



碳中和视角下污水处理现状与展望

蒋 彬^{1,2}, 刘中亚¹, 陈 垚^{1,2}, 袁绍春^{1,2}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074)

[摘要] 碳中和背景下, 污水处理厂不仅要实现水资源的可持续性, 还要实现碳减排。若在污水处理过程中对污水中潜在的化学能和热能进行回收利用, 则可弥补污水处理厂运行中的能量损耗, 甚至达到碳中和的目标。为探明污水处理厂实现碳中和的可行性, 通过对国内外污水处理厂实现碳中和案例的解读分析, 总结了实现碳中和目标的实施途径和主要减排工艺, 并提出了碳中和视角下我国未来污水处理厂所面临的技术挑战和研究方向。

[关键词] 污水处理厂; 碳中和; 资源回收; 能量利用; 碳排放

[中图分类号] X703.1; TU992.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0051-08

Current situation and prospect of wastewater treatment under the perspective of carbon neutralization

JIANG Bin^{1,2}, LIU Zhongya¹, CHEN Yao^{1,2}, YUAN Shaochun^{1,2}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Under the background of carbon neutrality, sewage treatment plants are required not only to achieve the sustainability of water resources, but also to achieve carbon emission reduction. If the potential chemical energy and heat energy in sewage are recycled in the process of sewage treatment, it can make up for the energy loss in the operation of sewage treatment plant, and even achieve the goal of carbon neutralization. In order to find out the feasibility of carbon neutralization in sewage treatment plants, through the interpretation and analysis of the cases of carbon neutralization in domestic and foreign sewage treatment plants, the implementation approaches and main emission reduction processes for achieving the goal of carbon neutralization were summarized, and the technical challenges and future research directions for future sewage treatment plants in China from the perspective of carbon neutralization were put forward.

Key words: sewage treatment plant; carbon neutrality; resource recovery; energy utilization; carbon emission

21 世纪以来, 全球气候变暖问题日趋严重, 亟需控制碳排放水平。《巴黎协定》的签订标志着全球控制碳排放进入一体化进程, 各国为实现碳减排目标进行了积极探索。2020 年, 中国承诺将于 2030 年达到碳达峰, 并在 2060 年实现碳中和目标。为实现这一承诺, 我国各行业开始密切关注 CO₂ 的排放量, 并将实现碳中和作为行业发展的最终目标。据研究报道, 污水处理行业的碳排放量占我国社会总碳排

放量的 1%~2%^[1], 因此污水处理过程中产生的碳排放量不容忽视。虽然污水处理过程中实现了水资源的可持续利用, 但也存在将污染从水中转移至大气中的嫌疑。未来污水处理厂若能将污水处理过程中的化学能和余温热能加以利用, 便能弥补污水处理厂运行过程中的能量赤字, 进而实现碳中和这一宏伟目标^[2-3]。为探明污水处理厂实现碳中和的可行性, 笔者通过对国外污水处理厂实现碳中和案例的

解读分析,总结了实现碳中和目标的实施途径和主要减排工艺,并提出了碳中和视角下我国未来污水处理厂所面临的技术挑战和未来研究方向,以期为我国污水处理厂实现碳中和目标提供技术参考。

1 污水处理厂碳中和文献可视化分析

为了解国内外污水厂碳中和研究进展,对中英文文献进行检索并进行关键词共线分析。英文文献来源于 Web of Science 数据库,检索词为: Theme=(carbon neutrality) or (carbon neutral) and (wastewater treatment plant),检索年份为 2010—2021 年,共检索到 790 篇英文文献。中文文献来源于中国知网 (CNKI) 数据库,检索词为: 主题=污水厂 and 碳中和,检索年份为 2010—2021 年,由于碳中和概念在中国提出较晚,共检索到 24 篇中文文献。污水厂实现碳中和的关键是实现资源和能量的回收利用,因此,在此基础上继续检索污水厂资源回收和能量利用的文献,将检索结果进行筛选,最终筛选出 104 篇中文文献。利用 VOSviewer 软件对文献关键词进行可视化分析,以圆圈的大小表示研究的热度,关键词之间的联系用曲线表示,不同颜色的关键词代表不同的聚类,每个聚类可表示一个研究方向。

