

# 城镇污水处理厂碳减排技术研究和应用

王兴斌

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 城镇污水处理是一种能源密集型的高能耗产业,其碳排放量占全社会总排放量的1~2%。在“双碳”目标的背景下,实现污水处理减污降碳、低碳绿色和可持续发展已成为未来污水处理厂的主要发展方向。本文分析了污水和污泥处理过程中温室气体的构成和来源,并从工艺运行优化、资源能源回收、清洁能源利用、低碳新工艺开发等角度总结了目前国内外污水处理厂碳减排的技术措施和应用案例,并对我国城镇污水处理厂实现碳减排提出展望,以期为污水处理厂低碳技术的推广和应用提供参考。

**[关键词]** 污水处理; 碳减排; 低碳技术; 资源能源回收; 清洁能源; 温室气体

**[中图分类号]** X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)03-0088-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.015

## 0 前言

近年来,我国城镇污水处理行业快速发展,截至2021年,全国已建成城市和县城污水处理厂4592座,总处理能力2.47亿 $\text{m}^3/\text{d}$ ,年处理污水总量超过610亿 $\text{m}^3$ ,对减少污染物排放和改善水环境发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。然而,污水处理属于能耗密集型行业,其碳排放量占全社会总排放量的1%~2%<sup>[2]</sup>,在国家“双碳”目标的背景下,低碳化和可持续发展已成为未来污水处理厂的主要发展方向。本文在分析污水处理厂碳排放来源的基础上,从工艺运行优化、资源能源回收、清洁能源利用、低碳新工艺开发等方面总结了污水处理碳减排技术研究和应用进展,以期为污水处理厂低碳运行提供参考。

## 1 污水处理厂碳排放

污水处理厂碳排放是指污水处理过程中产生的氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )和二氧化碳( $\text{CO}_2$ )等

温室气体排放的总和。污水处理厂碳排放包括污水处理直接碳排放、污泥处理直接碳排放和间接碳排放三部分。污水厂各处理单元碳排放来源见表1。

表1 污水厂各处理单元碳排放来源

处理流程	处理单元	直接碳排放			间接碳排放	
		$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	电耗	物耗
污水处理	预处理		√	√	√	
	生化处理	√	√	√	√	√
	深度处理		√		√	√
污泥处理	浓缩/脱水		√	√	√	√
	厌氧消化		√	√	√	
	好氧消化			√	√	
	焚烧	√		√	√	
污泥处置	卫生填埋		√	√		
	土地利用		√			

### 1.1 污水处理直接碳排放

$\text{N}_2\text{O}$ 是一种强效且稳定的温室气体,会造成臭氧层破坏,其温室效应是 $\text{CO}_2$ 的298倍、 $\text{CH}_4$ 的4~30倍,污水生物脱氮过程是 $\text{N}_2\text{O}$ 的重要排放源<sup>[3]</sup>。硝化过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 产生途径有2种<sup>[4-5]</sup>:高 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和低 $\text{NO}_2^-$ 条件下,氨氧化菌将氨氧化中间产物羟胺( $\text{NH}_2\text{OH}$ )氧化成 $\text{N}_2\text{O}$ ;溶氧 $\text{DO}$ 浓度较低条件下,氨氧化菌以氨或氢作为电子供体,将 $\text{NO}_2^-$ 还原生成 $\text{N}_2\text{O}$ 。反硝化过程中,氧化亚氮还原酶活性受到抑制时, $\text{N}_2\text{O}$ 不能进一步还原为 $\text{N}_2$ ,从而累积并释放到大气中。

**[收稿日期]** 2023-12-21

**[作者简介]** 王兴斌(1984—),男,陕西渭南人,硕士,高级工程师,主要从事市政工程及有色工业等领域的给排水设计和咨询工作。

**[引用格式]** 王兴斌. 城镇污水处理厂碳减排技术研究和应用[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(3): 88-93, 98.

WANG Xingbin. Research and application of carbon emission reduction technology in urban wastewater treatment plant[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 88-93, 98.

