



碳中和在污水处理厂的实践途径与应用进展

吕利平¹, 李航^{2,3}, 李伟^{2,4}, 刘继成⁴, 董立春²

(1. 长江师范学院化学化工学院, 重庆 408100; 2. 重庆大学化学化工学院, 重庆 401331;
3. 重庆市三峡水务渝北排水有限责任公司, 重庆 401120; 4. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400015)

[摘要] 碳中和运行是污水处理行业今后的发展方向, 具有低能耗、低排放、可持续等优点。综述了碳中和在污水处理厂的实践途径, 具体包括污水余热热能利用、污泥热电联产、原水碳源捕集、太阳能光伏发电、低能耗污水处理工艺的应用及高能耗设备的节能改造等, 并对应用较为成功的工程案例进行了分析说明。在此基础上提出了解决制约污水处理厂碳中和实现的重点任务, 包括从政策渠道打通污水处理厂与用户之间的热网连接通道, 大力推进城市排水系统雨污分流改造并强化原水碳源捕集, 开发具有高度稳定性的太阳能储能技术, 强化低能耗工艺运行机理与控制因素的研究等。

[关键词] 碳中和; 热能; 热电联产; 碳源捕集; 光伏发电; 节能改造

[中图分类号] X703; TU992 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0001-06

Practice approach and application progress of carbon neutrality in wastewater treatment plant

LÜ Liping¹, LI Hang^{2,3}, LI Wei^{2,4}, LIU Jicheng⁴, DONG Lichun²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China;
2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China;
3. Chongqing Three Gorges Water Yubei Drainage Co., Ltd., Chongqing 401120, China;
4. Chongqing Water Group Co., Ltd., Chongqing 400015, China)

Abstract: Operation towards carbon neutrality is the future development direction of wastewater treatment industry, which has the advantages of low energy consumption, low emission and sustainable development. Practice approach towards carbon neutrality in wastewater treatment plants were summarized, including utilization of wastewater thermal energy, sludge cogeneration, raw water carbon capture, solar photovoltaic power generation, application of low energy consumption wastewater treatment processes and energy saving transformation of high energy consumption equipment and so on, and the successful engineering cases were analyzed. Based on theses, the key tasks how to solve the restriction of realization of carbon neutrality in wastewater treatment plants were proposed, including opening up the heat supply network connecting channel between the sewage treatment plant and users through policy channels, vigorously promoting the transformation of rainwater and wastewater diversion of urban drainage system, strengthening the capture of raw water carbon source, developing highly stable solar energy storage technology, and strengthening the research on the operation mechanism and control factors of low-energy process.

Key words: carbon neutrality; thermal energy; cogeneration; carbon capture; photovoltaic power generation; energy saving transformation

全球变暖与气候变化促使人们努力减少碳足迹^[1]。大多数国家已开始努力减少温室气体的排

放^[2]。传统污水处理是一个“以能耗能”、“污染转嫁”的过程^[3], 在当前污水收集处理率与污染物去除

[基金项目] 重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202101417)

率双提升的形势下,污水处理厂的能耗问题越发突出且日趋严峻^[4]。

鉴于此,笔者根据多年的污水处理厂运营经验,提出采取污水余热热能利用、污泥热电联产、原水碳源捕集、太阳能光伏发电、低能耗污水处理工艺应用及高能耗设备节能改造等举措,实现污水处理厂由高能耗、高排放、低品质向低能耗、低排放、可持续转变,以期为污水处理行业碳中和的早日实现提供理论参考与可行案例支撑。

1 碳中和的含义

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上郑重提出,中国“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。“双碳”战略为全社会的碳减排目标任务进行了顶层设计,而污水处理厂作为传统能耗大户,更应该多措并举,适度超前,提早开启低碳变革,为未来的发展赢得更大的主动权与更广阔的空间。所谓碳中和是指污水处理厂在一定时期内直接或间接排放的二氧化碳总量,通过自产清洁能源、采用低能耗处理工艺、实施设备节能改造等途径全部抵销,实现污水处理厂温室气体的净“零排放”。

