

污水处理碳中和运行技术研究进展

杨庆¹, 王亚鑫¹, 曹效鑫², 刘秀红³, 章世勇¹

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 贵州筑信水务环境产业有限公司, 贵阳 550000;
3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 污水处理厂作为公认的温室气体(greenhouse gas, GHG)主要排放源之一,正在从“达标排放”向可持续污水处理的方向进行革新转变,碳中和运行已成为未来污水处理的核心内容。而传统污水处理工艺“以能消能”“污染转嫁”,处理过程能耗高且排放大量 CO₂、N₂O 等温室气体。为有效控制污水处理厂温室气体的排放量,从宏观和微观 2 个角度,分析了目前污水处理厂中实现碳中和运行的技术措施,并介绍了国内外污水处理厂在能源开源和节流方面的成功经验。这对于降低污水处理厂的碳排放量,实现污水处理厂的低碳运行,不断逼近碳中和的终极目标具有借鉴意义。

关键词: 污水处理; 碳中和; 低碳工艺; 节能降耗; 可持续; 能源自给

中图分类号: X 703

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)03-0292-14

doi: 10.11936/bjtxb2021090022

Research Progress of Carbon Neutrality Operation Technology in Sewage Treatment

YANG Qing¹, WANG Yaxin¹, CAO Xiaoxin², LIU Xiuhong³, ZHANG Shiyong¹

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Guizhou Zhuxin Water Environment Industry Company Limited, Guiyang 550000, China;

3. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Wastewater treatment plants that are recognized as one of the main sources of greenhouse gas (GHG) are undergoing an innovative transformation from “standard emission” to sustainable sewage treatment. Carbon neutrality operation has become the core content of future wastewater treatment. The characteristic of traditional activated sludge processes is the transform of pollutants and energy. The traditional wastewater treatment process adopts the way of “energy dissipation” and “pollution transfer”, which consumes lots of energy and emits a large number of greenhouse gases such as CO₂ and N₂O. To reduce the greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants effectively, the current technical measures to achieve carbon neutrality operation from both macro and micro perspectives were analyzed and the use of domestic and foreign sewage treatment plants to increase energy sources and reduce expenditures were introduced in this paper. The successful experiences that domestic and foreign wastewater treatment plants to increase energy utilization and reduce energy consumption were introduced, which provided a significant reference for reducing the carbon emissions of wastewater treatment plants, gradually realizing the low-carbon operation of wastewater treatment plants and steadily approaching the ultimate goal of “carbon neutrality”.

收稿日期: 2021-09-24; 修回日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978008); 国家自然科学基金创新群体项目(62021003)

作者简介: 杨庆(1979—), 男, 教授, 主要从事污水脱氮除磷以及 N₂O 减排方面的研究, E-mail: yangqing@bjut.edu.cn

Key words: sewage treatment; carbon neutrality; low-carbon process; energy saving and consumption reduction; sustainable; energy self-sufficiency

几个世纪以来,随着工业生产的急剧发展和人类生活质量的快速提高,温室效应问题愈发突出,引发了全球气候变暖、海平面上升、恶劣天气频出等一系列生态环境问题,降低碳排放量,减缓全球气候变暖,已成为21世纪世界各国的共识^[1]。为应对和缓解日益突出的极端气候问题,“碳中和”这一低碳运行理念应运而生。碳中和是指企业、团体或个人在一定时间内直接或间接产生的温室气体(greenhouse gas, GHG)排放总量,通过植树造林、节能减排等形式将这些排放量抵消掉,使二氧化碳(CO₂)在排放和吸收之间达成长期平衡^[2],最终达到生态文明的目的。

污水处理行业是我国的耗能大户,2020年全行业耗电约184亿kW·h,且在社会总能耗中的比例逐年提高^[3]。目前我国城市污水处理主流工艺主要采用生化处理方式,在处理过程中会消耗大量能源和化学药剂来实现水质净化,且会产生大量的CO₂、氧化亚氮(N₂O)、甲烷(CH₄)等温室气体,是公认的温室气体释放源之一^[4],从某种程度讲这是一种“以能消能”“污染转移”“以能耗换水质”的非绿色手段^[5]。与此同时,污水中有机污染物所蕴藏的大量有机化学能(1.5~1.9 kW·h/m³^[6])几乎未被有效利用,这就需要不断开发和利用污水/污泥中蕴藏的潜在能源,亦要研发与应用具有“低碳”潜能的污水处理工艺和技术。因此,本文从宏观和微观2个角度对目前污水厂中碳中和运行的技术措施进行了综述,并介绍了国内外污水厂在能源开源和节流方面的成功经验,以期对碳中和运行技术的实际工程应用提供理论基础,不断向实现碳中和的目标迈进。

1 污水处理中碳排放及利用现状

污水处理碳中和运行的实质就是实现整个污水处理过程能源的自给自足,依靠污水处理厂或污水自身的能量来弥补能耗^[7]。然而,传统活性污泥处理过程通过曝气设备供氧将污水中有机物(40%~50%)转化为CO₂的同时,将其余的有机物(50%~60%)通过微生物转化为难处理的剩余污泥^[8]。换言之,该种方式在消耗大量外部能源进行污水处理的过程中,实际上是将污染的方式从水污染转化为空气污染和污泥污染,同时还消耗了大量的外部能

源,可谓是“以能消能”“污染转嫁”,这显然不符合可持续发展理念,城市污水处理厂中温室气体的排放情况见图1。污水中的COD也可以厌氧消化产CH₄、发酵产氢等可持续的方式先被转化为CH₄或H₂等含能载体,将其中的化学能利用之后再生成CO₂。无论采用哪种污水处理方式,CO₂都是COD转化的最终归宿,但经可持续途径对外部能源的需求量大大降低,而且也间接减少了CO₂的排放量。

此外,传统的污水资源化处理也主要是针对水本身的回用,例如回用于绿化灌溉、洗涤或工业冷却水等方面,却忽略了污水本身含有丰富的碳资源这一问题^[9]。污水实际上是一种资源与能源的载体,据估计,COD为400~500 mg/L的城市污水潜在化学能为1.5~1.9 kW·h/m³^[10],每千克COD约能产生0.14×10⁸ J的代谢热^[11],污水每升高或降低5℃所产生的热量几乎等于332座大型发电厂的年发电量,约为有机物代谢热的4倍^[12]。污水中蕴含着如此巨大的能量,如果合理利用其中部分COD的化学能甚至是热能,并将其转换为电能,理论上可以实现能耗的“自给自足”,甚至可以向外输出能量(电能、热能)。有大量的理论依据证明,未来的新型污水处理厂不应是能源的消耗者,而应成为能源的供应方^[6]。然而传统的污水处理工艺以耗能供氧来去除COD,使得污水中所蕴藏的大量化学能和热能远未被提取和利用,有悖于碳中和的发展理念。因此,对污水处理中潜在能源进行回收与利用有着重要的实际意义,对践行低碳发展理念、推进污水处理碳中和运行有着不可估量的作用。

2 污水处理厂中碳减排的措施

针对上述污水处理中碳排放、利用现状以及与碳排放的关系,应充分利用污水中蕴藏的潜在能源(COD),并以可持续的方式将其转化成CH₄或H₂等含能载体,将其中化学能利用后再稳定至CO₂,最终达到碳减排的目的。在此基础上,从宏观和微观2个角度开发污水处理厂潜能(COD、太阳能),并审视污水处理过程的低碳运行策略,研发与应用具有低碳运行潜力的污水处理工艺与技术。