中文文献聚类结果见图 1。

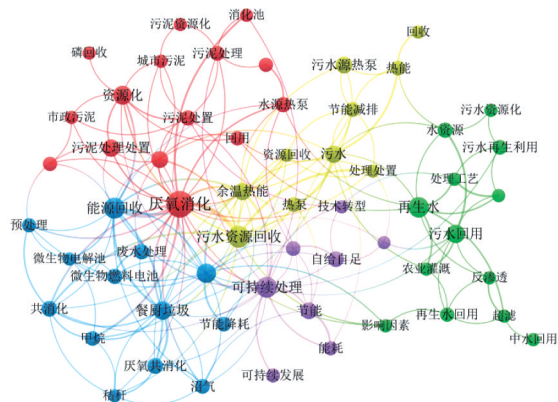


图 1 中文文献关键词聚类结果

Fig. 1 Clustering results of Chinese key words

如图 1 所示,蓝色为聚类 1,该聚类的核心内容为能源回收,提高资源的利用率可以弥补污水厂运行过程中的能量损耗,提高污水厂碳中和贡献率。红色为聚类 2,该聚类研究的核心内容为厌氧消化,厌氧消化产生的能量可有效反哺污水厂,大幅度地削减碳足迹,提高污水处理的可持续性。紫色为聚类 3,该聚类以可持续处理为核心,在蓝色经济的背

景下通过技术变革实现污水厂处理技术的转型,因地制宜地升级污水处理工艺,并结合多种形式对资源进行利用,进而达到能源自给自足的目标。黄色为聚类 4,该聚类为余温热能的利用,污水厂中余温热能的利用潜能不容小觑,对余温热能的利用可进一步帮助污水厂实现碳中和运行目标。绿色为聚类 5,该聚类为再生水的利用,污水中的资源和能量回收利用后,处理后的水可以再次回用于工业、灌溉、补给地下水等用途,这样既降低了成本,又满足了生态要求。

英文文献聚类结果见图 2。

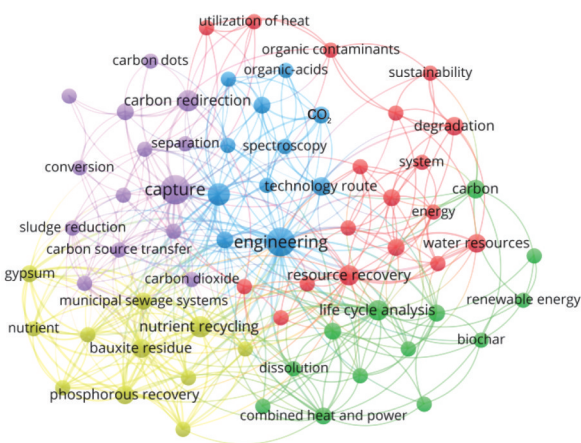


图 2 英文文献关键词聚类结果

Fig. 2 Clustering results of English key words

如图 2 所示,绿色为聚类 1,该聚类的核心内容为利用全生命周期对污水处理厂碳足迹进行评估 (Life cycle analysis, LCA), LCA 作为一个决策支持的工具,可用于评估污水处理厂在运行过程中的碳足迹;通过对比不同工艺在运行过程中能源使用 and 环境影响情况,评估不同工艺对碳中和的贡献率,为促进健康和可持续的污水处理行业建设提供有价值的参考。紫色为聚类 2,该聚类的核心内容为碳捕捉 (Carbon capture),实现能源自给自足甚至碳中和的需求是研究和开发新污水处理厂配置的主要驱动力,通过最大限度地捕获初级污泥中的碳源及碳源改向,可在实现能源化的同时充分开发有机化学能的潜力。蓝色为聚类 3,该聚类的核心是污水处理厂工程案例剖析 (Engineering),在碳中和背景下,一些发达国家提出的实现碳中和的技术路线,可为其他国家实现碳中和这一终极目标提供借鉴和参考。红色为聚类 4,该聚类的核心是资源回收 (Resource recovery),污水中富含的资源不容小觑,如果处理得

当,可回收二次利用;通过资源回收可将污水处理系统转化为低成本和环境可持续的水和资源回收设施。黄色为聚类5,该聚类的核心为营养物回收(Nutrient recycling),从污水中回收营养物质作为肥料可有效地节约能源和降低全球变暖潜能值;在全球不可再生资源匮乏的背景下,从污水中回收营养物质将是未来污水处理厂实现可持续发展的趋势。