污水处理过程中的  $\text{CH}_4$  直接排放主要发生在生物反应池的厌氧区和好氧区, 格栅、沉砂池、初沉池、缺氧区和深度处理单元在厌氧环境中也会产生  $\text{CH}_4$  [6]。在厌氧条件下, 微生物(产甲烷菌)代谢有机物产生  $\text{CH}_4$  的主要途径有 3 种 [7-8]: ①产甲烷菌在体内一系列酶共同作用下将甲醇 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) 转化为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ; ② $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$  合成产甲烷; ③乙酸经产甲烷菌代谢生成  $\text{CH}_4$ 。影响  $\text{CH}_4$  排放的主要因素有 COD 浓度、水温和溶解氧等。厌氧区 COD 浓度越高, 越有利于  $\text{CH}_4$  的释放;  $\text{CH}_4$  的释放量与污水温度呈正相关; 好氧区、缺氧区的  $\text{CH}_4$  的释放与曝气作用或机械搅拌对水流的扰动有关, DO 浓度升高有利于  $\text{CH}_4$  的释放。

污水处理过程中的  $\text{CO}_2$  直接排放主要源自有机物在好氧条件下被微生物降解, 按有机物来源分为生源性  $\text{CO}_2$  和化石源  $\text{CO}_2$  [9]。从碳循环角度看, 生源性  $\text{CO}_2$  可溯源至植物光合作用, 不会造成温室效应, 因此, 生源性  $\text{CO}_2$  不纳入污水处理厂碳排放核算; 化石源  $\text{CO}_2$  来源于化石燃料, 如洗涤剂、药物、化妆品等, 该部分有机物降解产生的  $\text{CO}_2$  应纳入碳排放核算 [10]。污水处理厂生产环节中锅炉、发电内燃机、运输车辆等设备运转会用到汽油、柴油、天然气等化石燃料, 这些化石燃料燃烧产生的  $\text{CO}_2$  也应纳入碳排放核算。

### 1.2 污泥处理处置直接碳排放

污水处理厂污泥处理及处置过程中会产生温室气体排放。

厌氧消化处理剩余污泥时, 污泥中有机物在微生物降解作用下最终产生大量  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  气体, 沼气收集过程中也会产生部分  $\text{CH}_4$  泄漏,  $\text{CH}_4$  气体经收集燃烧产生的  $\text{CO}_2$  也属于厌氧消化过程, 污泥中部分有机物可溯源至化石源  $\text{CO}_2$ , 应纳入碳排放核算 [11]。好氧堆肥方法处理剩余污泥时, 有机物可氧化生成  $\text{CO}_2$ , 含氮有机物降解会产生  $\text{N}_2\text{O}$ 。

脱水后污泥进行卫生填埋处置时, 其中有机物在厌氧条件下降解生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ , 部分有机物可溯源至化石源  $\text{CO}_2$ , 应纳入碳排放核算。采用焚烧方式处置污泥时, 有机物在高温环境下降解产生  $\text{CO}_2$ , 部分有机物可溯源至化石源  $\text{CO}_2$ , 应纳入碳排放核算。

### 1.3 间接碳排放

间接碳排放是指污水和污泥处理过程中消耗的电力和物料引起的碳排放。电力消耗为污水处理厂

水泵、曝气风机、污泥脱水等设备运行和维护所消耗的电量; 物耗为污水处理厂生产运行过程中消耗的天然气、燃油、混凝剂、絮凝剂、碳源、消毒剂以及清洗剂等化学药剂。

### 1.4 典型污水处理厂碳排放量

国内外学者对污水处理厂碳排放量核算开展了许多研究工作。本文以睢县第三污水处理厂(中国首座污水处理概念厂, 一期规模  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ) 为例 [12], 采用排放因子法和实测法, 在“多级 AO + 反硝化深床滤池 + 厌氧消化 + 沼气热电联产 + 光伏发电”污水处理新模式下核算该污水处理厂 2021 年的碳排放量, 结果见表 2。

表 2 睢县第三污水处理厂 2021 年碳排放 kg/d

阶段	直接碳排放			间接碳排放	
	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	电耗	物耗
污水处理碳排放	15.05	27.98	1 594.7	4 087.7	5 736
污泥处理碳排放		178.42	667.27	1 096.7	32.51
沼气热电联产碳减排			1 656.8		
光伏发电碳减排			3 213.3		
碳汇类(植物)碳减排			260		