2.1 宏观角度

提升设备能效,优化工艺运行。污水处理中提升泵房、鼓风机房、内外回流泵和污泥加热设备是主

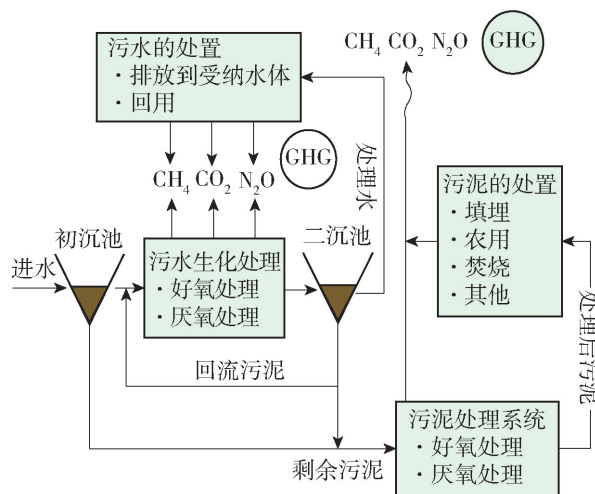


图1 城市污水处理厂温室气体的排放情况

Fig.1 Emissions of greenhouse gas from municipal sewage treatment plants

要的耗能节点,其中鼓风机电耗占污水处理厂总能耗的50%~70%^[13],因此高效鼓风机的选择对污水厂的节能降耗尤为重要。有实例表明,空气悬浮及磁悬浮等高效鼓风机可节约30%以上的能耗^[14-15]。德国Gruneck污水处理厂通过更换高效风机、优化风机性能等措施使污水厂能源自给率由64%提高至约72%,增幅达8%以上^[15]。国内也有相关案例表明,通过对鼓风机进行节能改造,污水处理厂的耗电量明显下降。我国某市政污水厂用磁悬浮鼓风机替代原有的罗茨鼓风机,年节电达到 3.06×10^5 kW·h,且兼具维护便捷、无须值守及噪声污染小等特点,效益显著^[16]。谢荣焕等^[17]对某污水处理厂鼓风机改造(罗茨风机改造为空气悬浮离心鼓风机)前后运行情况进行了分析。结果表明,改造后风机设备装机功率由1000 kW下降为900 kW,而出风能力由536 m³/min上升为588 m³/min,节能22%,年节约电费可达100万元。

一直以来,我国城市污水厂处理工艺的曝气、回流等运行环节一般采用固定数值运行,造成一定的能源浪费^[11]。因此,精细化智能控制(电耗、药耗)对污水处理厂的节能降耗也起着至关重要的作用。研究表明,采用德国Binder公司开发的精确曝气控制系统——VACOMASS可降低25%~30%的曝气能耗^[18]。北京排水集团对鼓风曝气系统及药剂投加系统进行精准控制,节省约10%的曝气能耗、30%~50%药剂投配率;每年可降低电耗1500万~2000万kW·h,减排CO₂量9000~12000 t^[3]。但是精细化智能控制系统在实际工程运行中仍存在一些

问题,该系统对气体流量计、水流量计等仪表的精度要求较高;对于精细化曝气系统,若控制系统调节后的曝气量不能与理论需要的曝气量一致,容易造成出水水质不达标。此外,该系统设备维护的要求也较高。随着使用时间的增长,仪表可能会出现较大偏差,需要频繁校正,因此对污水厂工作人员的技术要求较高。综上所述,我国污水处理厂应根据自身运营情况,合理对鼓风机等设备进行改造,确保在对原水厂影响小、费用低、后续节能效果明显的情况下进行改造。

2.2 微观角度

2.2.1 开发污水厂潜能技术途径

2.2.1.1 回收有机能源

随着污水处理规模的增大,副产物污泥产生量不断增加。据估计,到2025年我国的污泥产量将突破9000万t^[19]。污泥中富集了大量有机物、重金属等污染物质与氮、磷等营养物质,是一种具有经济潜力的可持续利用资源^[20]。目前污泥主要通过焚烧发电、厌氧消化产甲烷及生物产氢等3种途径进行能源转化^[21]。

污泥焚烧是指对污泥进行热处理,是最直接、有效实现污泥减量的方式之一^[22],且污泥直接焚烧进行发电的能源转化效率可达80%^[21]。目前国际上应用较多的主要是污泥干化焚烧技术^[19],将污泥进行干化预处理后再进行焚烧,焚烧后的灰渣可以作为建筑材料资源化利用,且可以回收焚烧热量,但是我国还尚未制定污泥干化焚烧的相关标准,其臭气、尾气释放、监测及后续处理等问题急需解决。另外,焚烧技术对设备、施工工艺要求较高,投资和能耗较大,在实际中应用的实例并不多见。污泥厌氧消化作为目前最简单、最有效的有机能量转化途径^[23],可将COD转化为CH₄,CH₄燃烧热值可高达 8.4×10^4 kJ/kg^[24],耦合热电联产技术可实现热、电2种能源的回收利用。目前污泥热电联产技术已应用在我国多个工程项目上,并取得了显著的碳减排效果。北京小红门再生水厂污泥处理采用厌氧消化工艺,年产沼气1300万~1500万m³,可产生电能3000万~3300万kW·h。高碑店等5座污泥处理中心通过逐步完善厌氧消化耦合热电联产技术,预计在2021—2022年沼气产能可替代污水污泥处理全过程18%~20%的电能,每年预计可减少CO₂排放约8万t^[3]。当前,厌氧消化的强化技术也是国际上研究的热点,且像热水解预处理、混合基质共消化、分级分相厌氧消化^[25]等技术已在实际工程中规

模化应用.北京高碑店及高安屯再生水厂的污泥处理均采用“污泥热水解-厌氧消化”技术,不仅显著提高了污泥厌氧消化性能,还大大增加了 CH_4 产量^[26-27].镇江市京口污水处理厂将污泥与餐厨垃圾等有机质协同处理,促进了厌氧消化系统的产气能力,同时也减少了沼气中 H_2S 的含量^[28].近年来,生物制氢也是国际关注的热点研究领域之一.污泥厌氧发酵制氢工艺简单,便于操作,并可减少有机废弃物对环境的污染及对化石燃料的使用,具有效率高、能耗低、投资少等诸多优点^[22],但因生物制氢完全是一种自然现象,产氢效率很低,只有理论氢转化率的 20%~30%^[29].此外,虽然 H_2 本身属于一种清洁能源,但从 COD 中获得 H_2 的同时也会有 CO_2 产生,并非不产生 CO_2 的清洁能源.且采用污水或污泥的厌氧发酵产氢研究大多停留在实验室小试研究,规模化应用较少.综合分析,生物制氢途径难以成为行之有效的污泥能量转化的具体工程措施,因此如何实现污泥厌氧发酵产氢的工业化应用是今后应当努力的方向.

然而,就污水中蕴含的潜能而言,传统剩余污泥厌氧消化虽然可以回收有机能量(CH_4)^[30],但其能源转化率较低.据能量平衡计算可得,进水 COD 为 400 mg/L 的市政污水在完成脱氮除磷后,产生的剩余污泥经中温厌氧消化产 CH_4 后热电联产(combined heat and power, CHP),仅有 14% 的理论化学能可实现回收^[31-32],约合 $0.20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ (污水)电当量.如果污水处理能耗为 $0.40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ (污水),理论上进水 COD 应达到 800 mg/L 才能满足碳中和目标.但我国市政污水 COD 普遍偏低(200~400 mg/L),若仅仅采取污水所蕴含的化学能作为污水处理厂唯一的有机能源回收方式,仅能满足 50% 甚至更低的能源自给率.因此,要想实现污水处理碳中和运行,仅仅依靠回收污水中的化学能不太现实,需要寻找有机能源之外的其他潜能.