2 国内外污水厂碳中和现状

2.1 国外污水厂碳中和现状

全球变暖的气候危机迫在眉睫,世界各国针对这一问题进行了积极探索。基于碳中和这一目标,各行业在降低能源消耗的同时,最大限度地减少环境负荷。可持续发展的需求正推动着污水处理的新发展,这些发展有两方面的驱动力:对工艺流程的改进和对资源的回收^[4]。实现污水厂碳中和,是未来污水厂可持续发展的目标^[5]。国际上已有一些国家走在碳中和的前列,并陆续发布实现污水厂碳中和的线路图,为世界污水处理的可持续发展提供了先进的经验。美国Sheboygan污水厂通过开源节流的运行策略实现了处理过程中能量的自给自足,作为美国污水厂运行的典范,该厂实现了产电量与耗电量比值超过90%、产热量与耗热量比值超过85%的佳绩^[6]。荷兰将污水厂实现碳中和定义为NEWs框架,即可持续污水处理实质上是营养物(Nutrient)、能源(Energy)与再生水(Water)的制造工厂(Factories)^[7],基于这一理念,荷兰将逐步实现碳中和目标。德国Steinhof污水厂充分利用污水中的氮、磷等资源并将处理后的水资源和污泥进行二次利用,该厂的总外源CO₂减少114%,已能超额完成碳中和目标^[8]。O. NOWAK等^[9]对奥地利Wolfgangsee-Ischl污水厂和Strass污水厂进行分析研究,结果表明,与能源需求相比,污水处理厂的发电能力可达180%,而将污水转换再生为冷却水作为区域暖气热泵的热源,可节省高达45%的电力。

2.2 我国污水厂碳中和现状

为应对未来水资源问题和碳排放问题,国外一些污水厂在资源回收和能量利用方面走在了世界前列,为我国污水厂实现碳中和提供了宝贵的经验。美国、荷兰和德国等国家的污水厂的先进案例说明,污水厂实现碳中和具有可行性,我国也应因地制宜地建设面向未来发展的新型污水厂。受限于水行业发展的技术水平等诸多因素的限制,我国尚未建成

真正意义上可实现碳中和的污水厂。相较于美国等发达国家,我国面向未来的可持续污水处理厂概念提出较晚,曲久辉院士于2014年提出“建设面向未来的中国污水处理概念厂”,未来污水处理厂的运行目标将会从污染物减少到水资源再利用、资源和能量回收和水生态修复转变^[10]。以资源为导向的污水处理逐渐成为全球水处理行业未来追求的主题,我国也将积极探索污水厂的发展路径,未来我国的新概念污水处理厂将在实现水质净化的基础上实现碳中和的目标^[11]。基于这一理念,我国已有一些污水厂开始探索污水处理新模式,河南商丘睢县污水厂可看作是国内面向未来污水厂的1.0版本;江苏宜兴新概念污水厂在1.0版本上进一步将污水厂建设为资源厂,开启新的建设理念,将传统污水处理厂建设成为面向未来的可持续发展污水处理厂。

3 碳中和实现途径及主要减排工艺

3.1 碳捕捉

污水作为一种能源载体,其潜能的发掘正引领着污水处理行业向新的方向发展。城市污水中的有机物是一种含能物质,据估计其含有的单位COD能量最低为13~14 kJ/g,这些富余的COD若不能在前端捕捉,在后续污水处理过程中则会被直接氧化为CO₂,这其实是一种以能耗能的方式。将碳捕捉纳入污水处理过程,便有望抵消能源投入并提高整体可持续性^[12]。污水厂碳中和的运行率与前端碳捕捉的量、厌氧消化效率呈现正相关,污水厂COD的捕捉率提高,则污水厂可获得更高的能源自给率^[13]。为提高污水厂碳捕捉效率、减少COD被氧化为CO₂的量,需利用高效碳源分离技术对有机碳源进行捕捉,还可通过提高pH、高温高压、超声等强化预处理手段来提高污泥厌氧消化效率。目前实现碳源捕捉的技术路线主要包括高负荷活性污泥工艺(HRAS)、化学强化一级处理(CEPT)以及精密筛分过滤工艺^[14-16]。与欧洲大多数国家市政污水进水水质相比,我国大多数污水厂的进水COD较低,这就限制了污水厂前端碳捕捉的应用。然而,有一种前端碳源分离的理念适用于我国,即在前端进行纤维素的回收。木质纤维素具有复杂性和顽固性,阻碍生物降解过程^[17];与丝状细菌一样,木质纤维素的某些“架桥”作用可能还会引起污泥膨胀。经过筛分后的纤维素具有很多用途,如可用于制造沥青添加

