

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.007

碳中和背景下基于 AB 工艺的污水处理厂能量自持分析

Energy neutral analysis of sewage treatment plant based on AB method under the background of carbon neutrality

梁远¹, 付岩峰², 方小锋³, 成红燕², 孟春霖¹, 颜莹莹^{1*}, 陈北洋²

LIANG Yuan¹, FU Yanfeng², FANG Xiaofeng³, CHENG Hongyan², MENG Chunlin¹,
YAN Yingying^{1*}, CHEN Beiyang²

(1.北京首创污泥处置技术有限公司,北京 100044;2.华电水务科技股份有限公司,北京 100070;
3.北京首创股份有限公司,北京 100044)

(1.Beijing Capital Sludge Company Limited, Beijing 100044, China; 2.Huadian Water Technology Company Limited,
Beijing 100070, China; 3.Beijing Capital Company Limited, Beijing 100044, China)

摘要:我国污水处理行业碳排放量占全国总排放量的 1.0%~3.0%,在碳中和的大趋势下,需要充分挖掘污水中蕴含的潜能,实现污水处理的能量自持。污水中化学需氧量(COD)对应有有机物含有大量化学能,COD 为 1 mg/L 时每 m³污水含化学能约 16.2 kJ,是污水能源利用的主要途径。国内外学者对以碳捕捉及碳源改向为基础的新型吸附生物降解(AB)工艺进行研究,提出各自的能量平衡或碳中和和技术路线。以进水 COD 为 500 mg/L 进行理论计算,基于 AB 工艺+厌氧消化+热电联产(CHP)工艺路线,计算得每 m³污水发电潜能约 0.340 kW·h,可实现污水处理厂运行的能量自持。污水处理厂引入水源热泵和光伏发电也是实现能量自持的重要补充手段。污水所含余温热能只能通过水源热泵转换为约 60 °C 的低品位热源,不能直接用于发电。污水处理厂利用光伏发电可补偿约 10.0% 的能耗。

关键词:碳中和;吸附-生物降解;化学需氧量;热电联产;水源热泵;光伏发电

中图分类号:TK 01⁹:X 703

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)06-0055-06

Abstract: China's sewage treatment industry carbon emissions accounted for 1.0%~3.0% of the total emissions. Under the trend of carbon neutralization, it is necessary to fully tap the potential of sewage and realize the energy self-sustaining of sewage treatment. Chemical oxygen demand (COD) in wastewater contains a large amount of chemical energy. When COD is 1 mg/L, the chemical energy in 1 m³ wastewater is about 16.2 kJ, which is the main way of sewage energy utilization. Scholars in China and abroad have studied the new AB process based on carbon capture and carbon source modification, and proposed various characteristic energy balance or carbon neutralization technology routes. The theoretical calculation was carried out with the influent COD of 500 mg/L. Based on the AB process+anaerobic digestion+CHP power generation process, the power generation potential of 1 m³ wastewater was calculated to be about 0.340 kW·h, which can realize the energy self-sustaining of the operation of the wastewater treatment plant. In addition, the introduction of water source heat pump and photovoltaic power generation in sewage treatment plants is also an important supplementary means to realize energy self-sustainability. The waste heat contained in sewage can only be converted to a low grade heat source of about 60°C by water source heat pump, which cannot be directly used for power generation. Wastewater treatment plants use photovoltaic power generation to compensate for about 10.0% of energy consumption.