由表 2 可知, 污水处理间接碳排放主要来源为物耗和电耗, 具有较大的碳减排潜力。采用沼气热电联产、光伏发电等碳减排措施可减少碳排放。

## 2 污水处理碳减排方法

### 2.1 工艺运行优化

污水处理厂可通过工艺运行优化实现  $\text{N}_2\text{O}$  减量化、降低电力消耗和药剂消耗, 从而实现碳减排。

#### 2.1.1 $\text{N}_2\text{O}$ 减量化

生物脱氮过程中, 影响  $\text{N}_2\text{O}$  生成的主要影响因素有 DO 浓度、 $\text{NO}_2^-$  浓度、碳氮比和 pH 值等, 溶氧 DO 浓度越低、 $\text{NO}_2^-$  浓度越高,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放强度越高; 反硝化过程中, DO 浓度越高、 $\text{NO}_2^-$  浓度越高、碳氮比越低,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放强度越高; 弱碱性的反应环境 ( $\text{pH} = 8.0 \sim 8.5$ ) 也会促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 [5]。研究发现 [13], 硝化反应时, 控制 DO 浓度  $> 0.5 \text{ mg/L}$ 、污泥停留时间 (SRT)  $\geq 10 \text{ d}$ 、pH 值  $> 6.8$  以及降低温度有利于降低  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量; 反硝化系统中充足的碳源(碳氮比  $> 5.2$ ) 和适宜的 pH 值 ( $6 \sim 7$ ) 有利于反硝化活动的正常进行, 减少  $\text{N}_2\text{O}$  的释放量。通过向污水处理系统中投加特定工程菌的方式, 优化微生物

物种群结构,减少以  $N_2O$  为最终产物的菌群,富集  $N_2O$  产生量小的菌群,也可以降低  $N_2O$  的释放。

### 2.1.2 降低电力消耗

电力消耗是污水处理厂间接碳排放的主要影响因素,我国污水处理厂平均耗电  $0.29 \sim 0.40 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,水泵和曝气系统是污水处理中的主要耗电单元<sup>[14]</sup>。

水泵机组主要节能措施有:根据水量选择合适的泵组和运行方式,避免水泵低效或无效运行,定期检修维护,增加变频功能,更新使用高效电机。曝气系统耗电占污水处理厂总能耗的  $40\% \sim 60\%$ 。有关研究<sup>[15-18]</sup>表明,使用磁悬浮风机、空悬浮风机等高效涡轮鼓风机代替传统风机可降低约  $35\%$  的能耗;选用微孔曝气器替换传统的陶粒、刚玉等曝气装置,可提升氧利用率和曝气效率;精确曝气系统根据空气流量和 DO 浓度调整空气控制阀及鼓风机工况,可实现按需供气,实践表明精确曝气系统应用于污水处理可降低  $10\% \sim 30\%$  的能耗。

### 2.1.3 降低药剂消耗

污水处理过程中需要投加碳源、除磷剂等多种药剂。传统污水处理厂采用人工手动或简单控制方式投加药剂,存在过量加药、控制滞后、运营成本高等问题,同时增加了化学污泥产生量,造成间接碳排放量增加。智能加药控制主要由在线监测仪表、智能控制中心(包括控制器、计算模型软件)、变频加药泵和远程传输模块等组成,该系统可在保证出水水质情况下有效降低药剂投加量。黄俊熙等<sup>[19]</sup>在广州某污水厂采用除磷加药智能控制系统后,除磷药剂用量降低了  $40\% \sim 50\%$ ,  $2 \sim 3$  年即可回收控制系统的建设成本。吴宇行等<sup>[20]</sup>在青岛市某城镇污水处理厂建立碳源智能投加控制系统并进行生产规模试验,系统正式运行后,在出水达标情况下,吨水乙酸钠药耗降低  $21.2\%$ ,月均节省药剂费  $4.72$  万元。