2.2.1.2 回收利用污水中余温热能

污水中亦蕴藏着巨大的余温热能,约为污水中化学能的 4 倍^[15],占城市废热排放总量的 15%~40%^[33].据日本东京都下水道局计算,如果东京的污水量以 500 万 m^3/d 计算,其年均热能高达 37 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的发电量,可供 40 万户家庭全年开设空调^[34].污水处理厂热能利用的主要方式是通过污水源热泵技术提取污水中的余温热能,目前国内已建成多个污水源热泵系统并投入使用.污水源热泵技术流程见图 2.国内外污水处理厂热能应用情况

见表 1.污水源热泵充分利用了污水四季温度变化小、流量稳定等特点,对低位热能进行回收,其贮存的大量热能被公认为是可开发的清洁能源^[37].但污水中热能属于低品位能源,回收利用受距离的限制,热量有效输送半径仅为 3~5 km^[33],目前只能向污水处理厂内或其周边建筑、工业园区等场所供冷或供热.国内实例研究表明,沈阳北部污水厂周边区域建筑冬季供暖改用污水源热泵供暖之后,一个采暖期可以减少燃煤量 7.1 万 t, SO_2 减排 727 t, 烟尘减排 533 t, CO_2 减排 14 万 t^[38].周志平等^[39]通过对长沙市污水中可利用能量的计算分析,发现若按照利用 60% 的城市污水来计算,对 CO_2 、 SO_x 、 NO_x 、粉尘等 4 种污染物的减排量很大,其中 CO_2 的减少量最大,在制冷情况下削减量达到 111 463.8 kg/d; 在供热情况下,达到 287 846 kg/d.北京排水集团也积极推广水源热泵的开发与利用,在北京高碑店再生水厂、小红门再生水厂、清河再生水厂、酒仙桥再生水厂、高安屯再生水厂、北小河再生水厂等 11 座再生水厂,均应用了污水源热泵.在 2016—2020 年,上述水厂累计供热量高达 530 万 GJ,累计节约天然气约 1.6 亿 m^3 ,年供热量为 106 万 GJ,年节约天然气 3 180 万 m^3 ,为集团内外共计 160 万 m^2 范围提供供暖及制冷服务^[3].污水源热泵技术的合理应用能够有效回收与利用污水中蕴藏的巨大热能,实现碳中和运行的比例可达到 487.63%,将污水处理厂由传统的高耗能单位变为供能单位^[35],对提高能源有效利用效率,实现污水处理厂低碳运行具有重要的意义.

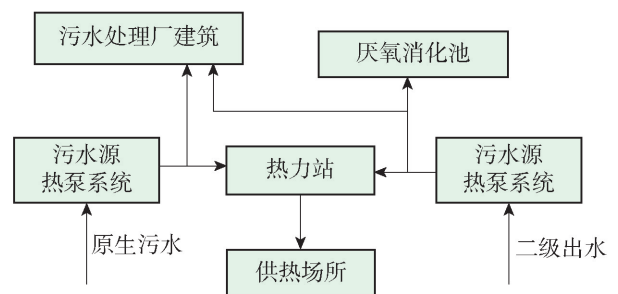


图 2 污水源热泵技术流程图^[35]

Fig. 2 Technical flow chart of sewage source heat pump^[35]

2.2.1.3 利用太阳能及风能等可再生能源

利用风能、太阳能等可再生能源发电也可提高污水处理厂的能源自给率.因一般污水处理厂海拔较低,所以难以实现风力发电.对于具有较大占地面积的污水处理厂可利用太阳能发电以提高能源自

表1 国内外污水处理厂热能应用案例

Table 1 Thermal energy application cases in domestic and foreign sewage treatment plants

国家	污水处理厂	用途	参考文献
中国	海港区西部污水处理厂	为厂区办公楼和生产生活区域供热和制冷(制热输出量为3.27亿kW·h/a, 制冷输出量为0.29亿kW·h/a)	[3]
中国	大连大开污水处理厂	为厂区内、大连恒基再生水厂、恒基环保学校供热和制冷	[3]
瑞典	Hammarbyverket 污水处理厂	为95 000个住宅建筑供热	[36]
荷兰	Rijnlanden 污水处理厂	为10 000个家庭供热	[36]
中国	大连春柳河污水处理厂	供热总建筑面积约4 000 m ² , 满足厂区内办公及生产用房采暖要求	[3]

给率. 目前,我国采用太阳能发电的污水处理厂仍处于探索阶段,部分企业尝试在初沉池、曝气池、清水池等构筑物上方铺设太阳能板,在实现清洁发电的同时,也能除臭和保温. 北京排水集团在小红门、清河、酒仙桥3座再生水厂利用太阳能发电,年均发电量2 400万kW·h,可降低CO₂排放约1.45万t. 近年间,北京排水集团将进一步扩大铺设太阳能板范围,预计年发电量达1 800万kW·h,每年可降低CO₂排放约1.1万t^[3]. 上海白龙港污水处理厂计划在生化池上方铺设太阳能板,设计年均发电量约为1亿kW·h,预计年均25%的总用电量可实现绿色能源替代^[3]. 但太阳能发电一次性投资比较大,且后期维护成本高^[40],对于建设费用充足、运营水平高的污水处理厂而言,不失为一种清洁高效的能源供应方式.

2.2.2 低碳工艺的研发与应用

目前,单一的污水有机污染物去除处理已无法适应现代化发展要求,大多数采用传统活性污泥工艺的污水处理厂均以“达标排放”向“能源和资源回收”革新转变. 短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、短程反硝化耦合厌氧氨氧化、反硝化除磷等具有巨大低碳运行潜力的可持续处理工艺已成为日益盛行的污水处理工艺.

2.2.2.1 可持续脱氮技术

基于低能源和碳源处理的短程硝化/反硝化、厌氧氨氧化技术是未来具有较高应用推广价值的可持续脱氮代表性技术^[41]. 传统脱氮途径(NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻ → N₂)不仅曝气能耗高,剩余污泥量大,运行过程中还会释放大量的N₂O、CO₂等温室气体. 如果控制硝化作用在生成NO₂⁻的阶段,之后开始反硝化,其耗氧量和耗碳量分别可降低约25%和40%^[42],可实现O₂和COD用量的双重节约(见图3). 厌氧氨氧化以NO₂⁻-N为电子受体,直接将

NH₄⁺-N氧化为N₂,可以节约60%的曝气能耗量,无须外加有机碳源^[43],同时可减少80%的剩余污泥量. 因此,厌氧氨氧化具有经济高效的显著优势,是目前污水脱氮领域的研究热点.

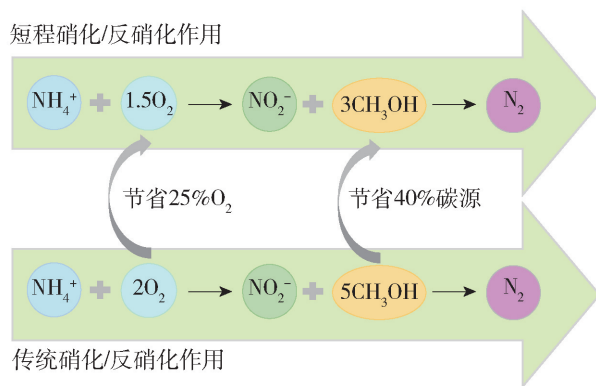


图3 短程与传统硝化/反硝化脱氮途径

Fig. 3 Partial nitrification and traditional nitrification/denitrification

在短程硝化的基础上,进一步与厌氧氨氧化耦合也是目前厌氧氨氧化应用的典型工艺之一^[44],工艺流程见图4. 耦合后,NH₄⁺-N被直接自养转换到N₂,不仅减少了能耗和投资,而且使NO、N₂O等温室气体的排放量大大降低,NO和N₂O占氮负荷的比例分别低至0.20%和2.3%^[45]. 荷兰鹿特丹Dokhaven污水处理厂第一次将SHARON与Anammox耦合工艺成功应用于高氨氮的污泥消化液处理,与传统硝化反硝化过程相比,SHARON与Anammox的耦合工艺可减少88%的CO₂排放量和90%的运行费用^[11]. 国内对该工艺的研究多处于中试阶段,赵晴等^[46]通过短程硝化耦合厌氧氨氧化工艺处理垃圾渗滤液,发现该系统氨氮和亚硝酸盐氮的平均去除率均超过95%. 马斌等^[47]采用短程硝化耦合厌氧氨氧化处理生活污水,在A/O硝化系统中,亚硝酸盐累积率高达95%,在上流式厌氧污