2 碳中和的实践途径

2.1 污水余热热能利用

生产生活中因热量输入输出使得经处理后排放的污水水温通常比环境温度低(夏季)或高(冬季)。据统计估算,污水余热热能约占城市总废热排放量的15%~40%^[5],加之污水流量稳定、温差较小,具有冬暖夏凉的特点,因此可以采用热泵技术以热交换方式利用污水余热进行供热或制冷。通过能效比(Coefficient of performance, COP)对比发现,地源热泵与空气源热泵的COP分别为3.3~3.8和2.8~3.4,均低于污水源热泵(Wastewater source heat pumps, WSHP)3.5~4.6的能效比^[6-7],这说明交换同样的热量,污水源热泵比地源热泵和空气源热泵都更省电。鉴于此,WSHP技术被广泛应用于污水余热热能的提取。

然而,污水余热热能属于低品位能源,很难用于发电而只能被直接利用,且其相对经济有效的输送半径为3~5 km^[8-9]。这就意味着污水余热热能只能

用于污水处理厂周边或厂内的空调制冷(或制热)、工业水冷却、区域供热、温室加温等,以“碳交易”方式折算热能,部分或全部抵消污水处理厂的碳排放。

目前,全球有500余个WSHP装置在运行^[10]。位于芬兰Turku市的Kakolanmäki污水处理厂,日处理水量约9万m³,拥有4个平行处理系统,采用WSHP技术回收污水中的余热热能后,为周边临近区域内15 000户家庭提供了近200 GW·h的制热输出量和约30 GW·h的制冷输出量,满足了当地14%的供暖需求与90%的制冷需求。据测算,该WSHP的使用可为Turku市每年减排约8万t温室气体^[11]。同样地,泰晤士水务公司与金斯顿地方委员会协作推进了Poo power计划,该计划旨在通过WSHP技术从Hogsmill污水处理厂三分之一出水中回收余热。经严格的统计与估算,预计该项目每年可从污水余热中回收高达7 GW·h的热能,相当于每年减少约0.35万t CO₂排放量^[12]。可以看出,污水余热热能的利用对于污水处理厂碳中和的实现具有积极的推动作用。

2.2 污泥热电联产

污泥厌氧消化产生甲烷用于热电联产(Combined heat and power, CHP),因既产电又产热的先进能源利用形式而被世界各国所大力推崇。丹麦Aarhus水务公司的Marselisborg污水处理厂从2006年开始筹划实施节能降耗项目,经过10年的系统优化,该污水处理厂采用中温厌氧消化工艺从污水中回收甲烷,再通过CHP回收能量,成功实现了污水处理厂能量的自给自足,此外,每年还会产生约2.5 GW·h的热能进入当地的供热网络^[13]。此种不添加外来有机物即可实现能量自给自足的情况较少,绝大部分污水处理厂由于进水有机物浓度偏低,致使污泥产量较少,甲烷产量不足,难以实现能量自给。为此,位于美国威斯康辛州的Sheboygan污水处理厂确立了“能源零消耗”的运行目标,积极参与了“威斯康辛聚焦能源(Wisconsin focus on energy, FOE)”项目,通过采取外加高浓度有机食品废物方式实现有机废物与污泥厌氧共消化,产生高浓度甲烷进行CHP,且在2013年,该污水处理厂产热量与耗热量比值便已达到了0.85~0.90,而产电量与耗电量比值更是高达0.9~1.15,已基本接近碳中和目标^[14]。Sheboygan污水处理厂碳中和的实现路径为我国大量

存在的进水有机物浓度偏低、污泥产量较少的污水处理厂实现碳中和提供了可复制的成功经验,高浓度有机废物如餐厨垃圾等与剩余污泥厌氧共消化完全可以弥补污水处理厂自身有机能源不足的问题。