另外,城镇污水处理厂预处理单元普遍存在跌水复氧现象,增加的 DO 会消耗可生物降解的碳源,造成生物池碳源不足,因而需要额外投加碳源。通过在跌水区域加装盖板,可阻断内外空气交换,降低复氧值,减少后续碳源投加<sup>[21]</sup>。

## 2.2 资源能源回收

城市污水和污泥中蕴含着多种资源和能源,如磷、有机物等,经过适当的处理对其进行回收利用,不但可以产生一定的经济效益,还可减少碳排放量。

### 2.2.1 磷回收

磷是动植物生长必须的重要元素,同时也是一

种不可再生能源。生活污水和剩余污泥中含有丰富的磷资源,采取适当的技术手段对其进行回收,可替代磷矿的开发和消耗,从而实现碳减排。污水处理厂磷资源回收主要分为:污水中磷回收;污泥或污泥焚烧灰分磷回收<sup>[22]</sup>。

污水中磷回收是通过向厌氧池上清液、污泥厌氧消化上清液等含磷水中投加化学药剂,生产鸟粪石(磷酸铵镁)、蓝铁矿、磷酸钙、磷酸铁和磷酸铝等产品,从而实现磷回收,磷回收率为  $20\% \sim 25\%$ 。鸟粪石和蓝铁矿可以直接作为缓释磷或磷肥用于生产中,其他磷酸盐主要作为磷矿替代物。从污泥中回收磷往往通过污泥减量化实现,剩余污泥通过脱水+水热碳化产生的生物炭作为磷肥进行利用。污泥焚烧灰分的磷回收率高( $70\% \sim 90\%$ ),回收成本低,是未来污水厂磷回收的主要方式。表3列举了部分国内外污水处理厂磷回收应用案例<sup>[22]</sup>。

### 2.2.2 能量回收

生活污水中蕴含大量有机物和化学能,传统污水处理是一种“以能消能”的处理方式,进水中大部分 COD 被氧化降解转化为  $CO_2$ ,只有少部分转化至剩余污泥中。采用厌氧消化工艺可将剩余污泥中有机物转化为沼气,然后通过燃烧或者发电的形式将其转化为热能和电能,以此抵消污水处理中的能量消耗,减少碳排放量。我国市政污水中 COD 浓度普遍较低( $< 500 \text{ mg}/\text{L}$ ),在污泥中掺加餐厨垃圾等有机废物进行共消化可提高  $CH_4$  产量。目前,我国市政污水厂沼气利用技术已有较成熟应用<sup>[23]</sup>,北京高碑店等 5 座污泥处理中心采用厌氧消化耦合热电联产技术,可抵消污水厂  $18\% \sim 20\%$  的能耗;上海白龙港污泥处理工程将厌氧消化产生的沼气回用于污泥干化,每年可减少  $CO_2$  排放量约  $13$  万 t。

## 2.3 清洁能源利用

### 2.3.1 污水余温热能

城镇生活污水具有丰富的余温热能,占城市废热排放量的  $15\% \sim 40\%$ <sup>[24]</sup>。污水处理厂出水的水质和水量稳定,在冬天可采用污水源热泵技术将出水中低品质能量提取出来,用于室内采暖;在夏天将室内的热量带走,并释放到污水中,从而降低室内温度进行制冷。污水中提取的热能属于低品位热能,不能用于发电,只能进行直接利用,考虑到热损失,热能有效输送距离为  $3 \sim 5 \text{ km}$ ,因此污水余温热能多用于污水厂内及周边建筑供热/冷。目前,污水源热泵技术已应用到多个污水处理厂,国内外污水处