Keywords: carbon neutral; adsorption-biodegradation process; chemical oxygen demand; combined heat and power; water source heat pump; solar power

0 引言

为应对全球变暖的重大挑战,我国提出了“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”的目标。2020 年 12 月 18 日中央经济工作会议将“碳中和”列为 2021 年度国家八大重点任务之一,可见国家对“碳中和”的高度重视及对“碳中和”目标纳入执行阶段的态度和决心。

目前,我国是全球碳排放第一大国,排放量占全球总排放量的 25.0% 以上。其中,污水处理行业碳排放量占全国总排放量的 1.0%~3.0%,是不可忽

收稿日期:2021-04-28;修回日期:2021-06-08
基金项目:中国水协团体标准制订计划项目(ZGSX-TBJH-2021);中国华电集团科技项目(CHDKJ21-01-52)

视的减排领域^[1]。污水处理低碳运行策略可概括为“开源”和“节流”。通过发掘污水、污泥中的有机能源,妥善利用太阳能等开源的方式,再加上具有低碳潜能的工艺过程和工艺优化运行、提高设备能效等节流措施,方可实现污水处理的低碳运行^[2]。

1 污水中的化学能潜力

在污水处理生产实践中,化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)通常用于确定生活废水中的总有机物含量。污水中 COD 对应有有机物含有大量化学能, COD 为 1 mg/L 时每 m³ 污水可产生 14.70~17.80 kJ 化学能, 平均为 16.20 kJ^[3]。以北京小红门再生水厂为例, 目前进水 COD 为 520~540 mg/L^[4]。根据住建部、生态环境部和发改委发布的《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》要求, 随着城市污水管网建设与管理、雨污分流的完善, 可以预见国内市政污水处理厂进水 COD 将持续提高。本文将污水处理厂进水 COD 取 500 mg/L 作为测算基准, 计算得进水的潜能约为 8 100 kJ/m³。

根据美国国家环保局统计, 污水处理规模小于 5 万 m³/d 的污水处理厂, 处理污水消耗的电能 0.33 (kW·h)/m³; 规模大于 50 万 m³/d 的污水处理厂, 处理污水消耗的电能 0.13 (kW·h)/m³。平均电耗约 0.25 (kW·h)/m³, 折合 900 kJ/m³, 仅为污水所含潜能的 1/9^[5]。因此, 污水处理厂不但有可能实现能源的自给自足, 甚至还可转变为能源工厂。

不过, 目前绝大多数采用传统活性污泥法工艺的污水处理厂均是以“达标排放”为主, 以“能源和资源回收”为辅, 因此能源效率比(污水产生的电能/污水处理厂运行所需的总电能)并不高^[6]。典型传统活性污泥法工艺流程如图 1 所示, COD 为 1 mg/L 时每 m³ 污水通过甲烷回收化学能的理论值约为 13.90 kJ^[3], 因此可以计算出可回收化学能总量为初沉污泥 (13.90 kJ×26.0%) 与剩余污泥 (13.90 kJ×7.0%) 之和, 即 4.58 kJ^[7]。但是, 只有约 35.0% 的甲烷化学能可通过燃烧转化为电能。因此, 污水处理厂通过厌氧消化从每 m³ 污水中获得最大可回收电能约为 4.58×35.0%=1.60 (kJ/g) (COD 为 1 mg/L)。去除相应的 COD 需要约 3.20 kJ 的能量, 对比最大可回收的电能 1.60 kJ, 可得来自废水的电能最多只能抵消当前污水处理厂运行所需总能源的 50.0%。

如图 1 所示, 尽管初沉污泥中仅有 40.0% 的 COD 被捕集, 但其消化后回收能源的比例却占到污水处理厂再利用能源总量的 78.0%。这说明在生物氧化之前尽可能捕获 COD 对于改善能量平衡至

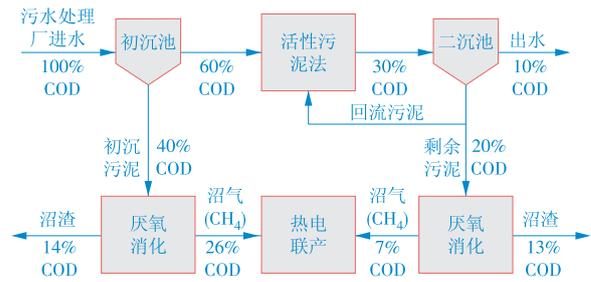


图 1 采用传统活性污泥工艺的污水处理厂 COD 流向
Fig. 1 Flow direction of COD in wastewater treatment plant based on traditional activated sludge process