剂、土壤改良剂和生物复合材料等。

3.2 厌氧共消化

厌氧消化是污水厂实现剩余污泥稳定化和资源化的处理技术,可实现污水厂对污泥中自然资源的回收与可持续利用。污水厂设置厌氧消化装置,可在实现回收生物质能的基础上利用沼气为污水厂提供 40%~60% 的运行电耗^[18]。污泥厌氧消化的产能效率和污水厂进水 COD 之间关系密切,欧美一些国家的进水 COD 较高(600~1 000 mg/L),在实现碳中和运行目标中发挥着举足轻重的作用。对于 COD 仅为 200~400 mg/L 的污水处理厂,利用污泥厌氧消化产生的沼气仅可弥补污水厂 50%~60% 的能耗^[19]。因此,在污水厂实际运行中可选择 2 种及以上外源有机物与污水厂内剩余污泥进行厌氧共消化,提高污水厂有机负荷浓度和产耗比,进而最大限度地实现污水厂碳中和运行率。国外已有污水厂实现能源产耗平衡,甚至超额完成碳中和运行目标(表 1)。单独厌氧消化难以满足污水厂实现碳中和的需求时,寻求其他外源有机物与污泥进行厌氧共基质消化是污水厂弥补能量运行赤字、实现可持续发展的必由之路。

表 1 国外污水厂碳中和案例

国家	污水处理厂	共消化底物	碳中和率	参考文献
美国	Sheboygan	高浓度食品废物(食品制造业废物)	90%~115%(电); 85%~90%(热)	[6]
德国	Steinhof	能量草(能够产生能量的草类植物)	140%	[8]
奥地利	Strass	厨余垃圾	200%	[20]
澳大利亚	Zirl	厨余垃圾	110%	[21]

投加不同外源有机物,甲烷产量和产率不同,常见的共消化底物为厨余垃圾、农业残留物、禽畜粪便、垃圾渗滤液、能量草、藻类和酒精糟液等,这些底物与污泥进行共消化均能提高沼气产率和污泥降解率。不同种类/比例的外源有机物与污泥共消化的效果如表 2 所示。

在众多共消化底物中,餐厨垃圾与活性污泥进行厌氧共消化产生甲烷的潜力较大且具有较高的降解速率^[26],在我国有广阔的利用前景。随着我国居民生活水平的提高和消费质量的改善,每年餐厨垃圾的产量不容小觑。剩余污泥与餐厨垃圾进行厌氧共消化优势明显,但在实际运行的过程中,二者共消化会引起污水处理厂消化液中氨氮和磷酸盐浓度升

表 2 不同种类/比例外源有机物共消化效果

Table 2 Co-digestion effect of different kinds/proportions of exogenous organic matter

共消化底物	共消化比例(剩余污泥:有机废物)	生物气增加量/%	参考文献
餐厨垃圾	4:1	21	[22]
石莼藻	17:3	26	[23]
油脂废弃物	2:3	285	[24]
灭菌后屠宰废水	19:1	470	[25]

高,从而对生化池负荷造成潜在影响并导致污泥增量。侧流厌氧氨氧化技术具有低能耗和剩余污泥产量低的优点,该技术的出现和不断发展成功解决了共消化难题,但在主流中还应及时校核生化池负荷,以免在运行过程中出现超标的风险。

3.3 热电联产

厌氧消化产生的甲烷可通过热电联产技术(CHP)推动内燃机、微型风机或新型燃料电池进一步对电能和热能进行回收,从而最大限度地实现污水厂的能源自足。CHP 技术被认为是从沼气中收获能量的最具成本效益的技术^[27]。通过沼气进行热电联产可抵消的污水厂能量消耗量高达 40%,回收的化学能可满足污水厂曝气、回流、厌氧池等耗能单元大部分的能量消耗^[28]。虽然热电联产不能完全弥补污水厂运行过程中的能量赤字,但若与其他碳中和运行工艺协同运作,则可发挥污水厂作为能量工厂的巨大潜能,进而实现碳中和运行目标。基于碳中和这一理念,荷兰 Amersfoort 污水厂开启了耗时 6 a 的改造计划,旨在提高污水处理能力,进而实现完全的能量自给自足^[7];该污水厂采用污泥热压水解(TPH)提高污泥厌氧消化效率和产气能力,还利用热电联产技术对污水处理中潜在能源以热能和电能的形式回收;通过提高消化负荷和热电联产这 2 种技术的联合运用,该污水厂不仅完全实现了碳中和运行目标,每年还可实现 2.0×10^6 kW·h 的电能盈余,这些电能可以持续不断地向外界输送;该厂超额完成了碳中和运行目标,将污水厂建设成为了一个名副其实的能量工厂^[7,19]。污水厂热电联产系统在运行过程中要做好发电系统和热力系统的定期维护和检修,确保发电效率和热力循环畅通,还要合理地对发电设备进行调度,做好发电系统的调控。

