

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.002

污水余温热能蕴含着潜在碳交易额

郝晓地, 饶志峰, 李爽, 李季, 江瀚

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 碳交易市场的建立有效推动了碳减排实践。然而,目前在污水处理行业中碳交易市场似乎仅有化学能(甲烷/ CH_4)可被圈定,对含量巨大的潜在污水余温热能还没有涵盖,这就导致污水热能至今在我国还未大面积、大规模被有效利用。实际上,如果以污水处理出水作为水源热泵交换热源,其产生的碳交易额不容小觑。以北京为例,处理规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂出水热泵交换 1~3 次热量,每年可带来的碳额交易利润高达 0.6~1.95 亿元/a,且日后碳额交易价格还会逐年攀升。同时,在碳交易机制下,污水处理出水热能集中利用,特别是用于污泥低温干化可以凸显污水余温碳额潜能以及污泥焚烧发电所带来的额外碳交易额。因此,将污水热能列入政府“核证减排量(CERs)”,使之进入碳交易市场便会一举两得,既能帮助污水处理厂间接(通过能量输出与能量交换)实现“碳中和”运行目标,还能帮助污水处理厂“扭亏为盈”,使环境、经济、社会效益有效统一。

关键词: 污水处理; 化学能; 余温热能; 核证减排量; 碳额交易; 碳中和

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0007-07

Potential Carbon Trading Volume of Thermal Energy Contained in Wastewater

HAO Xiao-di, RAO Zhi-feng, LI Shuang, LI Ji, JIANG Han

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Establishing the carbon trading market has effectively promoted the practice of carbon emission reduction. However, only chemical/organic energy (methane/ CH_4) has been certificated in the sector of wastewater treatment, and a potential huge volume of thermal energy has not been involved. As a result, thermal energy has not yet been utilized widely in China. If the effluent from wastewater treatment plants (WWTPs) is applied as a thermal source of water source heat pump (WSHP) in practice, it may hold a remarkably high carbon trading volume. For a WWTP with the capacity of $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ in Beijing, the annual carbon trading profit could reach to as high as 60–195 million yuan/a, if the thermal energy may exchange for 1–3 times by WSHP. Moreover, the price of carbon trading will still continue to increase in the future. Besides, under the carbon trading principles, the centralized utilization of heat energy from WWTPs' effluent, especially for low-temperature drying of sludge, could also magnify the potential of carbon trading of thermal energy, leading to an extra volume of carbon trading due to the electricity generation of sludge incineration. In addition, if the thermal energy is listed as “Certified Emission Reductions (CERs)” by governments and permitted to enter the carbon trading market, this action would create a double win, which not only helps WWTPs realize indirect carbon-

neutral operation (via energy output and/or energy exchange) but also makes WWTPs “turn losses into gains”. Thus, at the same time, the environmental, economic and social benefits could be efficiently realized.

Key words: wastewater treatment; chemical energy; thermal energy; certified emission reductions (CERs); carbon trading volume; carbon neutral

为缓解全球变暖趋势,控制 CO₂ 等温室气体排放已成为国际组织、各国政府乃至全社会的共识^[1]。《巴黎协定》正式生效之后,污水处理厂碳减排亦受到相当重视,“碳中和”已成为污水处理厂运行所追求的终极目标^[2]。评估表明,污水中的化学能一般难以满足碳中和运行目标,需要考虑利用污水中余温热能才能弥补能量赤字,且仍有大量剩余热能(污水中可利用的热能为所含可利用化学能 9 倍之多)^[1]。污水所含余温热能是一种低品位能源,不能用于发电,只能就近(有限输送半径为 3~5 km)通过热交换(经水源热泵)直接利用其中的热或冷^[1]。国内外污水余温热能利用多为原位利用,应用规模有限^[3];在碳交易机制推动下,污水余温热能可作为清洁能源,其规模化开发利用潜藏巨大的碳交易额。因此,污水热能开发利用需要政府政策扶持以及碳交易市场准入制度。否则,污水中蕴含的巨大清洁热能只能任其散失。基于此,首先通过对碳交易机制的总结,分析污水余温热能利用对碳交易的潜在贡献,并提出余温热能在碳交易市场中的可行利用方式。其次,从案例污水厂处理出水余温热能一次提取与多次提取两种情形对余温热能可抵碳额进行估算比较。同时,从余温热能利用对碳减排作用,分析其应有的碳交易潜力。最后,指明在碳交易机制下污水余温热能利用技术方向与前景。

1 碳交易与余温热能

1.1 碳交易机制

“将大气中温室气体含量稳定在一适当水平,

进而防止剧烈气候变化对人类造成伤害”是《京都议定书》提出的根本目标,为此规定需要控制 6 种温室气体排放:二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)以及六氟化硫(SF₆)。在这一规定的压力之下,一种通过市场调控温室气体减排的政策手段——碳排放权交易出现,即,碳排放权就如同“商品”一样可以进行交易。政府是碳排放权初始拥有者,通过科学、合理的分配方案将碳排放权(碳配额)定量分配给排放单位;拥有碳配额的排放单位可向环境排放规定的限额温室气体,亦可以不排放而在碳交易市场中出售所拥有的碳配额^[4]。