关重要, 可以将污水处理厂的运行状态从耗能转变为能量平衡, 甚至成为净产能单位。

2 AB 工艺原理概述

污水处理厂能量回收的核心是在生物氧化之前尽可能多地从污水中捕获 COD, 基于此原理的工艺被称为吸附生物降解 (Absorption Biodegradation, AB) 工艺, 如图 2 所示。在 AB 工艺中, A 段专门用于最大程度地从生活污水中捕获有机物, 以便在生物氧化前进行厌氧消化; B 段主要用于去除污染物。

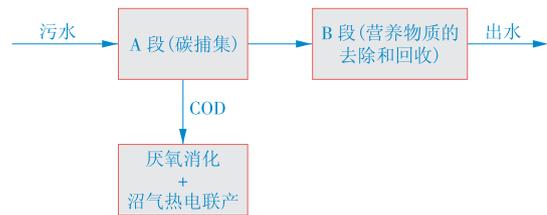


图 2 AB 工艺流程
Fig. 2 AB process flow

理论上, 如果 COD 总量中的 65.0% 产生的电能应足以驱动常规污水处理厂的运行。如果生活污水中的 COD 可以在 A 段捕获, 并通过厌氧消化转化为甲烷, 即 1 g COD 产生的电能=13.90×65.0%×35.0%=3.20 kJ。AB 工艺的本质是在 A 阶段, 即污水进行生物氧化之前通过 COD 捕集提高能量回收效率, 同时减少 B 段的能耗。这是实现污水处理厂能源自给自足的主要方式。

奥地利 Strass 污水处理厂是全球首座采用 AB 工艺, 并在主流工艺上实践厌氧氨氧化工艺, 从而实现能量 100.0% 自给的污水处理厂^[8]。该厂的污水处理流程如图 3 所示。污水处理厂的进水通过高负荷活性污泥法 (High Rate Activated Sludge Process, HRAS) 吸附、转化污水中大部分悬浮物与溶解性有机物; 之后, 污水进入主流好氧反氨化 (deammonification, DEMON) 工艺, 严格控氧的耗氧处理将污水中的部分 NH₃-N 氧化为 NO₂⁻; 随后, 厌氧段使剩余的 NH₃-N 发生厌氧氨氧化反应生成氮

气。污泥采用厌氧消化工艺处理,产生的 CH_4 进行热电联产(Combined Heat and Power, CHP)。产生的热能用于消化池的加热和沼渣的干化,产生的电能则用于鼓风机和提升泵等设备的运行。

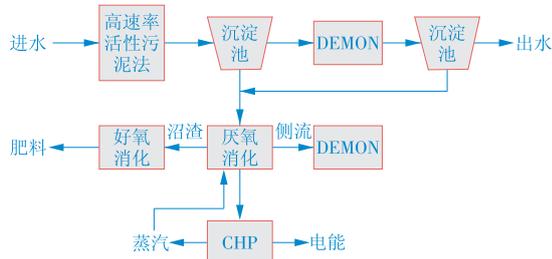


图3 奥地利 Strass 污水处理厂工艺流程

Fig. 3 Process flow of Strass sewage treatment plant in Austria

Strass 污水处理厂在 2005 年就已实现碳中和运行,74.3%的进水 COD 以剩余污泥的形式进入污泥处理单元,具有良好的产气潜力,产出的甲烷用于 CHP。2008 年,该厂又通过厨余垃圾与污泥的共消

化提升产气量,能量补偿率达到 123.0%,2009 年又进一步提升至 144.0%,至 2014 年已接近 200.0%,不仅满足自身的电能需求,还能对外输出电能获得经济效益,实现污水处理厂向能源工厂的进化。