3.4 磷回收

磷元素是维持生命所必需的元素,由于其不可再生性而备受关注,若仅依靠磷元素的自然循环,难

以满足人类日益增长的对磷元素的摄取。因此,需开发可持续用磷方式,以遏制自然界中磷矿的无序开采。基于可持续发展理念,从污水中回收磷元素逐渐受到行业的关注。实现磷元素的高效回收,不仅可缓解全球磷矿资源匮乏的问题,驱动污水处理的可持续发展,而且还可弥补污水厂运行能耗赤字,并与减少温室气体的排放产生耦合作用。虽然利用LCA可对磷回收进行评估,但大多数研究都只进行了经济效益评估,鲜有进行环境效益评估的。相较于传统化肥生产,一个利用鸟粪石实现全面磷元素回收利用的污水厂每年可抵消约13 000 t CO₂排放量^[29-30]。柴春燕^[31]利用LCA对污水处理厂温室气体排放进行核算,结果表明,从污水中回收磷等资源可有效降低7%~18%温室气体的排放量。从生命周期的角度来看,营养回收不仅可以缓解磷酸盐矿石等资源的消耗,而且还可间接保留能量和水;回收营养物质将减少对传统化石肥料的需求,节省了用于生产传统肥料的能量和水。磷回收主要有2种方式:从富磷水相和从污泥中回收磷。富磷水相是以磷酸铵镁(MAP)的形式回收磷,厌氧池末端和污泥消化液中磷酸盐浓度高,回收潜力巨大^[32-33]。污泥焚烧是从污泥中回收磷的主要方式,焚烧灰分中几乎含有所处理污水中全部的磷,由此回收不仅简单,而且回收量最大(可达原污水磷负荷的90%)^[34]。污泥灰分磷回收主要有3种方法:生物法、湿式化学法和热化学法。结合富磷水相和污泥2种方式回收磷,可最大限度满足可持续处理的需求;碳中和目标下,该方法既能实现污泥的厌氧消化产能,又能最大限度地对污水中的潜在资源进行回收。从污泥中回收磷已有工程案例,如荷兰Amersfoort污水厂从富磷浓缩液和消化液中每天可回收2 000 t鸟粪石,回收的鸟粪石颗粒纯度高达99.9%,可进一步包装为优质肥料进行二次利用^[7]。碳中和背景下,从污水厂回收资源和能量成为行业发展的趋势,为磷回收行业带来了巨大的发展契机。

3.5 再生水利用

污水中的资源被回收后,处理过的污水进行再利用可进一步提高水资源利用率和经济效益。再生水在农田灌溉、工业生产以及景观用水领域进行循环利用可以减少碳足迹,降低开发更多能源密集型水资源带来的能耗。此外,再生水还可用于地下水补给和直接饮用回用。地下水补给可缓解沿海地区

地面沉降和海水入侵的风险,还可消除对地面储存设施的需求以及解决未覆盖地表水库相关的问题,如蒸发损失和藻类大量繁殖导致的水质恶化和产生异味。直接饮用回用是指处理后的污水直接引入配水系统,而不介入储存(管道到管道)。再生水回用可节省从原水水源供应水所需要的电力和化学品,具有巨大的抵消碳足迹潜力^[35]。污水厂实现水资源再生的主要方法可分为混凝沉淀法和介质过滤法,基于再生水安全性的考虑,以膜处理为核心的再生水利用技术成为污水厂发展的趋势。通过膜处理实现污水厂水资源再生回用的技术在国外得到了广泛应用,具有技术和安全上的可行性。新加坡通过对再生水厂进行基础设备改造和工艺改造,计划至2030年以循序渐进的方式实现碳中和运行目标。基础设备改造通过提升再生水厂设备运行效率来降低运行过程中的能量消耗,工艺改造主要有3种方法,其一是侧流Anammox自养脱氮工艺;其二是膜生物反应器;其三是污泥预处理。侧流Anammox自养脱氮工艺可以节省反硝化异养脱氮过程中的碳源消耗量,同时可降低3%~5%的曝气能耗。利用膜生物反应器(MBR)会额外增加0.11 kW·h/m³的耗电量,但因增加膜生物反应器可省去微滤/超滤(MF/UF)等下游高级处理单元,运行能耗还会降低15%;即使是采用双膜技术(反渗透膜和微滤膜)的樟宜第二再生水厂也通过工艺优化,使得运行过程中的平均电耗降低至0.75 kW·h/m³的低水平^[36]。采用剩余污泥预处理进行细胞破壁,可增加10%的厌氧消化产甲烷的量^[37]。高品质的再生水在未来具有广阔的市场需求,有望成为解决由水污染造成的水资源短缺问题的重要举措。