2.3 原水碳源捕集

传统的污水处理技术都是基于污染物的降解与水质稳定达标而提出的,这些技术几乎均是通过消耗大量能源来换取污染物的去除,同时还会向环境排放大量温室气体^[15-16],是一个极不经济且不可持续的过程。事实上,污水本身也是能源与资源的载体^[17]。统计显示,原水中所含有的碳源能量大约是污水处理所消耗能量的9~10倍之多^[18]。如果能将这些碳源部分或全部捕集,则污水处理厂的碳中和目标是完全可以实现的,而且污水处理厂还能作为“能源工厂”向外界源源不断提供清洁能源。为此,新加坡 Ulu Pandan 再生水厂在“预处理+活性污泥+厌氧消化(Anaerobic digestion, AD)”技术路线基础上提出了“AD+CHP”模式^[19]。但该模式由于 COD 甲烷化效率较低,故逐步被强化预处理以实现碳源捕集转向及满足污泥增量的技术路线(简称 A-B 型)所取代^[20]。A-B 型工艺中,A 段主要是实现原水碳源捕集并将其转移到能源化途径,而进入 B 段的废水则呈现出明显的“低 C/N”特性,需要辅以厌氧氨氧化等低 C/N 工艺确保出水水质稳定达标。位于奥地利的 Strass 污水处理厂采用 A-B 型工艺与测流厌氧氨氧化工艺相结合的方式实现了原水碳源捕集及污泥产量最大化,通过污泥厌氧消化产甲烷实施 CHP,早在 2005 年便达到了碳中和运行目标,且能源自给率达到了 108%,成为了碳中和运行的国际先驱,在全球范围内都具有积极的示范意义^[21]。

2.4 太阳能光伏发电

污水处理厂通常拥有较大的占地面积,而反应池、沉淀池、滤池等工艺单元也都具有较大且空旷的表面,这为太阳能光伏发电技术在污水处理厂的应用提供了先决条件。

太阳能以其“取之不尽、用之不竭”的特点被称为“未来能源”。国际能源署(IEA)指出,太阳能作为廉价清洁能源,其开发应用将带来巨大的长期效益^[22]。自 20 世纪 70 年代以来,太阳能光伏发电技术便在美国、德国等发达国家得到了迅速发展。1997 年,美国便宣布实施了“百万太阳能屋顶计划”。而德

国也在 1990—1999 年期间实施了“千屋顶计划”^[23],到 2000 年左右,德国的太阳能光伏市场急剧增长了 14 倍,光伏发电容量也达到了 40 MW 之多^[24]。大量“屋顶计划”的成功实施,意味着太阳能光伏发电技术应用于污水处理厂是可行的,不仅可以降低污水处理过程的能耗支出,降低污水处理成本,还可以实现碳减排任务,助推污水处理厂碳中和的实现。丹麦哥本哈根 Damhusåen 污水处理厂尝试性地在厂区部分工艺单元表面安装了太阳能光伏板,满足了厂区 9% 的能耗需求^[13]。同样地,河南省马头岗水务公司在厂区内安装了约 15 万 m² 的太阳能光伏板,总发电容量达 17 MW,每年可为厂区节省生产用电约 3 300 万 kW·h,节约发电燃煤约 1.32 万 t,间接减排 CO₂ 约 3.29 万 t,减少粉尘排放约 0.89 万 t^[25]。而芜湖市朱家桥污水处理厂也同样利用太阳能光伏发电技术,采取“自发自用,余电上网”的运营模式,每年向长江大保护项目提供绿色低碳电能超 2 000 万 kW·h,节约标准煤约 0.65 万 t,节约用水约 8.53 万 t,减排 CO₂ 约 1.59 万 t,减排 SO₂ 约 165.50 t,减排 NO_x 约 142.20 t,减排烟尘约 69 t,经济效益与环境效益显著^[25]。

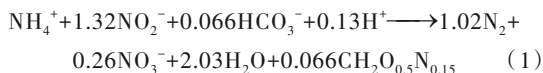
2.5 采用低能耗污水处理工艺

短程硝化反硝化(Short-cut nitrification and denitrification, SCND)、厌氧氨氧化(Anaerobic ammonium oxidation, Anammox)、好氧颗粒污泥(Aerobic granular sludge, AGS)等工艺因处理过程所拥有的低能耗优势而越发引起了研究人员与工程技术人员的广泛关注。