AB 工艺自 20 世纪 70 年代发展至今,国内外学者对以碳捕捉及碳源改向为基础的新型 AB 工艺进行研究,提出能量平衡或碳中和技术路线。目前已形成新型 AB 工艺,即“高效碳捕捉+主流厌氧氨氧化+高效厌氧消化”技术路线,如图 4 所示^[9]。A 段碳源浓缩提取工艺主要包括以生物絮凝为主要作用的 HRAS、化学强化一级处理(CEPT)、厌氧生物膜反应器(AnMBR)等。由于 A 段将污水中绝大部分 COD 通过“网捕截获”转移到能源化途径,导致进入 B 段的污水呈现低碳高氮特性,有机碳源严重缺乏,常规生物脱氮工艺无法有效去除总氮,因此 B 段未来的发展趋势是采用自养生物脱氮技术,如短程硝化-厌氧氨氧化技术,或主流厌氧氨氧化技术。

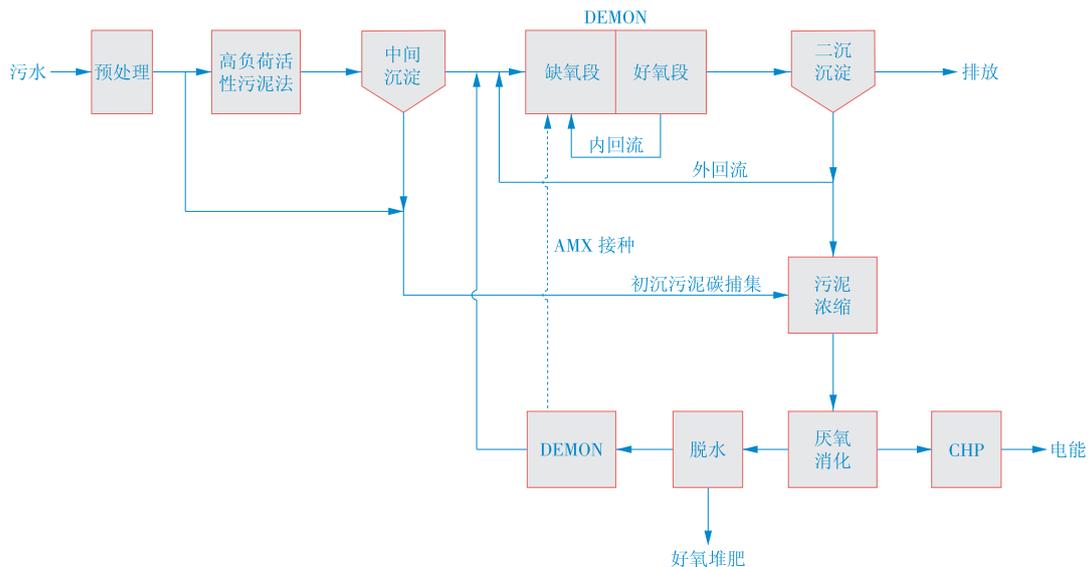


图4 基于碳捕捉-主流厌氧氨氧化的 AB 工艺流程

Fig. 4 Process flow of AB process based on carbon capture and mainstream anammox

3 基于 AB 工艺的污水处理厂能量分析

以 10 万 t/d 规模的污水处理厂为例,假设进水 COD 为 500 mg/L,采用 AB 工艺作为核心处理工艺,计算利用污水中 COD 的化学能可产生的电能与整厂消耗电能之间的关系。

CEPT 工艺能够捕获生活污水中 60.0% 以上的 COD^[10],因此如果选择其作为 A 段工艺,则进入 B 段的 COD 不足以支撑常规的反硝化和反硝化过程。根据反硝化反应的化学计量,需要 COD 为 2.86 g/m³ 才能对 1.00 g/m³ $\text{NO}_3\text{-N}$ 进行完全反硝化。只有短程硝化-反硝化或厌氧氨氧化过程可以满足 B 段的要求。数十年来,CEPT 工艺已广泛应用于处理生活

污水。大型污水处理厂通过 CEPT 可以去除多达 80.0% 的总悬浮物(Total Suspended Solid, TSS)和 60.0% 的 COD。与传统的初沉池设计相比,CEPT 产生的污泥量增加了近 45.0%,其中 33 个百分点是由于 CEPT 工艺提高了固体捕获率。富含有机物的 CEPT 污泥更适合通过厌氧消化产生沼气。