3.6 余温热能利用

为了清洁和洗涤的目的,家庭中使用的水被加热到舒适的温度,甚至更高的温度。由于热量的输入,生活污水出户的平均温度(27℃)比入户温度高2~17℃^[38]。污水余温热能利用潜力比污水中化学能对碳中和的贡献率要高(污水热能的回收潜力为化学能的9倍)^[38],若能够节约6%的热水或者回收污水中10%的热量,污水处理过程中消耗的总能量就可得到补偿^[39]。对有机化学能进行回收利用可反哺污水处理厂以弥补能量赤字,在此基础上,余温热能利用可通过热量输出交换的方式实现碳中和这一终极目标^[40]。余温热能通过集中利用的方式不

仅可满足厂内需求,亦可向周边住宅辐射,满足制冷供热的需要。欧洲污水余热热能集中利用研究较早,自20世纪80年代以来,瑞典地区供热系统已安装了几个总热量超过1 500 MW的大型水源热泵,这些热泵被用于区域供暖系统中,较低的CO₂排放量带来的环境效益为水源热泵的发展提供了广阔的发展前景^[41]。与天然气、煤和燃料油等可燃物不同,污水余热热能属于低品位能源,不能在无重大能量损失的情况下进行长距离输送^[42],因此污水厂通过水源热泵交换的热量在用户端进行原位利用。原位利用的方式可分为2种,其一为居家形式,其二为管道形式。值得注意的是,原位利用在运行过程中会出现较为严重的机组腐蚀现象,因此应定期对热交换器进行检查和维修,及时解决污染、堵塞和腐蚀等问题。水源热泵输出的热量需要热量需求大且稳定的用户进行消纳,因此交换的热量用于污泥热干化不失为一种潜在选择。污水余热热能用于污泥干化可使污泥含水率从80%降低至40%~70%,从污水处理厂可持续发展的角度来看,污泥经过干化后焚烧实现了余热热能从低品位能源向高品位能源的转换。从污水中回收热能具有重要的现实意义,减少碳足迹将是未来污水处理厂发展的必由之路,通过对污水中余热热能的回收利用无疑会实现更多的碳减排量,从而实现碳中和运行目标。

4 我国未来污水厂面临的挑战及展望

实现污水厂碳中和目标的关键是对资源和能量进行回收利用以及对处理设施进行节能降耗。目前我国污水厂实现碳中和仍面临一些挑战,主要分为以下3个方面:

(1)我国污水厂进水COD普遍偏低,严重限制了污泥厌氧消化的沼气产率。我国人均管网长度明显低于发达国家,复杂的管理体制导致排水管网运行效率低下,维护不力^[43],一方面导致污水收集不足,另一方面导致污水处理厂的运行负荷较低^[10]。

(2)我国只有不到3%的污水厂配备了厌氧消化设施,且相当一部分运行状况不佳^[44];若不考虑引入外源有机物与污泥进行共基质消化,难以实现污水厂的碳中和运行目标。此外,污水余热热能这一潜在能源在我国不受重视且通过集中交换产生的热量无法并网。

(3)我国绝大多数污水处理厂智能化、精细化控

制程度偏低,无法根据进水负荷实时调整加药量和曝气量。

因此,未来的发展方向主要为以下4个方面:

(1)加强低碳和资源回收处理技术的开发,如厌氧氨氧化技术和短程硝化和反硝化技术,最大限度地减少污水厂的整体能量平衡。

(2)完善管网配套建设水平,提高污水收集率和进水COD,同时加强污泥资源化处置,引入外源有机物进行厌氧共基质消化以提升能源回收效率,如利用餐厨垃圾进行厌氧共消化可增大消化过程中有机物含量、提高沼气产率。

