carbamazepine toxicity and its co-metabolic removal by the cyanobacteria *Spirulina platensis* [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 706: 135686.
- [69] ZHANG C J, ZHAO Z Q, DONG S S, et al. Simultaneous elimination of amoxicillin and antibiotic resistance genes in activated sludge process: Contributions of easy-to-biodegrade food [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 764: 142907.
- [70] WANG H, LI X, GONG Z Y, et al. Co-metabolic substrates enhanced biological nitrogen removal from cellulosic ethanol biorefinery wastewater using aerobic granular sludges [J]. Environmental Technology, 2020, 41(3): 389-399.
- [71] 柴蓓蓓, 曹锋锋, 鞠恺, 等. 不同碳源条件生物滤池深度脱氮效能及其经济性[J]. 水处理技术, 2021, 47(5): 83-88.
- CHAI B B, CAO F F, JU K, et al. Efficiency and economy of deep nitrogen removal of biofilter under different carbon source conditions [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(5): 83-88. (in Chinese)
- [72] 许兴原. 工业污水处理厂生物脱氮效率提升措施的研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2020, 1(24): 14-17.
- XU X Y. Research on measures to improve biological nitrogen removal efficiency in industrial wastewater treatment plants [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2020, 1(24): 14-17. (in Chinese)
- [73] DENG D, LAMSSALI M, ARYAL N, et al. Textiles wastewater treatment technology: A review [J]. Water Environment Research, 2020, 92(10): 1805-1810.
- [74] PATEL K, PATEL N, VAGHAMSHI N, et al. Trends and strategies in the effluent treatment of pulp and paper industries: A review highlighting reactor options [J]. Current Research in Microbial Sciences, 2021, 2: 100077.
- [75] 刘润池, 田国华. 制药行业废水特征污染因子控制指标分析: 以上海市为例[J]. 当代化工研究, 2022(12): 47-49.
- LIU R C, TIAN G H. Control index analysis of characteristic pollution factors of pharmaceutical wastewater: A case study of Shanghai [J]. Modern Chemical Research, 2022(12): 47-49. (in Chinese)
- [76] 张春燕, 王忠庆. 腈纶废水与醋酸废水混合处理的试验

- 研究[J]. 石油化工环境保护, 2002(4): 14-17.
ZHANG C Y, WANG Z Q. Study on mixing treatment of acrylic fiber wastewater with acetic and wastewater [J]. Environment Protection in Petrochemical Industry, 2002(4): 14-17. (in Chinese)
- [77] 新华网. 当污水处理厂喝上“啤酒”, “放错位置的资源”给出青岛方案 [EB/OL]. [2021-12-8]. http://www.news.cn/fortune/2021-12/08/c_1128141352.htm. netXinhua. When the sewage treatment plant drinks beer, the misplaced resources give Qingdao scheme [EB/OL]. [2021-12-8]. http://www.news.cn/fortune/202112/08/c_1128141352.htm. (in Chinese)
- [78] 腾讯网. “喝”啤酒, “吃”糖果! 这些污水处理厂你知道吗 [EB/OL]. [2022-3-26]. <https://new.qq.com/omn/20211003/20211003A044QF00.html>. Tencent net. Drink beer and eat candy! Do you know about these sewage treatment plants [EB/OL]. [2022-3-26]. <https://new.qq.com/omn/20211003/20211003A044QF00.html>. (in Chinese)
- [79] 姜金宏, 何席伟, 熊晓敏, 等. 纺织印染废水毒性特征与控制技术研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 77-87.
JIANG J H, HE X W, XIONG X M, et al. Research progress on toxicity characteristics and control technologies of textile dyeing wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 77-87. (in Chinese)
- [80] 余丹, 罗建中, 刘敏强, 等. 牛仔服洗水与浆染废水混合处理小试研究[J]. 广东化工, 2014, 41(12): 137-139.