由于 CEPT 工艺去除可溶性 COD 的能力很差,即几乎所有可溶性 COD(约占污水中 COD 总量的 30.0%)都可以进入 B 段。这意味着进入 B 段的可溶性 COD 将足够高并抑制厌氧氨氧化过程,因此将短程硝化-反硝化作为 B 段工艺更为合理。

基于以上分析,可采用 CEPT 和短程硝化-反硝化作为 AB 工艺的配置,此过程 COD 如图 5 所示。

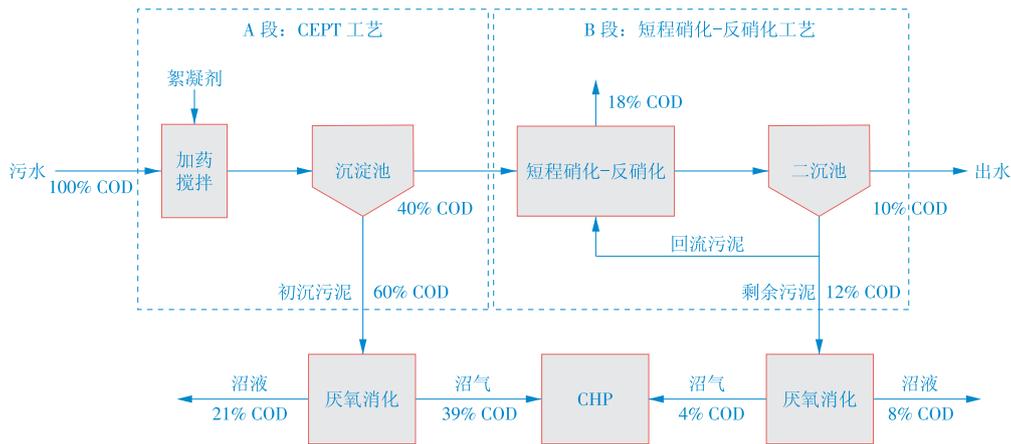


图 5 基于 CEPT 及短程硝化-反硝化 AB 工艺的 COD 流量

Fig. 5 COD flow based on CEPT and short-cut nitrification-denitrification AB process

污水所含生物能发电量的计算方法见表 1。以 10 万 t/d 的污水处理厂为例,假设进水的 COD 为 500 mg/L,则每天进水总量所含的总化学能约为 2.250×10^5 kW·h。由图 5 可知,共有 43.0%(即 A 段 39.0%+B 段 4.0%)的 COD 通过厌氧消化转化为甲烷,这部分蕴含的能量约为 0.970×10^5 kW·h。由于只有大约 35.0%的甲烷化学能可以通过 CHP 燃烧转化为电能,计算得总发电量约 0.340×10^5 kW·h,折算到每立方米污水发电量约为 0.340 kW·h。

表 1 以处理规模 10 万 t/d 的污水处理厂为例污水所含生物能发电量的计算方法

项目	COD 比例/%	能量/(kW·h)	计算过程
污水进水	100.0	2.250×10^5	$(500 \times 10 \times 10^4 \times 16.2) / 3 \ 600$
通过厌氧系统产生甲烷	43.0	0.970×10^5	$2.250 \times 10^5 \times 43.0\%$
甲烷通过 CHP 的发电量		0.340×10^5	$0.970 \times 10^5 \times 35.0\%$
每 m ³ 污水的发电量		0.340	$(0.340 \times 10^5) / (10 \times 10^4)$

注:假设 1 m³ 污水的质量为 1 t。

图 6 为 Yang 等^[11]2006 年对国内各种污水处理工艺能耗的调查结果,通过对 520 座采用不同工艺的污水处理厂进行统计分析,吨水能耗为 0.219~0.340 (kW·h)/t,其中能耗最低的是 AB 工艺。