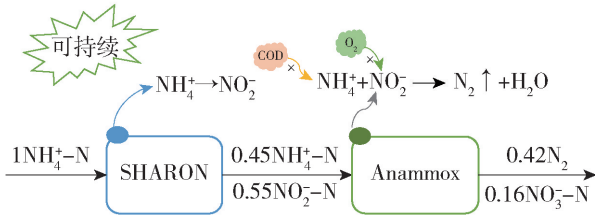


图4 SHARON-Anammox 相结合的自养脱氮工艺流程

Fig.4 Process of SHARON-Anammox combined autotrophic nitrogen removal

泥床(upflow anaerobic sludge, UASB)系统中总去除率也高于88%。北京排水集团采用厌氧氨氧化工艺来处理污泥消化液,总处理规模为15 900 m³/d,每年可减少碳排放1.05万t^[3]。但针对城市生活污水主流厌氧氨氧化工程应用目前仍存在亚硝态氮制备困难、厌氧氨氧化菌富集等世界性难题。有研究表明,通过控制溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH等关键条件,以及利用游离氨(free ammonia, FA)和游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)抑制亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)活性的方法,能够实现短程硝化过程^[48]。但实际污水厂的生物池是一个极其复杂的系统,且实际城市污水氨氮浓度普遍偏低,缺乏FA或FNA抑制NOB的活性,基于短程硝化的厌氧氨氧化工艺依然难以维持稳定, Jin等^[48]以短程硝化耦合厌氧氨氧化工艺处理城市生活污水,发现若未根据进水水质波动情况及时调控会导致整个系统崩溃。因此如何通过控制反应条件来保持短程硝化反硝化、厌氧氨氧化的稳定性以及如何形成并稳定运行以短程硝化-厌氧氨氧化等脱氮途径的耦合工艺,是未来污水处理厂可持续高效

脱氮所面临的挑战之一。

近年来,随着厌氧氨氧化研究的不断深入,反硝化过程中NO₂⁻积累现象得到了新的认识。在实验室规模污水处理系统中,有研究者发现污泥发酵耦合反硝化系统的活性污泥NO₃⁻仅还原为NO₂⁻的转化率高达80%,且在长达108 d的运行中,高NO₂⁻的积累特性能够保持稳定,从而证明了该过程为Anammox提供底物的可行性^[49]。仅以NO₂⁻为终产物的这一过程被称为“短程反硝化”。长期以来,Anammox工艺在城市污水处理中推广应用面临着NO₂⁻稳定获取的难题,短程反硝化的提出为此提供了新的解决方法。与传统硝化-反硝化工艺相比,短程反硝化-厌氧氨氧化工艺理论上可节省50%的曝气量、80%的碳源量,并能降低污泥产量和温室气体排放^[50],是低碳氮比城市污水脱氮高效、稳定、易于调控的新技术,短程反硝化耦合厌氧氨氧化与传统硝化反硝化对比见图5。Du等^[51]采用该工艺处理实际生活污水(NH₄⁺-N平均质量浓度为57.87 mg/L, COD平均为176.02 mg/L),出水总氮质量浓度低于5 mg/L,去除率高达93.7%;此外,N₂O的产量也被大大降低,进一步说明该工艺具有温室气体减排的优势。此外,彭永臻等^[52]以中试规模的短程反硝化耦合厌氧氨氧化新技术来处理低氨氮城市污水,长期运行结果证明了其为城市污水厌氧氨氧化脱氮过程提供底物NO₂⁻的可行性。因此,短程反硝化耦合厌氧氨氧化技术有望在实际规模污水处理厂中推广与应用,实现低氨氮浓度城市污水深度处理。可以预见,在未来相当长一段时间内,将会有更多的污水处理厂实地展开试验和应用,以实现主流厌氧氨氧化。现有主要可持续脱氮技术比较分析详见表2。

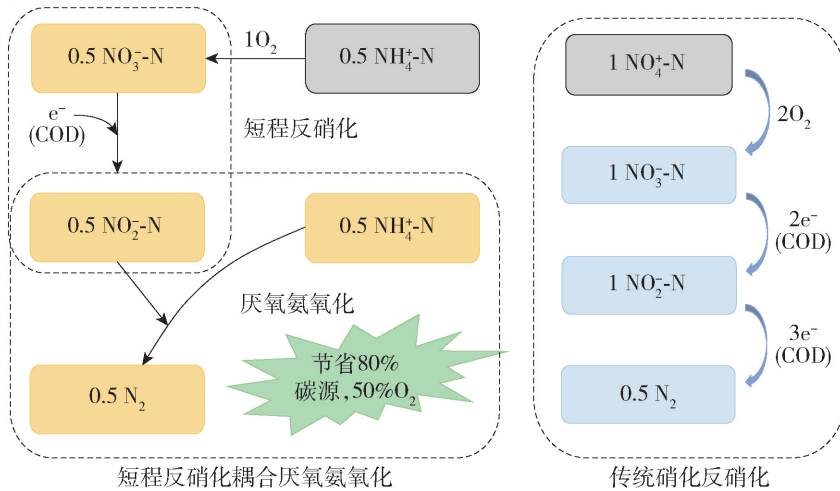


图5 短程反硝化耦合厌氧氨氧化与传统硝化/反硝化脱氮途径

Fig.5 Partial denitrification coupled with Anammox and traditional nitrification/denitrification

表2 可持续脱氮技术比较

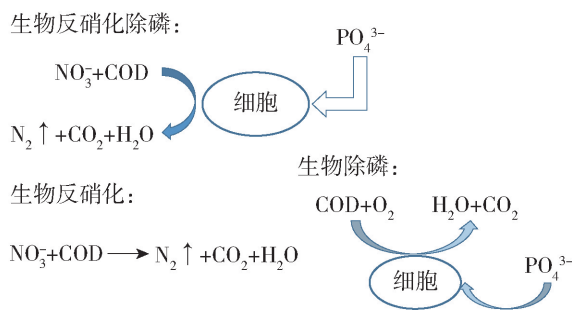
Table 2 Comparison of sustainable nitrogen removal technologies

技术方法	原理	优点	缺点	应用现状	参考文献
短程硝化反硝化	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$	节省氧气、碳源和碱度,产泥少;且反硝化速率更快,减少系统的HRT	对菌种要求较高,需先进行菌种富集,且对氧环境有较高要求;受温度影响较大	多用于处理垃圾渗滤液等低碳氮比、高氨氮有机废水	[42]
短程硝化-厌氧氨氧化	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2$	能耗低、碳源需求量少、产泥少、温室气体排放少和节约曝气量	低氨氮城市污水中难以维持稳定的短程硝化过程;受温度影响较大;厌氧氨氧化菌大规模保留富集难	多用于处理高氨氮、低碳氮比的有机废水;适合以侧流形式运用在城市污水厂	[44-45]
短程反硝化-厌氧氨氧化	$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2$	能耗低、碳源需求量少、产泥少、温室气体排放少;低氮素浓度和低温条件下, NO_2^- 积累率仍较高	对环境要求较为严苛,受有机物浓度、盐度、溶解氧、酸碱度等因素影响;厌氧氨氧化菌大规模保留富集难	多用于处理高氨氮有机废水;在主流城市污水的深度脱氮处理领域具有发展潜力	[50]