SCND 工艺是在曝气阶段对过程溶解氧进行系统优化,将硝化反应产物控制在 NO₂⁻-N 形态,随后降低溶解氧进行反硝化脱氮,此过程相比全程硝化反硝化而言,节省了 NO₂⁻-N 氧化为 NO₃⁻-N 的深度硝化需氧量,可节约 25% 左右曝气能耗^[26]。广州兴丰污水处理厂通过对过程溶解氧进行不断优化,经过一段时间的调试驯化后发现,NO₂⁻-N 累积率呈现稳步上升趋势并成功启动了 SCND^[27-28]。对该污水处理厂稳定运行后的经济指标进行分析发现,与运行之初相比,平均电耗降低了 38%。可以看出,SCND 工艺的应用对污水处理厂碳中和的实现具有重大的现实意义。

Anammox 工艺指厌氧氨氧化菌在缺氧或厌氧条件下,以 H₂CO₃ 或 CO₂ 为碳源,以 NH₄⁺-N 为电子供体,以 NO₂⁻-N 为电子受体,生成 N₂ 与 NO₃⁻-N^[29-30] 的

过程,其涉及到式(1)所示的反应。



与传统处理工艺相比, Anammox 工艺节省了 NO_2^- -N 氧化为 NO_3^- -N 的深度氧化需氧量,可节约大量曝气电耗,从而可直接减排大量 CO_2 ;同时其以 H_2CO_3 或 CO_2 为碳源,无需外加有机碳源,也可间接减排大量温室气体。此方面新加坡樟宜再生水处理厂率先在全球范围内开启了 Anammox 工程实践探索。经调试运行后对微生物菌群进行分析发现,好氧区 NO_2^- -N 累积率达到了 76.0%,缺氧区存在大量厌氧氨氧化菌。通过对经济指标进行分析发现,该工程曝气能耗仅为 $0.12 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,相比传统再生水处理厂下降了近 30%^[31]。可以看出, Anammox 工艺对于大量存在的低 C/N 城市污水及无机工业废水的处理具有天然优势。

国际水协会(International Water Association, IWA)将 AGS 定义为一种聚集密实,且沉降性能明显优于絮状活性污泥的微生物集合体。与传统絮状活性污泥相比, AGS 具有生物量高、沉降性能优越及处理高效等优点,这就决定了 AGS 技术能耗会大幅度低于传统污水处理工艺能耗。目前, AGS 已被逐步应用到工程实践中。荷兰第一座 AGS 污水处理装备于 2011 年在 Epe 污水厂投产使用,随后该污水处理厂便立即成为全荷兰能耗最低的污水处理厂^[32]。紧接着,荷兰北部格罗宁根市的 Garmerwolde 污水处理厂在原有吸附-生物降解(AB 法)工艺基础上引进了 AGS,能耗由原工艺的 $330 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}^3$ 稳步降至 $170 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}^3$,下降了 48.5%,运行费用下降了约 50%^[32]。上述成功案例为 AGS 的规模化推广起到了很好的示范作用。

2.6 设备节能改造

据统计,我国污水处理厂平均电耗为 $0.29 \sim 0.40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[33],其中,鼓风机、污水提升泵等设备能耗约占污水处理总能耗的 69%。因此,通过节流途径降低能耗的关键是对曝气系统、污水提升系统等关键能耗设备进行升级改造。对于曝气系统而言,既要防止曝气不足影响出水指标,也要防止过度曝气导致能耗增加;而对于污水提升系统而言,既要防止设备老化、落后出现低效提升,也要防止设备频

繁启停导致能耗增加。对此,丹麦 Marselisborg 污水处理厂通过采用在线氨氮、磷酸盐等参数仪表对污水处理过程工况指标进行动态实时监控,再辅以变频器控制措施应对原水水质、水量的动态变化,该举措使该污水处理厂电耗降低了 25%^[13]。同样地, Sheboygan 污水处理厂也通过对曝气系统与污水提升系统进行升级改造,降低了设备运行过程中的电耗支出。其首先将建厂之初的 4 台 186 kW 老式曝气机改造为 2 台 261 kW 高效、节能新设备,之后将原有 6 台提升泵中的 2 台提升泵的电机改造为 150 kW 高效变频电机,并为其分别配置了变频驱动,这 2 项升级改造共计为该厂节省电耗约 33%^[34]。