表3 国内外污水处理厂磷回收应用案例

回收方法	国家及污水处理厂	回收位置	回收方法及原理	回收产物
	意大利 Trivisio 污水厂	污泥脱水上清液	在污泥脱水上清液线路上安装鸟粪石结晶装置,采用吹脱方法(脱除CO <sub>2</sub> ,提高pH值)沉淀生成磷酸铵镁(鸟粪石),产物可作磷肥利用	鸟粪石
污水中磷回收	荷兰 Geestmerambacht 污水厂	溶解性富磷上清液	向流化床反应器内投加氢氧化钙处理溶解性富磷上清液,回收磷酸钙	磷酸钙
	荷兰 Nieuwveer 污水厂	污泥消化液	向污泥消化液中投加铁盐生成磷酸盐矿物,即蓝铁矿(Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O),产物可作化肥原料	蓝铁矿
污泥中回收磷	中国济宁污水厂	脱水污泥	预脱水污泥在高温180~220℃、高压2MPa条件下于反应釜中碳化,再经压滤机固液分离产出污泥生物炭	生物炭
	德国温克尔污水厂	80%干重污泥	污泥在高温、高压、绝热条件下干化及碳化产出生物炭	生物炭
焚烧灰分回收磷	法国敦刻尔克	污泥焚烧灰分	污泥焚烧可以有效破坏有机物、致病微生物等,焚烧热处理后产生的焚烧灰可以作为磷肥进入市场	磷酸、磷酸钙
	日本30多个污泥焚烧炉	污泥焚烧灰分	污泥焚烧灰分中含磷泥渣作为路基材料或土壤改良剂	含磷泥渣

理厂污水余热热能部分应用案例见表4<sup>[23,25]</sup>。

表4 国内外污水处理厂污水热能回收应用案例

国家	污水处理厂	用途
瑞典	Rry 污水处理厂	5170 座建筑供热
芬兰	Kakolanmäki 污水处理厂	厂区和周边 15 000 户家庭供热/制冷
中国	秦皇岛海港区西部污水处理厂	厂区建筑供热/制冷
中国	西安市第一污水处理厂	厂区周边 160 万 m <sup>2</sup> 的建筑供热
中国	大连春柳河污水处理厂	厂区 4 000 m <sup>2</sup> 建筑供热/制冷

### 2.3.2 光伏发电

太阳能是一种适合就近开发利用的可再生能源,污水处理厂占地面积较大,充分利用初沉池、二沉池、生化池等构筑物上部空间安装分布式光伏发电设施,可提高污水厂能源自给率。我国污水处理光伏发电技术处于发展阶段,部分工程应用案例如下<sup>[25-26]</sup>:合肥王小郢污水处理厂在氧化沟和沉淀池上方安装容量为 10.8 MW 的光伏组件,年均发电量约 1 200 万 kW·h;北京小红门、酒仙桥、清河 3 座再生水厂的光伏发电总装机容量为 18.7 MW,年均发电量为 1 800 万 kW·h,实现 CO<sub>2</sub> 减排 1.1 万 t;郑州马头岗污水厂光伏板总容量为 17 MW,年均发电量为 1 900 万 kW·h,节能降碳效果显著。

## 2.4 低碳新工艺开发

近年来,厌氧氨氧化(ANAMMOX)、短程硝化反硝化(SCND)、好氧颗粒污泥(AGS)等新型脱氮除磷工艺在高效节能、污泥减量和碳减排等方面具有显著优势,成为污水处理行业研究的热点和

焦点。

### 2.4.1 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化是由荷兰 Delft 技术大学 Mulder 等提出的新型生物脱氮工艺,其原理是在厌氧/缺氧条件下,厌氧氨氧化菌(AAOB)以 NH<sub>3</sub>-N 为电子供体,以 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 为电子受体,将 NH<sub>3</sub>-N 氧化为 N<sub>2</sub><sup>[27]</sup>。

相较于传统的硝化反硝化工艺,厌氧氨氧化可节省 60% 的曝气能耗,且具有无需外加有机碳源、污泥产量低的优势。目前国内外已有超过 200 座厌氧氨氧化污水处理工程投产运行,主要集中在中温、高氨氮(氨氮浓度大于 300 mg/L)废水,如污泥消化液、焦化废水、垃圾渗滤液等<sup>[28]</sup>。在市政污水领域,奥地利 Strass 污水处理厂将侧流中的 AAOB 补充到主流工艺,主流工艺利用水力旋流器分离和富集 AAOB,使 AAOB 的丰度及颗粒的尺寸都明显提高<sup>[29]</sup>。西安市第四污水处理厂通过向厌氧池和缺氧池投加 MBBB 填料,可为 AAOB 的附着和生长提供适宜的环境,在低温条件下实现了稳定和高效的主流厌氧氨氧化反应<sup>[30]</sup>。但是,主流污水处理厌氧氨氧化工程应用仍面临如下挑战:污水厂进水氨氮浓度低,不利于 AAOB 稳定生成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>;进水有机物和 DO 影响 AAOB 丰度和活性;冬季水温低,AAOB 生长速率慢,反应启动时间长,脱氮速率低。