2.2.2.2 反硝化除磷工艺

反硝化除磷利用兼性反硝化聚磷菌(denitrifying phosphorus removing bacteria, DPB)将传统意义上彼此独立的脱氮除磷过程有机结合在一起,实现了同步脱氮除磷^[53]。在反硝化除磷过程中,细胞中的储能物质PHA不仅是反硝化脱氮的碳源,也是过量吸磷的碳源^[54],达到了“一碳两用”的目的。因此,与传统的脱氮除磷方法相比(两者对比详见图6),反硝化除磷工艺可以节省约50%的COD和30%的 O_2 ^[55],相应减少50%的剩余污泥量。目前单污泥系统的代表性工艺——BCFS工艺^[56],已应用于工程实践当中。郝晓地等^[57]以荷兰某污水处理厂为例,通过数学模拟技术进行对污水处理过程中耗能和产能潜力情况进行分析,结果表明BCFS工艺中反硝化聚磷菌在同步脱氮除磷过程中能够节约53%~59%的COD,增加 CH_4 产量154%~274%,使得能量以及曝气量等能耗相应减少104%~119%,且降低16%~21%的 CO_2 排放量^[57]。常飞^[58]采用BCFS工艺进行中试研究,以南京某污水处理厂初沉池出水为实验进水,发现反硝化除磷率均在75%以上,平均达78.9%,并且在大幅度提高出水水质的同时,也适当地降低了处理能耗。但因硝化菌、聚磷菌、反硝化菌种共存于同一活性污泥中,不可避免地存在不同功能菌群间的生境矛盾,使得反硝化除磷效率难以大幅度提高^[59]。

A^2/N 运用了短程硝化理论和双污泥的概念,采用两段活性污泥系统,将硝化菌和PAOS/DPB分别

图6 反硝化除磷与传统反硝化和除磷过程^[55]Fig. 6 Denitrification phosphorus removal and traditional denitrification and phosphorus removal process^[55]

放入不用的污泥系统进行培养,克服了传统脱氮除磷过程中不同功能菌群的生境矛盾,进一步提高了废水脱氮除磷的效率和系统的稳定性^[60]。彭永臻团队提出可利用 NO_2^- 为电子受体完成反硝化除磷,将氨氮氧化控制在 NO_2^- 阶段,实现短程硝化反硝化聚磷,进一步节省了曝气量和碳源^[61]。李微等^[62]采用双污泥短程硝化-反硝化除磷工艺 A^2/N -SBR处理实际生活污水,结果表明稳定运行的 A^2/N -SBR工艺对低 $\rho(\text{C})/\rho(\text{N})$ 的实际生活污水仍具有稳定的脱氮除磷效果,对氮和磷的去除率分别达到83.87%和83.55%。近年来,随着对反硝化除磷理论研究的不断深入,不断涌现出如同步硝化反硝化除磷、反硝化除磷耦合厌氧氨氧化、反硝化除磷与MBR工艺的耦合等新型工艺类型。卞晓峥等^[63]将 A^2/N -SBR与MBR相结合,采用交替厌氧/缺氧-双

膜反硝化除磷工艺(A²/N-DMBR),经过162个周期的启动试验,成功富集了反硝化聚磷菌,获得了稳定的COD、氨氮及总磷去除效果.当进水总磷质量浓度为6.4 mg/L、氮磷比为8.8时,交替式A₂N-DMBR工艺出水总磷为0.8 mg/L,总氮为12 mg/L,均达到国家污水排放一级A标准,但对反硝化脱氮除磷新工艺的研究目前尚处于实验室阶段,后续应结合现有的城市污水厂处理工艺,在现有污水处理厂基础上研发对原水厂改造少、费用低、可实际运行的新工艺.

3 国内外污水厂中碳中和运行技术应用实例

3.1 美国希博伊根(Sheboygan)污水处理厂

美国污水处理厂年能耗占社会总能耗的3%,是耗能最大的公共设施^[15].为了实现污水处理能源自给自足、资源可持续利用等目标,美国水环境研

究基金(Water Environment Research Foundation, WERF)表明,至2030年美国全部污水处理厂均须实现碳中和运行^[64].美国希博伊根污水厂率先开始了碳中和运行的实践,通过开源和节流的双重举措进行了一系列的节能改造,为其他污水处理厂提供了宝贵经验.

希博伊根污水厂建于1982年,最初采用传统活性污泥法工艺.后为实现脱氮除磷,在原有活性污泥法的基础上增加了生物营养物去除(biological nutrient removal, BNR)单元.为达到污水处理可持续性和能源独立的目标,该水厂后来又进行了一系列的节能降耗改造,形成了以A/O法为主流工艺,并结合剩余污泥水解-酸化、混合基质厌氧共消化、污泥浓缩等工艺为一体的工艺^[64],具体工艺流程见图7.

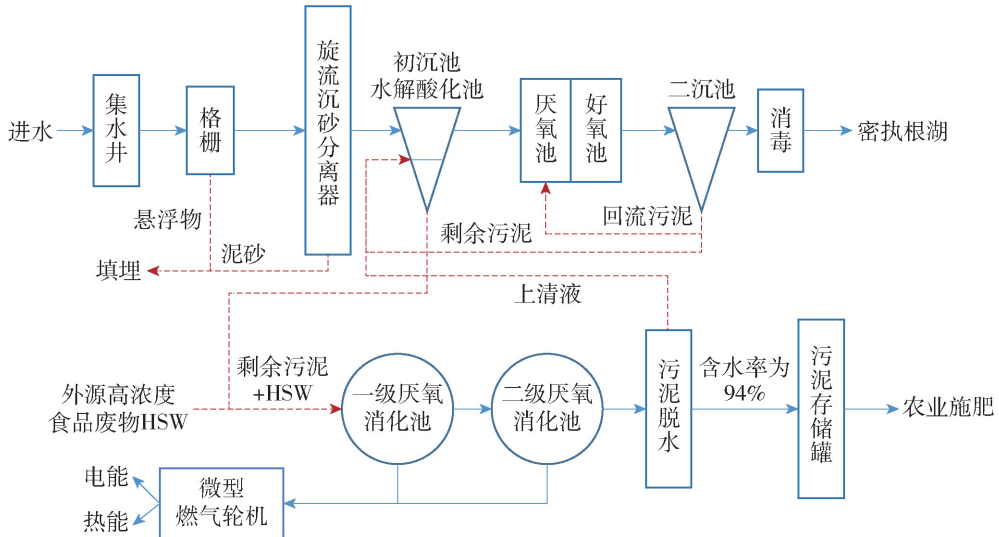


图7 希博伊根污水处理厂工艺流程^[64]

Fig. 7 Process of Sheboygan wastewater treatment plant^[64]

基于“威斯康辛聚焦能源”项目“能源零消耗”的运行目标和实施计划,希博伊根污水处理厂于2002—2011年间,开展了一系列的能源回收计划,增设12台30 kW微型燃气轮机和4台热回收处理设备,到2012年,该厂可利用热电联产技术产电16 800 kW·h/d、产热16 120 kW·h/d,约能抵消污水厂耗电量的90%、需热量的85%,基本上实现了能源自给自足^[64].

此外,该污水厂自筹资金近110万美元,进行了一系列节能升级改造和运行优化,更新了水泵、鼓风机等机械设备,更新后分别节能20%和13%,并安装气流控制阀(节能17%),更新消化池加热设备,升级智能控制系统(programmable logic controller,

PLC)、监视控制和数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)等,大大降低了能耗.到2013年希博伊根污水处理厂已实现了产电量与耗电量比值达90%~115%、产热量与耗热量比值达85%~90%,基本接近碳中和运行目标.希博伊根污水处理厂的工艺十分值得国内污水处理厂借鉴,对于污泥的能源化处理不但可以有效缓解我国污泥处置困难的状况,还可以缓解化石能源消耗的压力,使得对环境的影响大大减少.