表 1 可知,采用 AB 工艺+CHP 方案,每 t 污水的发电量约 0.340 kW·h,也就是说,污水处理厂通过采用该工艺的发电量可以满足全厂的用电需求。

4 污水处理厂的其他能量回收方式

通过理论计算可以得出,当污水中的 COD 达到 500 mg/L 时,仅利用污水中所蕴含的化学能就可以满足污水处理的能量自持。但由于目前我国大多



图 6 国内各种污水处理工艺吨水能耗

Fig. 6 Energy consumption per ton of wastewater treated by various wastewater treatment processes in China

数地区仍采用合流制或混流制的排水管网,导致污水厂进水的 COD 难以达到这一数值,因此需要挖掘更多其他形式的能源潜力。

市政污水具有流量稳定、水量充足、带有余温等特点使其具有巨大的热交换潜力,可通过在污水处理厂引入水源热泵技术加以利用。此外,污水处理厂生物处理单元、初沉池、二沉池等具有庞大的表面积,这就为利用光伏发电创造了必要条件。

根据模拟计算的结果,污水处理厂 1 t 出水的温度如果降低 1 ℃,水源热泵回收的热量等效于产生 0.260 kW·h 电能的燃煤消耗^[12]。难点在于,虽然水源热泵产生的能量较高,但污水所含余温热能只能通过水源热泵转换为约 60 ℃的低品位热源,不能直接用于发电,只能就近(有效输送半径为 3~5 km)通过热交换直接利用其中的热或冷。目前国内外污水余温热能利用多为原位利用,应用规模有限^[13]。

污水处理厂利用光伏发电可以直接获取电能。如北京的几座大型污水处理厂,每万 t 污水处理规模可供铺设光伏发电设备的反应池表面积为 1 147~1 576 m²^[12]。如北京良乡卫星城污水处理厂的光伏建筑一体化电站,峰值容量为 674 kW,投运后日均发电量约 1 450 kW·h,折合处理 1 m³ 污水可发电约

0.036 kW·h^[14]。郝晓地等^[15]计算了北京某污水处理厂光伏发电的能源补给潜力占总能耗的10.4%。

由于太阳能的随机性和季节性,光伏发电系统输出功率呈现波动性。白天光照强,光伏出力呈单峰变化,为运行提供电能;夜间光照不足,可利用污水厌氧消化产生的沼气来满足厂区供电需求^[16]。

综上所述,可以得到污水处理厂实现能量自持的路径如图7所示,即以通过厌氧消化利用剩余污泥的化学能为主,以水源热泵和光伏发电为辅。

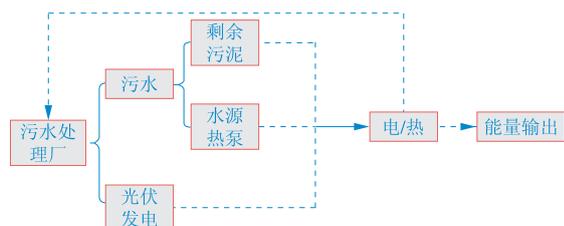


图7 污水处理厂实现能量自持的路径

Fig. 7 Path of energy self-sustaining in sewage treatment plant

5 结论

目前,我国污水处理行业碳排放量占全国总排放量的1.0%~3.0%,在碳中和的大趋势下,需要充分挖掘污水中蕴含的潜能,实现污水处理的能量自持。

(1)污水中COD对有机物含有大量化学能,COD为1 mg/L时每m³污水含化学能约16.2 kJ/g,是污水能源利用的主要途径。以污水处理厂进水COD为500 mg/L为例进行理论计算,基于AB工艺+厌氧消化+CHP发电工艺路线,每t污水的发电潜能约为0.340 kW·h,可实现污水处理的能量自持。目前该工艺路线推广的主要难点在于B段工艺,即在主流实现短程硝化-反硝化或者厌氧氨氧化的设计和运行调试难度较大。

(2)除利用污水中的化学能发电之外,引入水源热泵也是实现污水处理碳中和的重要补充。难点在于,污水所含余温热能只能通过水源热泵转换为约60℃的低品位热源,不能直接用于发电,限制了该技术的应用和推广。

(3)基于商业化光伏太阳能板的发电效率,污水处理厂利用光伏发电可补偿约10.0%的能耗,可作为污水处理碳中和技术路线的重要补充。

参考文献:

[1]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.