### 2.4.2 短程硝化反硝化

短程硝化反硝化(SCND)指在硝化反应时控制反应产物在亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)阶段,然后直接进入反硝化进行脱氮,其反应过程为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N→NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N→N<sub>2</sub>。与全程硝化反硝化相比,SCND 硝化阶段可以节省约 25% 的氧气消耗,反硝化阶段可节省约 40%

的碳源消耗,能够减少污泥产量和碳排放<sup>[31]</sup>。JIANG 等<sup>[32]</sup>采用 SCND 工艺处理低碳氮比生活污水,在连续流系统中控制 DO 为 1.5 mg/L 时,污水中亚硝氮平均积累率达 78%,总氮平均去除率为 76%。新加坡 Changi 污水厂<sup>[33]</sup>采用 PNA(短程硝化耦合厌氧氨氧化)工艺处理主流生活污水,通过分段进水及交替好氧、缺氧条件来抑制亚硝酸盐氧化菌(NOB)活性,进水温度基本保持在 30 ℃,厌氧氨氧化效果较稳定,总氮去除率约 37.5%。Li 等<sup>[34]</sup>采用 PDA(短程反硝化耦合厌氧氨氧化)工艺处理生活污水,在生化池缺氧段添加生物膜载体,控制缺氧区的 DO 浓度在 0.03 mg/L 以下,经过 600 d 的运行,出水 TN 浓度保持在 8 mg/L 左右,且缺氧区 AAOB 的丰度明显高于常规污水处理厂,实现了强化脱氮及 AAOB 的原位富集。

#### 2.4.3 好氧颗粒污泥

好氧颗粒污泥(AGS)是在好氧条件下絮状活性污泥通过自凝聚作用形成的生物聚集体。与传统活性污泥相比,AGS 具有生物浓度高、沉降速度快、抗冲击负荷强、高耐毒性等优点<sup>[35]</sup>。Nereda<sup>®</sup>工艺是由荷兰 DHV 公司和 DELFT 理工大学于 20 世纪 90 年代合作研发的新型好氧颗粒污泥技术,该工艺于 2008 年首次用于南非某污水处理厂的升级改造,截至 2022 年,Nereda<sup>®</sup>工艺已成功应用到 50 多座污水处理设施,总处理能力约  $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

#### 2.4.4 生物电化学技术

生物电化学是将电化学技术和生物学技术相结合的一种新型污水处理技术,污染物降解主要在阴极进行,微生物降解有机物并产生电子,电子通过外电路传导到阴极,与电子受体相结合,从而实现化学能转化为电能<sup>[36]</sup>。该技术具有耗能低、无污染等优点,以产电生物膜为核心的生物电化学技术已经成为污水处理领域研究的热点。相关研究发现一种 4 室的生物电化学反应器能够同步去除废水中的有机污染物,将其转化为电能,并将电能原位实现氨氮去除及回收<sup>[37]</sup>。

### 3 结论和展望

城镇污水处理厂“以能消能”的处理方式,会带来大量  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  等温室气体排放。在国家“双碳”目标提出的背景下,城镇污水厂未来发展方向是在满足出水达标的基础上实现碳减排和可持续发展。我国污水处理厂应充分借鉴国内外污水厂成

功经验,通过工艺运行优化、资源能源回收、清洁能源利用、低碳新工艺开发等策略实现污水厂碳减排。

1) 工艺运行优化方面,通过控制运行参数可减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放,采用高效机电设备、精确曝气控制系统、智能加药系统、对预处理系统跌水复氧改造可减少处理过程中电耗和药耗。