3.2 芬兰Kakolanmäki污水处理厂

Kakolanmäki污水处理厂于2009年1月1日建成并投入运行,其位于芬兰重要工业基地图尔库市,该市计划至2029年全面实现碳中和目标,不断提高

可再生能源使用比例。Kakolanmäki 污水处理厂将能源利用和热能回收有效结合,成功转型为“能源工厂”,其能源利用方式可让图尔库市的可再生能源供热比例从 22% 提高至 30%^[65]。

Kakolanmäki 污水处理厂采用传统活性污泥法 A/O 工艺,剩余污泥随 O 段排出,进入初沉池,将初沉池作为 AB 法的 A 段,吸附部分溶解或胶体状 COD,与初沉污泥混合一并排出,通过无害化处理、堆肥、厌氧发酵等环节产生沼气进行热电联产用于该地区供暖/制冷和电力,部分处理后的污泥被加工为肥料制剂或用作土地改良剂,工艺流程见图 8。经核

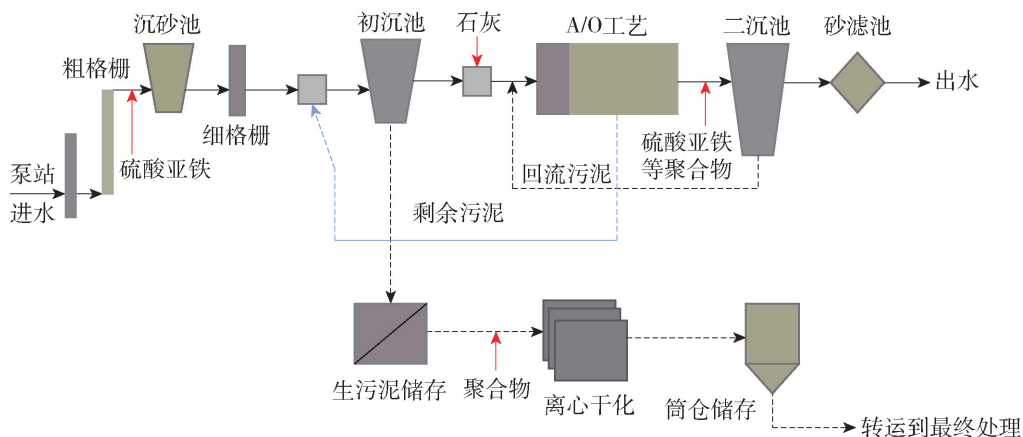


图 8 Kakolanmäki 污水处理厂工艺流程

Fig. 8 Process of Kakolanmäki wastewater treatment plant

经测算,Kakolanmäki 污水处理厂平均耗电总量为 35.23 GW·h/a,而通过热电联产和回收余热热能等方式回收能源的总量(热能+电能)高达 225.58 GW·h/a,在运行能耗的 6 倍之上^[65]。其中,回收的余热热能为产生能量的主要来源,占全部产能的比例高达 90%,由于余热热能的回收利用,该厂不仅实现了能源中和,还使得碳中和率高达 333%^[66]。Kakolanmäki 污水处理厂的工艺十分值得国内污水处理厂借鉴。经核算,北京高碑店污水处理厂的理论潜热为 Kakolanmäki 污水处理厂的 8 倍^[66],由此看来,国内污水处理厂具有很大的余热热能回收潜力,我国应充分意识到污水余热热能回收利用的重要性,重点推广污水源热泵技术或其他合理的热能利用方式,并协调政府部门与其他行业的运营,使污水处理厂实现能源回收利用及碳中和运行。

3.3 国内污水处理厂面向碳中和的探索及初步成效

美国、芬兰、奥地利等国家通过一系列开源和节流等措施,在能源回收、水资源再生等方面取得了一定成效,不断出现碳中和成功应用的案例,我国的污水处理厂也充分借鉴其成功经验,不断践行国际上

算,该厂污泥产沼气加 CHP 过程产生的能量(21.9 GW·h/a)足够满足污泥处理加热、搅拌及运输等过程的能源消耗量(14.2 GW·h/a),且有 7.7 GW·h/a 的能量盈余可以另作他用,同时实现了资源、能源回收和污泥稳定化、减量化的目标。此外,Kakolanmäki 污水处理厂采用污水源热泵技术,以该厂二级出水为热源回收污水余热热能,每年的制热输出量高达 2 000 多万 kW·h,能为当地近 15 000 户家庭进行供暖(占图尔库市供热量的 14%),制冷输出量为 200 万 kW·h,能够满足图尔库市 90% 的制冷需求,每年可为该市减少 8 万 t 的碳排放^[3]。

低碳绿色发展的先进理念,集中应用已经或即将工业化的全球先进污水处理技术,朝着资源化、能源化、低碳化的方向发展。

睢县第三污水处理厂是中国首座按照概念厂“水质永续、资源循环、能量回收、环境友好”4 个追求建造的污水处理概念厂。概念厂采用高温干式厌氧发酵技术,协同处理污泥、畜禽粪便、秸秆及水草,既解决了困扰污水厂污泥处置利用问题,又帮助当地政府解决了畜禽粪便的点源污染难题,且有效回收了有机废弃物中的生物质能。产生的清洁能源(沼气)可通过热电联产技术对厂区进行供电和供热,产生的电量已可满足厂区 20%~30% 的能耗^[67]。虽然仅实现了 20%~30% 的碳减排,但相比我国传统污水厂,已经取得了较大突破,对国内污水处理碳中和事业的发展也起到了推动作用。目前,江苏宜兴市正在兴建概念厂 2.0 版本,预期能量自给率可达到 85%^[68]。北京排水集团也于 2021 年 7 月份发布了碳中和规划与实施方案,计划到 2050 年,实现近零碳排放。并计划从提高新能源和可再生能源的消费量以及降低能源消耗强度两方面入

手,逐步实现新能源和可再生能源比重从2020年的6%提高到2050年的80%以上,处理每立方米污水电耗较2020年下降10%以上,逐步向国际领先水平迈进^[69]。

4 结语及展望

随着碳中和目标的推进,未来污水处理应以节能降耗及能源资源回收为目标,在污水处理过程中应不断开创和完善低碳运行技术手段,以不断接近碳中和的目标。

1) 在宏观运行层面,污水处理厂的低碳运行可以从曝气系统改造、合理回流、精准适量投药等节能措施入手,例如可采用高效节能的空气悬浮和磁悬浮鼓风机、精细化智能控制系统、水质水量在线监测技术,从而实现精准曝气,合理控制回流,最终降低污水处理能耗。

2) 在微观机理层面,应积极研发并应用将剩余污泥转化为能源的适用性技术以及具有“低碳”潜能的工艺,并开发像风能、太阳能等可再生能源。例如,可采用短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、短程反硝化耦合厌氧氨氧化、反硝化除磷等低碳工艺实现氮磷的去除,通过厌氧消化-热电联产、污水热源泵、太阳能板发电等形式来开发污水潜能,从而实现污水厂“能源自给自足”。

3) 我国未来的污水处理厂也应充分借鉴国内外污水处理厂碳中和应用成功的经验,以利用污水中有机潜能和研发低碳新工艺为核心,以提高设备能效、优化工艺运行方式为手段,实现污水处理低碳运行,直至最后达到或接近碳中和的终极目标。

参考文献:

[1] 任佳雪,高庆先,陈海涛,等. 碳中和愿景下的污水处理厂温室气体排放情景模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 410-419.
REN J X, GAO Q X, CHEN H T, et al. Simulation research on greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants under the vision of carbon neutrality[J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 410-419. (in Chinese)

[2] 金雅宁. “碳中和”的概念及影响[J]. 世界环境, 2021(1): 23-25.
JIN Y N. The concept of “carbon neutrality” and its implications[J]. World Environment, 2021(1): 23-25. (in Chinese)

[3] 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.