- [2]郝晓地. 污水处理碳中和运行技术 [M]. 北京:科学出版社,2015.
- [3]HEIDRICH E S, CURTIS T P, DOLFING J. Determination of the internal chemical energy of wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45 (2) : 827-832.
- [4]宋晓雅. 污泥热水解厌氧消化与常规厌氧消化的运行比较[J]. 给水排水, 2019, 45(3):26-30.
SONG Xiaoya. Comparison of operation between thermal hydrolysis anaerobic digestion and conventional anaerobic digestion [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (3):26-30.
- [5]WERF. Energy production and efficiency research-the roadmap to net-zero energy [M]. Alexandria: WERF, 2010.
- [6]代文臣. 提高碳捕集率和强化产能的城市污水资源化工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [7]WAN J F, GU J, ZHAO Q, et al. COD capture: A feasible option towards energy self-sufficient domestic wastewater treatment [J/OL]. Scientific reports (2016-04-28) [2021-06-05]. <https://www.nature.com/articles/srep25054>.
- [8]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.
- [9]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.
- [10]WANG H T, LI F T, KELLER A A, et al. Chemically enhanced primary treatment (CEPT) for removal of carbon and nutrients from municipal wastewater treatment plants: A case study of Shanghai [J]. Water Science and Technology, 2009, 60(7): 1803-1809.
- [11]YANG L, ZENG S, CHEN J, et al. Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants [J]. Water Science and Technology, 2010, 62(6):1361-1370.
- [12]宫徽. 污水厂碳中和运行潜力待挖掘[N]. 中国环境报, 2016-08-02(10).
- [13]郝晓地,饶志峰,李爽,等. 污水余温热能蕴含着潜在碳交易额[J/OL]. 中国给水排水, (2021-01-19) [2021-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.2021011>

9.0911.002.html.

HAO Xiaodi, RAO Zhifeng, LI Shuang, et al. Potential carbon trading amount of thermal energy contained in wastewater [J/OL]. China Water & Wastewater (2021-01-19)[2021-06-05].https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20210119.0911.002.html.

[14] 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.

[15] 郝晓地, 黄鑫, 刘高杰, 等. 污水处理“碳中和”运行能耗赤字来源及潜能测算[J]. 中国给水排水, 2014, 30(20): 1-6.

HAO Xiaodi, HUANG Xin, LIU Gaojie, et al. Energy deficits and their potential replenishments of wastewater treatment operation towards carbon neutral [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(20): 1-6.

[16] 孙振宇, 沈明忠. 基于工业厂区的多能互补系统在微能源网的应用[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 46-48.

SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong. Application of multi-energy complementary system in micro-energy network of an industrial plant [J]. Huadian Technology,

2019, 41(11): 46-48.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

梁远(1981—), 男, 河北唐山人, 高级工程师, 从事污水和污泥处理技术方面的研究及管理方面的工作。

付岩峰(1972—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 从事水处理及市政污水污泥处理技术研究及管理方面的工作。

方小锋(1976—), 男, 江苏泰兴人, 工程师, 从事污水处理行业管理工作。

成红燕(1967—), 女, 北京人, 正高级工程师, 从事发电厂水处理和环境工程技术方面的研究及管理工作。

孟春霖(1978—), 男, 湖北黄冈人, 高级工程师, 从事污水和污泥处理技术方面的研究及管理工作。

颜莹莹(1982—), 男, 福建泉州人, 高级工程师, 从事污水和污泥处理技术方面的研究及管理工作 (E-mail: yanyingying2018@163.com)。

陈北洋(1985—), 女, 天津人, 高级工程师, 从事污水和污泥处理技术方面的研究工作。