2) 从污水/污泥中回收磷在保证碳减排的同时还产生一定的经济效益。污水处理厂开展污泥厌氧消化-共消化-热电联产技术应用,可实现有机物化学能的高效回收。

3) 污水源热泵和光伏发电等清洁能源技术在污水处理厂的应用是提升污水厂能源自给率的重要手段。

4) 新型节碳工艺如厌氧氨氧化、短程硝化反硝化、好氧颗粒污泥等可实现污染物的高效去除,降低碳排放,具有极大的开发潜力和经济价值。

#### [参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴(2021). 中国统计出版社, 2021.
- [2] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水, 2017(3): 1-3, 73.
- [3] 胡振, 张建, 谢慧君, 等. 污水生物脱氮过程中  $\text{N}_2\text{O}$  的产生与控制研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 95-100
- [4] 陈虎, 王莹, 吕永康. 污水微生物脱氮过程中  $\text{N}_2\text{O}$  产生机理及影响因素研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(12): 4020-4025.
- [5] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [6] 张星, 陈敏东, 高庆先, 等. 生活污水处理厂甲烷的释放通量及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 657-662.
- [7] 方晓瑜, 李家宝, 芮俊鹏, 等. 产甲烷生化代谢途径研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(1): 1-9.
- [8] 柳岩, 孙德智, 伦小秀. 污水输送和污水处理过程中  $\text{CH}_4$  产生与排放特征及影响因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 91-95.
- [9] 李东梅, 吴丹萍, 吴敏, 等. 污水处理厂运行工况对温室气体排放的影响[J]. 化工进展, 2021, 40(12): 6897-6906.
- [10] 柴宏祥, 杨世琪, 何强, 等. 污水生物处理脱氮工艺的温室气体排放比较[J]. 给水排水, 2014(7): 129-134.
- [11] 林文聪, 赵刚, 刘伟, 等. 污水厂污泥典型处理处置工艺碳排放核算研究[J]. 环境工程, 2017, 35(7):

- 175-179.
- [12] 王庆会. 新概念污水处理厂碳排放量核算研究——以睢县第三污水处理厂为例[D]. 华北水利水电大学, 2022.
- [13] 何德明, 尹志轩, 刘长青, 等. 生物脱氮工艺过程中N<sub>2</sub>O的释放机理及减排影响因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(8): 1054-1061.
- [14] 李云, 蒋进元, 白璐, 等. 污水处理厂能耗评估与优化现状[J]. 工业水处理, 2018, 38(9): 1-4.
- [15] 宋新新, 林甲, 刘杰, 等. 面向未来污水处理技术应用研究现状及工程实践[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 39-53.
- [16] 臧超, 詹健. 城市污水厂节能降耗措施初探[J]. 净水技术, 2015, 34(1): 75-77.
- [17] 谢小明. 精确曝气控制在污水处理厂中的应用和探索[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6): 24-27.
- [18] 荆玉姝, 牟润芝, 姜怡名, 等. 曝气精确控制实现污水处理厂节能降耗的应用[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 141-145, 165.
- [19] 黄俊熙, 岑玉铭, 关宇霆, 等. 污水处理过程中除磷加药智能控制系统及应用研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 104-107.
- [20] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 212-218, 271.
- [21] 马永明, 李伟. 某典型城市污水处理厂除磷药剂的选择与效能分析[J]. 有色设备, 2022, 36(6): 67-70, 74.
- [22] 郝晓地, 申展, 李季, 等. 国际上主要污水磷回收技术的应用进展及与之相关的政策措施[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11): 3507-3516.
- [23] 常纪文, 井媛媛, 耿瑜, 等. 推进市政污水处理行业低碳转型, 助力碳达峰、碳中和[J]. 中国环保产业, 2021(6): 9-17.
- [24] 郝晓地, 叶嘉洲, 李季, 等. 污水热能利用现状与潜在用途[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 15-22.
- [25] 杨庆, 王亚鑫, 曹效鑫, 等. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 292-305.
- [26] 钱媛媛, 王永杰, 杨雪晶. 光伏与“光伏+水务”在污水处理厂的应用现状[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 40-50.
- [27] 王永磊, 刘宝震, 张克峰. 厌氧氨氧化脱氮工艺研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(3): 259-269.
- [28] 夏琼琼, 张文安, 王雅雄, 等. 污水处理厌氧氨氧化工艺研究与应用进展[J]. 水处理技术, 2019, 45(5): 1-5.
- [29] 陈珺, 王洪臣, BERNHARD WETT. 城市污水处理工艺迈向主流厌氧氨氧化的挑战与展望[J]. 给水排水, 2015, 51(10): 29-34.
- [30] 解云飞, 徐文杰, 迟媛媛, 等. 厌氧氨氧化技术在市政污水中的应用和研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(12): 1-6.
- [31] 张馨文, 王荣震, 冯成业, 等. 生活污水短程硝化脱氮工艺的快速启动及稳定性研究[J]. 环境工程, 2022, 40(10): 9-14.
- [32] JIANG Cancan, XU Shengjun, WANG Rui, et al. Achieving efficient nitrogen removal from real sewage via nitrite pathway in a continuous nitrogen removal process by combining free nitrous acid sludge treatment and DO control[J]. Water Research, 2019, 161: 590-600.
- [33] Cao Yeshi, Kwok Bee Hong, Yan Zhou, 等. 新加坡最大回用水处理厂污水短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(10): 1441-1454.
- [34] LI J, PENG Y, ZHANG L, et al. Quantify the contribution of anammox for enhanced nitrogen removal through metagenomic analysis and mass balance in an anoxic moving bed biofilm reactor[J]. Water Research, 2019, 160: 178-187.
- [35] 黄思浓, 林树涛, 易名儒, 等. 好氧颗粒污泥的脱氮途径研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(9): 37-42.
- [36] 华涛, 冯宇航, 张静卓, 等. 有机污染物作为生物电化学系统电子供体研究进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(6): 1-6.
- [37] YE B, LIANG T, NONG Z, et al. Simultaneous desalination and ammonia recovery using microbial electrolysis desalination and chemical-production cell: a feasibility study of alkaline soil washing wastewater[J]. Desalination, 2021, 520: 115372.