CHANG J W, JING Y Y, GENG Y, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality [J]. China Environmental Protection Industry, 2021(6): 9-17. (in Chinese)

- [4] YOSHIDA H, MONSTER J, SCHEUTZ C. Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2014, 61: 108-118.
- [5] 程良凤,张婧,颜康康. 污水处理过程中的“碳中和”技术[J]. 江西化工, 2017(2): 225-227.
CHENG G F, ZHANG J, YAN K K. The technology of “carbon neutral” in the sewage treatment [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2017(2): 225-227. (in Chinese)
- [6] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径——碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 43-52.
LIU Z X. Carbon capture and carbon redirection: new way to optimize the energy self-sufficient of wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 43-52. (in Chinese)
- [7] 蔡俊. 有关污水处理碳中和运行的研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(24): 4704.
CAI J. Study on carbon neutral operation of wastewater treatment [J]. Architectural Engineering Technology Design, 2017(24): 4704. (in Chinese)
- [8] SCHAUM C, LENSCH D, BOLLE P Y, et al. Sewage sludge treatment: evaluation of the energy potential and methane emissions with COD balancing [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2015, 5(4): 437-445.
- [9] 王丽艳,张靳超. 城市污水处理中的二氧化碳排放与碳资源化利用研究[J]. 绿色科技, 2012(6): 198-200.
WANG L Y, ZHANG J C. Study on carbon dioxide emission and carbon resource utilization in urban sewage treatment[J]. Journal of Green Science and Technology, 2012(6): 198-200. (in Chinese)
- [10] KHIEWWIJIT R, TEMMINK H, RIJNAARTS H, et al. Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: how to design a feasible plant layout? [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 68: 156-165.
- [11] 岳治杰. 污水生物处理工艺中低碳运行技术的浅析[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(4): 8-11.
YUE Z J. Analysis on low-carbon operation technology in biological wastewater treatment process [J]. Environmental Science and Management. 2013, 38(4): 8-11. (in Chinese)

- [12] 郝晓地, 金铭, 胡沅胜. 荷兰未来污水处理新框架——NEWs 及其实践[J]. 中国给水排水, 2014, 30(20): 7-15.
HAO X D, JIN M, HU Y S. Framework of future wastewater treatment in the Netherlands: NEWs and their practices [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(20): 7-15. (in Chinese)
- [13] 杨博, 杨长军. 城市污水处理厂的节能降耗[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(4): 148-151.
YANG B, YANG C J. Energy saving and consumption reduction in municipal sewage treatment plants [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(4): 148-151. (in Chinese)
- [14] 于洪波, 高佳. 空气悬浮风机在城镇污水处理中的应用[J]. 冶金管理, 2020(13): 144-145.
YU H B, GAO J. Application of air suspension fan in urban sewage treatment [J]. Metallurgical Industry Management, 2020(13): 144-145. (in Chinese)
- [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.
SONG X X, LIN J, LIU J, et al. The current situation and engineering practice of sewage treatment technology facing the future [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 39-53. (in Chinese)
- [16] 阮永兴. 磁悬浮鼓风机与传统风机在污水处理行业的对比应用研究[J]. 科学技术创新, 2018(19): 16-18.
RUAN Y X. Comparative application study of magnetic levitation blower and traditional blower in sewage treatment industry [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(19): 16-18. (in Chinese)
- [17] 谢荣焕, 梁文逵, 刘爱辉, 等. 空气悬浮风机在污水厂节能降耗中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(15): 108-110.
XIE R H, LIANG W K, LIU A H, et al. Application of turbo blower to energy saving and consumption reducing in WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 108-110. (in Chinese)
- [18] 赵剑文. 精确曝气技术在污水处理中的研究进展及应用[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(7): 186-188.
ZHAO J W. Research progress and application of precision aeration technology in wastewater treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(7): 186-188. (in Chinese)
- [19] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34.
DAI X H. Current status and development trend of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34. (in Chinese)
- [20] DING A, ZHANG R, NGO H H, et al. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144451.
- [21] 郝晓地, 赵义, 仇付国, 等. 从微观机理认识污水处理厂的节能减排[J]. 中国给水排水, 2008, 24(4): 89-94.
HAO X D, ZHAO Y, QIU F G, et al. Understanding energy saving and emission reduction in WWTPs from microcosmic mechanism [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(4): 89-94. (in Chinese)
- [22] 栗志翔. 市政污泥的处置及资源化利用综述[J]. 科技风, 2021(7): 121-122.
LI Z X. Summary of disposal and resource utilization of municipal sludge [J]. Technology Wind, 2021(7): 121-122. (in Chinese)
- [23] HAO X, LIU R, HUANG X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. Water Research, 2015, 87: 424-431.
- [24] 苏书宇, 郭靖东. 污水厂碳中和运行潜力及能源利用技术[J]. 科技风, 2018(22): 107.
SU S Y, GUO J D. Carbon neutral operation potential and energy utilization technology of sewage treatment plant [J]. Technology Wind, 2018(22): 107. (in Chinese)
- [25] 黄惠莹. 国内剩余污泥厌氧消化强化处理研究进展[J]. 中国沼气, 2018, 36(4): 29-32.
HUANG H Y. Research progress on strengthening anaerobic digestion of excess sludge [J]. China Biogas, 2018, 36(4): 29-32. (in Chinese)
- [26] 冯凯. 北京高碑店再生水处理厂升级改造工艺方案设计[J]. 给水排水, 2012, 48(12): 35-39.
FENG K. Upgrading and reconstruction process design for the Gaobeidian reclaimed water treatment plant in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2012, 48(12): 35-39. (in Chinese)
- [27] 刘议安, 田宇, 马迁, 等. 北京市高安屯污泥处理中心工程设计及优化[J]. 给水排水, 2018, 54(8): 38-41.
LIU Y A, TIAN Y, MA Q, et al. Engineering design and optimization of Gaoantun sludge treatment center in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2018, 54(8): 38-41. (in Chinese)
- [28] 陈小华. 污泥和餐厨垃圾协同处理工程厌氧消化系统的启动调试[J]. 净水技术, 2018, 37(6): 86-90.
CHEN X H. Start-up and commissioning test of anaerobic digestion system for co-digestion project of kitchen waste

- and sewage sludge disposal [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(6): 86-90. (in Chinese)
- [29] 刘常青,陈娜蓉,郑育毅,等. 污泥厌氧发酵产氢研究进展[J]. *海峡科学*, 2012(4): 3-6.
LIU C Q, CHEN N R, ZHENG Y Y, et al. Research progress on hydrogen production by anaerobic fermentation of sludge [J]. *Traits Science*, 2012(4): 3-6. (in Chinese)
- [30] HAO X, BATSTONE D, GUEST J S. Carbon neutrality: an ultimate goal towards sustainable wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2015, 87: 413-415.
- [31] HAO X, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74-77.
- [32] FRIJNS J, HOFMAN J, NEDERLOF M. The potential of (waste) water as energy carrier[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65: 357-363.
- [33] 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.
HAO X D, YE J Z, LI J, et al. Status and potential applications of thermal energy from wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 15-22. (in Chinese)
- [34] 尹军. 城市污水中的热能回收与利用[J]. *中国给水排水*, 1998, 14(2): 53-54.
YIN J. Recovery and utilization of heat energy in municipal sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 1998, 14(2): 53-54. (in Chinese)
- [35] 尹朝辉,刘芳,王志明,等. 污水处理厂典型节能技术分析[J]. *建筑科学*, 2016, 32(12): 107-113.
YIN Z H, LIU F, WANG Z M, et al. Analysis of typical energy-saving technology in sewage treatment plants[J]. *Building Science*, 2016, 32(12): 107-113. (in Chinese)
- [36] HAO X, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74-77.
- [37] 别晓群. 污水处理中节能环保技术的应用探讨[J]. *资源节约与环保*, 2015(9): 32.
BIE X Q. Discussion on the application of energy saving and environmental protection technology in sewage treatment [J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2015(9): 32. (in Chinese)
- [38] 孙集平. 城市污水中的热能回收及利用研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2009, 29(4): 38-40.
SUN J P. Study on heat energy recovery and utilization in urban sewage [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2009, 29(4): 38-40. (in Chinese)
- [39] 周志平,李念平. 污水源热泵系统应用的节能减排分析[J]. *建筑节能*, 2012, 40(6): 46-49.
ZHOU Z P, LI N P. Energy conservation and emissions reduction of sewage source heat pump system [J]. *Building Energy Conservation*, 2012, 40(6): 46-49. (in Chinese)
- [40] GU Y, LI Y, LI X, et al. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants [J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1463-1475.
- [41] 马宁,廖日红,王培京,等. 未来城市污水处理厂关键技术进展与发展趋势展望 [C] // 北京水问题研究与实践(2018年). 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 8.
MA N, LIAO R H, WANG P J, et al. Future progress and development trend of key technologies in urban sewage treatment plants [C] // *Beijing Water Problem Research and Practice (2018)*. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2019: 8. (in Chinese)
- [42] XIAO J, TANG J H. Nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 908: 175-178.
- [43] WETT B. Development and implementation of a robust deammonification process [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(7): 81-88.
- [44] MA B, WANG S, CAO S, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 981-990.
- [45] 陈重军,王建芳,张海芹,等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 521-527.
CHEN C J, WANG J F, ZAHNG H Q, et al. Research progress in anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 521-527. (in Chinese)
- [46] 赵晴,刘梦莹,吕慧,等. 耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 4195-4201.
ZHAO Q, LIU M Y, LÜ H, et al. Setup and microbial community analysis of anammox system for landfill leachate treatment coupling partial nitrification-denitrification process [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4195-4201. (in Chinese)
- [47] 马斌. 城市污水连续流短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺与技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
MA B. Nitritation and anammox achieved in continuous reactors treating sewage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