(3)充分利用污水中的余热热能,开发高效热量交换技术,推进回收热能并网的发展。

(4)加快污水处理厂智能化发展、自动化进程,实现城市污水处理厂运行模式的转型。

5 结论

污水作为一种资源和能量的载体,在实现污水厂碳中和目标中发挥着举足轻重的作用。未来污水处理厂不仅要实现水质的净化,还要实现碳中和这一终极运行目标。国外已有污水处理厂实现了碳中和运行,为中国污水处理厂的运行提供了借鉴。污水厂实现碳中和需要对资源和能量进行高效回收利用,以实现污水厂能源自给自足。资源型污水处理正逐渐成为全球污水处理行业的时代主题,中国污水厂实现碳中和虽然仍面临一系列挑战,但也在积极探索适合自己发展的道路,概念污水厂理念的提出开启了中国污水可持续管理、和谐城市水生态的新篇章。

参考文献

- [1] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].给水排水,2021,57(3):1-5.
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.
- [2] MO Weiwei, ZHANG Qiong. Can municipal wastewater treatment systems be carbon neutral?[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 360-367.
- [3] GU Yifan, LI Yue, LI Xuyao, et al. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1463-1475.
- [4] LOOSDRECHT M, BRDJANOVIC D. Anticipating the next century

- of wastewater treatment [J]. Science, 2014, 344 (6191): 1452-1453.
- [5] GONG Hui, JIN Zhengyu, XU Heng, et al. Redesigning C and N mass flows for energy-neutral wastewater treatment by coagulation adsorption enhanced membrane (CAEM)-based pre-concentration process [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 342: 304-309.
- [6] 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 Xiaodi, WEI Jing, CAO Yali. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 1-6.
- [7] 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 Xiaodi, JIN Ming, HU Yuansheng. Framework of future wastewater treatment in the Netherlands: NEWs and their practices [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(20): 7-15.
- [8] 郝晓地, 任冰倩, 曹亚莉. 德国可持续污水处理工程典范——Steinhof 厂 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 6-11.
HAO Xiaodi, REN Bingqian, CAO Yali. An engineering model of sustainable wastewater treatment: Steinhof WWTP at Braunschweig in Germany [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 6-11.
- [9] NOWAK O, ENDERLE P, VARBANOV P. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: Lessons learned from Austrian applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 125-131.
- [10] QU Jiuhui, WANG Hongchen, WANG Kaijun, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 1-7.
- [11] LU Lu, GUEST J S, PETERS C A, et al. Wastewater treatment for carbon capture and utilization [J]. Nature Sustainability, 2018, 1(12): 750-758.
- [12] HUANG Baoheng, HE Chuanshu, FAN Niansi, et al. Envisaging wastewater-to-energy practices for sustainable urban water pollution control: Current achievements and future prospects [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110134.
- [13] 郝晓地, 李季, 曹达敏. 污水处理碳中和运行需要污泥增量 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 1-6.
HAO Xiaodi, LI Ji, CAO Daqi. Carbon-neutral operation of wastewater treatment needing sludge increment [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 1-6.
- [14] JIMENEZ J, MILLER M, BOTT C, et al. High-rate activated sludge system for carbon management—Evaluation of crucial process mechanisms and design parameters [J]. Water Research, 2015, 87: 476-482.
- [15] MEERBURG F A, BOON N, VAN WINCKEL T, et al. Toward energy-neutral wastewater treatment: A high-rate contact stabilization process to maximally recover sewage organics [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 373-381.
- [16] REMY C, BOULESTREAU M, LESJEAN B. Proof of concept for a new energy-positive wastewater treatment scheme [J]. Water Science and Technology, 2014, 70(10): 1709-1716.
- [17] HENDRIKS A, ZEEMAN G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10-18.
- [18] 何强, 吉芳英, 李家杰. 污泥处理处置及资源化途径与新技术 [J]. 给水排水, 2016, 52(2): 1-3.
HE Qiang, JI Fangying, LI Jiajie. Approaches and new technologies of sludge treatment and disposal [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(2): 1-3.
- [19] 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 Xinxin, LIN Jia, LIU Jie, et al. The current situation and engineering practice of sewage treatment technology facing the future [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 39-53.
- [20] 郝晓地, 程慧芹, 胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 Strass 污水厂案例剖析 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 1-5.
HAO Xiaodi, CHENG Huiqin, HU Yuansheng. International pioneer of carbon-neutral operation of wastewater treatment: A case study at strass in Austria [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 1-5.
- [21] AICHINGER P, WADHAWAN T, KUPRIAN M, et al. Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogas production and solids reduction [J]. Water Research, 2015, 87: 416-423.
- [22] LA COR JANSEN J, GRUVBERGER C, HANNER N, et al. Digestion of sludge and organic waste in the sustainability concept for Malmö, Sweden [J]. Water Science & Technology, 2004, 49(10): 163-169.
- [23] COSTA J C, GONALVES P R, NOBRE A, et al. Biomethanation potential of *Macroalgae ulva* spp. and *Gracilaria* spp. and in co-digestion with waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 320-326.
- [24] NOUTSOPOULOS C, MAMAI S D, ANTONIOU K, et al. Anaerobic co-digestion of grease sludge and sewage sludge: The effect of organic loading and grease sludge content [J]. Bioresource Technology, 2013, 131(9): 452-459.
- [25] PITK P, KAPARAJU P, PALATSI J, et al. Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency and process limitations [J]. Bioresource Technology, 2013, 134(2): 227-232.
- [26] DUNG T N B, SEN B, CHEN C C, et al. Food waste to bioenergy via anaerobic processes [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 307-312.
- [27] SARPONG G, GUDE V G, MAGBANUA B S, et al. Evaluation of energy recovery potential in wastewater treatment based on codigestion and combined heat and power schemes [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222: 113147.
- [28] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.
HAO Xiaodi, FANG Xiaomin, LI Ji, et al. Analysis of potential in