YU D, LUO J Z, LIU M Q, et al. Study on combination treatment of jeans washing wastewater and dyeing wastewater [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(12): 137-139. (in Chinese)
- [81] 周自坚, 许振成, 魏清伟, 等. 低浓度生活污水混掺印染废水的处理实验研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(7): 62-66.
ZHOU Z J, XU Z C, GUO Q W, et al. Experimental research on the treatment of low-concentration domestic sewage doped with dyeing wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(7): 62-66. (in Chinese)
- [82] ZHANG H, YANG C, SHI X Q, et al. Effluent quality prediction in papermaking wastewater treatment processes using dynamic Bayesian networks [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 125396.
- [83] 郭康鹰, 高宝玉, 岳钦艳. 造纸污泥的资源化综合利用研究现状与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 118-131.
GUO K Y, GAO B Y, YUE Q Y. Research status and prospect of the comprehensive utilization of paper mill sludge [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 118-131. (in Chinese)
- [84] 邵林广, 熊峰, 杨盼. 纸浆造纸废水与城市污水厂进水混合处理的试验研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(3): 112-114, 117.
SHAO L G, XIONG F, YANG P. Experimental study of mixed treatment with pulp paper making wastewater and urban sewage treatment plant effluent [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(3): 112-114, 117. (in Chinese)
- [85] 魏小玲. 染料废水与造纸废水混合处理对A/O工艺的影响研究[D]. 山东青岛: 山东科技大学, 2010.
WEI X L. Study on the affect of the mixed treatment of the dye and papermaking wastewater to A/O process [D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [86] SHAH A, SHAH M. Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 11: 100383.
- [87] 徐锋, 朱嘉伟, 周泉, 等. 复式兼氧-好氧-缺氧-MBR工艺处理合成制药废水[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 137-140.
XU F, ZHU J W, ZHOU Q, et al. Treatment of synthetic pharmaceutical wastewater by the compound facultative anaerobic-aerobic-anoxic-MBR process [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 137-140. (in Chinese)
- [88] 李贺. 我国中药类制药废水处理实际工程应用进展[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2021, 22(4): 67-72, 106.
LI H. Status and research progress in the treatment of pharmaceutical wastewater from traditional Chinese medicine in China [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2021, 22(4): 67-72, 106. (in Chinese)
- [89] 王秀. H制药厂二沉池出水与城市污水混合处理的可行性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WANG X. Feasibility study on the mixed treatment of the secondary sedimentation tank effluent from H pharmaceutical factory and urban sewage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [90] 吴艾欢, 杨婷婷, 李丽, 等. 工业废水与生活污水合并处理方案研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2017, 27(4): 48-51.
WU A H, YANG T T, LI L, et al. A study on the combined treatment of industrial wastewater and domestic sewage [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2017, 27(4): 48-51. (in Chinese)
- [91] 张鹏, 边笛, 董怡华. 工业园区依托城镇污水处理厂处理工业废水可行性研究[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(8): 37-40, 50.

- ZHANG P, BIAN D, DONG Y H. Feasibility study on industrial wastewater treatment by urban sewage treatment plant in industrial park [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2021, 41(8): 37-40, 50. (in Chinese)
- [92] 李咏梅, 王林, 崔康平, 等. 化学工业园区混合废水深度处理工艺技术集成与示范[J]. *给水排水*, 2013, 49(8): 9-13.
- LI Y M, WANG L, CUI K P, et al. Integration and demonstration of advanced treatment technology for mixed wastewater in chemical industrial park [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 49(8): 9-13. (in Chinese)
- [93] 贾敏, 程婉清, 穆洪新, 等. 基于斑马鱼胚胎毒性与非靶化学分析的典型工业园区废水处理效率研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 138-146.
- JIA M, CHENG W Q, MU H X, et al. Treatment efficiency of typical industrial wastewater based on zebrafish embryo toxicity and non-target analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(6): 138-146. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)