- [48] JIN P, LI B, MU D, et al. High-efficient nitrogen removal from municipal wastewater via two-stage nitrification/anammox process: long-term stability assessment and mechanism analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 150-158.
- [49] CAO S, WANG S, PENG Y, et al. Achieving partial denitrification with sludge fermentation liquid as carbon source: the effect of seeding sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149: 570-574.
- [50] 陈俊江, 张星星, 王超超, 等. 新型短程反硝化耦合厌氧氨氧化工艺研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(4): 54-63.
CHEN J J, ZHANG X X, WANG C C, et al. Research advances of novel partial denitrification coupled with anammox: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(4): 54-63. (in Chinese)
- [51] DU R, CAO S, ZHANG H, et al. Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: advances in enhancing process stability[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6353-6364.
- [52] 彭永臻, 范泽里, 杜睿, 等. 为耦合厌氧氨氧化产生 NO_2^- 的城市污水中试研究[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(4): 329-337.
PENG Y Z, FAN Z L, DU R, et al. Pilot-scale study on producing NO_2^- for anammox with municipal wastewater [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(4): 329-337. (in Chinese)
- [53] QIN Z J, QIU L P, ZHANG S B, et al. Enrichment of denitrifying phosphate-accumulating organisms in nitrogen and phosphorus removal process[C]//Proceedings of the 2015 4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering. Berlin: Springer, 2016, 53: 492-495.
- [54] XIAO J N, ZHENG L N, ZHENG L, et al. Discussion of the simultaneous nitrogen and phosphorus removal mechanism [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726/727/728/729/730/731: 2156-2159.
- [55] 郝晓地, 涂明, 蔡正清, 等. 污水处理低碳运行策略与技术导向[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(24): 1-6.
HAO X D, TU M, CAI Z Q, et al. Strategies and technical orientation for low carbon operation in wastewater treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(24): 1-6. (in Chinese)
- [56] 操家顺, 杨雪冬, MARK Van Loosdrecht. BCFS——生物除磷新工艺[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(3): 23-26.
CAO J S, YANG X D, VAN LOOSDRECHT M. BCFS—a new biological phosphorus removal process [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(3): 23-26. (in Chinese)
- [57] 郝晓地, 张璐平, 胡沅胜, 等. 侧流化学磷回收强化生物除磷的模拟预测与试验验证[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(11): 2274-2281.
HAO X D, ZHANG L P, HU Y S, et al. Modeling prediction and experimental verification of enhancing bio-phosphorus removal by chemical precipitation of anaerobic digester supernatant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(11): 2274-2281. (in Chinese)
- [58] 常飞. BCFS工艺处理城市污水中试试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
CHANG F. Study on municipal wastewater by BCFS in pilot plant [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [59] 张肖静, 高健磊, 刘杨. 反硝化除磷工艺原理及研究进展[J]. *科技信息*, 2010(24): 428-429.
ZHANG X J, GAO J L, LIU Y. Principle and progress of denitrifying phosphorus removal process [J]. *Science and Technology Information*, 2010(24): 428-429. (in Chinese)
- [60] 赵丹, 任南琪, 陈坚, 等. 生物除磷技术新工艺及其微生物学原理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(11): 1460-1462.
ZHAO D, REN N Q, CHEN J, et al. Research progress and microbiology principle on biological N and P removal [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(11): 1460-1462. (in Chinese)
- [61] 谢新立, 伍健伯. 污水反硝化脱氮除磷新工艺研究进展[J]. *供水技术*, 2021, 15(1): 41-45.
XIE X L, WU J B. Research progress of new technology of wastewater denitrification and phosphorus removal [J]. *Water Technology*, 2021, 15(1): 41-45. (in Chinese)
- [62] 李微, 刘静, 孟海婷, 等. A^2/N -SBR工艺短程反硝化除磷脱氮研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(8): 62-67.
LI W, LIU J, MENG H T, et al. Shortcut denitrifying phosphorus removal in A^2/N -SBR process [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(8): 62-67. (in Chinese)
- [63] 卞晓峥, 闫阁, 黄健平, 等. 双污泥系统反硝化除磷新工艺研究进展[J]. *水处理技术*, 2021, 47(7): 19-24.
BIAN X Z, YAN G, HUANG J P, et al. Progress of new process of two-sludge denitrification phosphorus removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(7): 19-24. (in Chinese)
- [64] 郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例——Sheboygan污水处理厂[J]. *中国给水排水*,

2014, 30(24): 1-6.

HAO X D, WEI J, CAO Y L. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(24): 1-6. (in Chinese)

- [65] 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算: 以芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂为例[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(9): 2849-2857.

HAO X D, ZHAO Z C, LI J, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(9): 2849-2857. (in Chinese)

- [66] 郝晓地, 张益宁, 李季, 等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(20): 1-8.

HAO X D, ZHANG Y N, LI J, et al. Case analysis of

energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 1-8. (in Chinese)

- [67] 中国水网. 面向未来: 中持股份睢县第三污水处理厂初探(上) [EB/OL]. (2019-09-06) [2021-09-19]. <https://www.h2o-china.com/news/296068.html>.

- [68] 新浪网. 任洪强: 浅析碳中和背景下水污染防治产业的发展[EB/OL]. (2021-08-03)[2021-09-19]. http://k.sina.com.cn/article_3233134660_c0b5b8440200_0xbxs.html.

- [69] 腾讯网. 中国污水处理行业首家! 北排发布碳中和规划与实施方案[EB/OL]. (2021-07-30)[2021-09-19]. <https://new.qq.com/omn/20210730/20210730A09F8400.html>.

(责任编辑 张 蕾)

(上接第 272 页)

- [46] HOD I, SAMPSON M D, DERIA P, et al. Fe-porphyrin-based metal-organic framework films as high-surface concentration, heterogeneous catalysts for electrochemical reduction of CO₂ [J]. *ACS Catalysis*, 2015, 5(11): 6302-6309.

- [47] YI J, XIE R, XIE Z, et al. Highly selective CO₂ electroreduction to CH₄ by In Situ generated Cu₂O single-type sites on a conductive MOF: stabilizing key intermediates with hydrogen bonding [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59: 23641-23648.

- [48] TAN X, YU C, ZHAO C, et al. Restructuring of Cu₂O to Cu₂O@Cu-metal-organic frameworks for selective electrochemical reduction of CO₂ [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11: 9904.

- [49] GUNTERN Y T, PANKHURST J R, MENSI M, et al.

Nanocrystal/metal-organic framework hybrids as electrocatalytic platforms for CO₂ conversion [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58: 12632-12639.

- [50] ZHANG Y, JIAO L, YANG W, et al. Rational fabrication of low-coordinate single-atom Ni electrocatalysts by MOFs for highly selective CO₂ reduction [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(14): 7607-7611.

- [51] YUAN W, WU J, ZHANG X, et al. In-situ transformation of bismuth metal-organic frameworks for efficiently selective electroreduction of CO₂ to formate [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8: 24486.

(责任编辑 张 蕾)