3 结论与展望

随着“双碳”战略的提出,传统高能耗、高排放、低品质的水处理技术已然无法满足当今社会绿色低碳的发展要求。为尽快实现污水处理行业碳中和运行目标,降低污水处理过程中的能耗支出,减缓并扭转因温室气体排放对全球气候变化的不利影响,新兴的低能耗、低排放、可持续的污水余热热能利用、污泥热电联产、原水碳源捕集、太阳能光伏发电以及低能耗工艺的应用和高能耗设备的节能改造等技术得到了广大科研人员与工程技术人员的广泛关注。当前,已有部分成功案例为污水处理厂碳中和的实现提供了思路。但就目前的应用情况来看,仍存在诸多制约污水处理厂碳中和实现的瓶颈问题需进一步解决:

(1) 污水余热热能利用在污水处理厂碳中和的实现道路上具有举足轻重的地位,但城市热网建设滞后严重阻碍了这一资源再利用举措的功能发挥。从政策渠道打通污水处理厂与用户之间的热网连接通道将是充分发挥污水余热热能资源价值的当务之急。

(2) 目前,国内大部分污水处理厂进水有机物浓度普遍偏低,致使污泥产量较少,甲烷产量不足,实施 CHP 所实现的能量自给率不高。为此,大力推进城市排水系统雨污分流改造,进一步强化原水碳源捕集,对提升 CHP 效率具有更现实的指导意义。

(3) 太阳能光伏发电虽然能直接抵消污水处理厂部分能耗需求,但由于受光照时间、光照强度等变

化的影响,使得太阳能光伏发电技术在污水处理厂的应用稳定性不好。后续工作应结合现有研究成果,将开发具有高度稳定性的太阳能储能技术作为研究重点。

(4)部分已投入工程应用的低能耗污水处理工艺虽然取得了一定的成效,但这些毕竟是个例,绝大部分污水处理厂采用的仍是传统高能耗工艺,对全社会碳中和的实现助力不大,这主要受限于新兴的低能耗工艺普遍存在启动时间长、稳定运行难、环境依附度高等问题。加强低能耗工艺运行机理与控制因素的研究将有助于该类工艺的进一步发展与应用。

参考文献

- [1] MANNINA G, EKAMA G, CANIANI D, et al. Greenhouse gases from wastewater treatment—A review of modelling tools[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 254–270.
- [2] 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.
- [3] 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 Zhixiao. 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.
- [4] 郭静波, 田宇, 张兰河, 等. 城市污水处理厂温室气体的排放及减排对策[J]. *化工进展*, 2012, 31(7): 1604–1609.
GUO Jingbo, TIAN Yu, ZHANG Lanhe, et al. Emission and reduction strategies of greenhouse gases generated in municipal wastewater treatment plants[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(7): 1604–1609.
- [5] HOFMAN J, HOFMAN-CARIS R, NEDERLOF M, et al. Water and energy as inseparable twins for sustainable solutions[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2011, 63(1): 88–92.
- [6] ÇAKIR U, ÇOMAKLI K, ÇOMAKLI Ö, et al. An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air[J]. *Energy*, 2013, 58: 210–219.
- [7] SHEN Chao, LEI Zhuoyu, WANG Yuan, et al. A review on the current research and application of wastewater source heat pumps in China[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, 6: 140–156.
- [8] FIORE S, GENON G. Heat recovery from municipal wastewater: Evaluation and proposals[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014, 13(7): 1595–1604.
- [9] ALEKSEIKO L N, SLESARENKO V V, YUDAKOV A A. Combination of wastewater treatment plants and heat pumps[J]. *Pacific Science Review*, 2014, 16(1): 36–39.
- [10] HEPBASLI A, BIYIK E, EKREN O, et al. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 700–722.
- [11] 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 Xiaodi, ZHAO Zicheng, LI Ji, 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.
- [12] 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 Xiaodi, YE Jiazhou, LI Ji, et al. Status and potential applications of thermal energy from wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 15–22.
- [13] 杨智姬. 污水厂实现“碳中和”的途径分析[EB/OL]. [2021-04-29]. <http://gootech.com/news/detail-10303995.html>.
- [14] 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.
- [15] 胡大龙, 王罗春, 周振. 污水处理过程中的温室气体排放现状及展望[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(3): 108–112.
HU Dalong, WANG Luochun, ZHOU Zhen. Status and prospects of greenhouse gas emissions in wastewater treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(3): 108–112.
- [16] 郑思伟, 唐伟, 闫兰玲, 等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体的核算及排放特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(5): 556–559.
ZHENG Siwei, TANG Wei, YAN Lanling, et al. Accounting and emission characteristics study on co-control of pollutants and greenhouse gases in municipal wastewater treatment plant[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(5): 556–559.
- [17] HAO Xiaodi, LIU Ranbin, HUANG Xin. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. *Water Research*, 2015, 87: 424–431.
- [18] SHIZAS I, BAGLEY D M. Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2004, 130(2): 45–53.
- [19] SHI C. Mass flow and energy efficiency of municipal wastewater