- carbon-neutral operation of WWTPs[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(10): 11-16.
- [29] MO Weiwei, ZHANG Qiong. Energy-nutrients-water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: 255-267.
- [30] NAKAKUBO T, TOKAI A, OHNO K. Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 157-172.
- [31] 柴春燕. 城镇污水处理厂温室气体排放规律及热岛效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- CHAI Chunyan. Study on the characteristics of greenhouse gas emissions and heat island effect of municipal wastewater treatment plants[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [32] CORNEL P, SCHAUM C. Phosphorus recovery from wastewater: Needs, technologies and costs[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 59(6): 1069-1076.
- [33] ZHOU Kaixin, BARJENBRUCH M, KABBE C, et al. Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52(2): 151-159.
- [34] 郝晓地, 于晶伦, 刘然彬, 等. 剩余污泥焚烧灰分磷回收及其技术进展[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1149-1159.
- HAO Xiaodi, YU Jinglun, LIU Ranbin, et al. Advances of phosphorus recovery from the incineration ashes of excess sludge and its associated technologies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(4): 1149-1159.
- [35] MENESES M, PASQUALINO J C, CASTELLS F. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(2): 266-272.
- [36] 卢睿卿, 杨光, 宫徽, 等. 新加坡新生水工艺对我国生产高品质回用水的启示[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(14): 36-40.
- LU Ruiqing, YANG Guang, GONG Hui, et al. Enlightenment of Singapore's NEWater technology to the production of high quality reclaimed water in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(14): 36-40.
- [37] 郝晓地, 孟祥挺, 付昆明. 新加坡再生水厂能耗目标及其技术发展方向[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(24): 7-11.
- HAO Xiaodi, MENG Xiangting, FU Kunming. Targeted energy consumption and associated technologies developed in water reclamation plants in Singapore[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(24): 7-11.
- [38] HOFMAN J, HOFMAN-CARIS R, NEDERLOF M, et al. Water and energy as inseparable twins for sustainable solutions[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(1): 88-92.
- [39] HAO Xiaodi, LI Ji, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: Heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74-77.
- [40] HAO Xiaodi, LIU Raibin, HUANG Xin. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. *Water Research*, 2015, 87: 424-431.
- [41] AVERFALK H, INGVARSSON P, PERSSON U, et al. Large heat pumps in Swedish district heating systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 1275-1284.
- [42] SPRIET J, MCNABOLA A, NEUGEBAUER G, et al. Spatial and temporal considerations in the performance of wastewater heat recovery systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119583.
- [43] HUANG Dong, LIU Xiuhong, JIANG Songzhu, et al. Current state and future perspectives of sewer networks in urban China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, 12(3): 1-16.
- [44] JIN Lingyun, ZHANG Guangming, TIAN Huifang. Current state of sewage treatment in China[J]. *Water Research*, 2014, 66: 85-98.
-
- [作者简介] 蒋彬(1972—), 副教授。E-mail: jb340@163.com。通讯作者: 陈垚, 教授。E-mail: chenyaocqjtu.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-12-03(修改稿)