(下转第98页)

## Analysis on the Transformation Path of Circular Economy Model for Hazardous Waste Treatment

ZHOU Chunjie, YANG Shengkai

(Changsha Huiyang Environment Tech Co., Ltd., Changsha 410001, China)

**Abstract:** At present, with the public's attention to environmental protection and resource sustainability, the effective treatment of hazardous waste has become a global problem. This paper reviewed the current situation of China's hazardous waste treatment industry and the evolution of hazardous waste related policies, and proposed a circular economy model of 'source reduction + process reuse + end treatment' for hazardous waste treatment. Taking an industrial park in Quzhou as an example, the three major cycles of enterprise internal circulation, industrial internal circulation and park internal circulation formed by hazardous waste treatment were introduced, the process of material circulation flow of "resource-product-hazardous waste-renewable resource" were analyzed, the feasibility of resource recycling was explored, and suggestions on hazardous waste treatment under circular economy mode from the perspectives of policy, technology, economic benefits and management supervision were put forward.

**Key words:** hazardous waste; circular economy; resource regeneration; environmental policy; recycling; industrial park

(上接第 93 页)

## Research and Application of Carbon Emission Reduction Technology in Urban Wastewater Treatment Plant

WANG Xingbin

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Urban wastewater treatment is an energy intensive and high-energy consuming industry, its carbon emissions accounting for 1% ~2% of the total emissions of society. In the context of the "Dual Carbon" target, reducing pollution and carbon emission, low-carbon, green and sustainable development has become the main development direction of future wastewater treatment plant. This article analyzed the composition and source of greenhouse gases in wastewater and sludge treatment process, and summarized the current technologies and application cases for carbon reduction in wastewater treatment plant at home and abroad from the perspectives of process operation optimization, resource and energy recovery, clean energy utilization, and low-carbon new process development. The article also proposed prospects for achieving carbon reduction in urban wastewater treatment plants in China, in order to provide reference for the promotion and application of low-carbon technologies in wastewater treatment plant.

**Key words:** wastewater treatment; carbon reduction; low-carbon technology; resource and energy recovery; clean energy; greenhouse gas