- treatment plants[M]. USA: IWA Publishing, 2011: 132.
- [20] RAHMAN A, DE CLIPPELEIR H, WINCKEL T V, et al. Does optimization of carbon redirection always imply energy recovery?[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2015, 2015(20): 4432-4443.
- [21] 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.
- [22] ZHANG Peng, LI Wenyuan, LI S, et al. Reliability assessment of photovoltaic power systems: Review of current status and future perspectives[J]. Applied Energy, 2013, 104: 822-833.
- [23] KIEFER K, HOFFMANN V U. Measurement and analysis programme within the thousand roofs programme[J]. Renewable Energy, 1994, 5(1/2/3/4): 333-338.
- [24] GABLER H. Grid-connected photovoltaics[J]. Solar Energy, 2001, 70(6): 455-456.
- [25] 环保水处理. 国内 11 个“光伏+污水处理厂”典型案例[EB/OL]. [2021-08-28]. <https://new.qq.com/omn/20210828/20210828A0478800.html>.
- [26] GAO Chundi, FAN Shixin, JIAO Erlong, et al. Operation and optimization of an alternating oxic-anoxic shortcut nitrification-denitrification system [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030/1031/1032: 387-390.
- [27] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 610-616.
- ZHANG Gongliang, LI Dong, ZHANG Xiaojing, et al. Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 610-616.
- [28] 吴春雷, 荣懿, 刘晓鹏, 等. 基于分区供氧与溶解氧调控的低 C/N 比污水短程硝化反硝化[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2310-2316.
- WU Chunlei, RONG Yi, LIU Xiaopeng, et al. Partial nitrification and denitrification of low C/N ratio sewage based on zoning oxygen and dissolved oxygen control[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2310-2316.
- [29] 李航, 姚潇涵, 张欣, 等. 厌氧氨氧化工艺的研究与应用进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(2): 15-19.
- LI Hang, YAO Xiaohan, ZHANG Xin, et al. Research and application progress of anaerobic ammonia oxidation process [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(2): 15-19.
- [30] DU Rui, CAO Shenbin, LI Baikun, et al. Synergy of partial-denitrification and anammox in continuously fed upflow sludge blanket reactor for simultaneous nitrate and ammonia removal at room temperature[J]. Bioresource Technology, 2019, 274: 386-394.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- LI Yun, JIANG Jinyuan, BAI Lu, et al. Present situation of the energy consumption evaluation and optimization in wastewater treatment plants[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(9): 1-4.
- [34] 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.
- [作者简介] 吕利平(1987—), 博士, 讲师. E-mail: lvliping@yznu.edu.cn. 通讯作者: 李航, 博士研究生, 工程师. E-mail: lihang0213@163.com.
- [收稿日期] 2022-07-01(修改稿)