自全球首个碳排放交易体系——欧盟碳排放交易体系(European Emission Trading Scheme, EUETS)建立以来,到目前为止已存在遍布四大洲的 31 个碳交易系统。其中全球主要的碳交易市场如表 1 所示^[4]。随着越来越多的国家考虑采纳碳交易机制作为碳减排的政策工具,碳交易机制已经逐渐成为应对全球气候变化的重要政策手段。通常,排放单位实际碳排放量往往会超过其碳配额,而超出的碳排放可通过碳交易市场购买(购买不排、少排单位的碳配额),亦可以通过开展碳减排技术改造实现排放单位碳排放量减少而获得核证减排量(Certified Emission Reductions, CERs;国内为 Chinese Certified Emission Reductions, CCERs),以此抵消部分超额碳排放。

碳排放交易原理见图 1。

表 1 全球主要碳交易市场

Tab. 1 Main carbon markets in the world

交易市场	启动时间	交易主体	类型
欧盟排放交易体系(EUETS)	2005 年	欧盟各国排放个体	强制,配额
美国区域温室气体减排计划(RGGI)	2005 年	美国东北部 10 个电力企业	强制,配额
西部气候倡议(WCI)	2007 年	美国西部 5 州、加拿大 4 省及墨西哥部分州内企业	强制,配额
联合履约机制(JI)	2008 年	发达国家之间	强制,项目
清洁发展机制(CDM)	2008 年	发达国家与发展中国家之间	强制,项目
国际排放交易(AAUs)	2008 年	发达国家之间	强制,配额
中国碳交易体系(ETS)	2017 年	发电行业	强制,配额

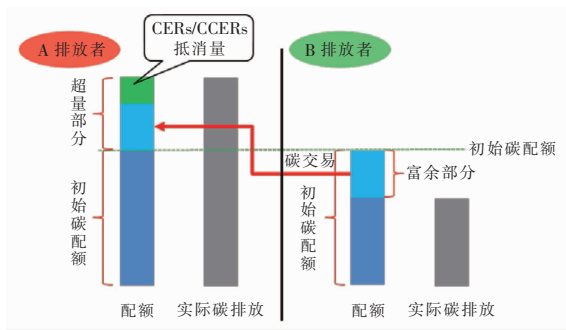


图1 碳排放交易原理

Fig.1 Principles of carbon emission trading

一方面,碳排放单位可通过技术改造提高其能源利用效率,或使用非化石清洁能源调整其能源结构来实现碳减排,由此而产生富余碳配额。排放单位因此可向政府申请 CERs,每单位 CERs 相当于 $1 \text{ t CO}_2 - \text{eq}$;所有 CERs 均可抵消碳配额超出碳排放部分,多出的 CERs 亦可用在碳交易市场进行交易,从而为排放单位带来经济收益。

目前,清洁发展机制(CDM)下的 CERs 抵消已成为国内外碳交易市场的重要组成部分。CDM 是《京都议定书》确定的一个基于市场原则的灵活机制,其核心内容是允许缔约方(发达国家)与非缔约方(发展中国家)开展合作,从而在发展中国家实施碳减排项目。CDM 项目包括能源效率(节能)、替代燃料、新能源与可再生能源、植树造林和 CO_2 固存等五大类型。

其实,污水处理领域存在较多 CDM 项目机会,例如,运行优化产生的节能降耗可间接减少温室气体排放,污泥厌氧消化产生的甲烷(CH_4)发电亦可间接减少厂外发电导致的间接温室气体排放,污水余温热能利用亦可减少化石燃料加温需要^[1]。然而,大多数国内外与污水处理相关 CDM 项目减排均聚焦于通过污泥厌氧消化对污水有机能(CH_4)进行回收,很少有针对污水余温热能回收而实现 CDM 下的 CERs 案例。事实上,污水中余温热能较 COD 所含有机能实际可转化利用量更大,它们分别为污水可利用总能量的 90% 和 10%^[1]。早在 20 世纪七八十年代,欧洲国家及日本就已着手利用污水(出水)热能^[3]。近年我国部分城市亦有利用污水余温热能的个别案例^[3],一方面是因为缺乏政府鼓励与扶持政策,另一方面还未能依靠碳交易市场予以驱动。

1.2 余温热能利用应纳入碳交易机制

污水余温约占城市总废热排放量的 40%^[1],且

污水四季水温波动不大、流量大而稳定。然而,被热泵交换出的热能温度一般为 $50 \sim 80^\circ\text{C}$,属于低品位能源,不能用于发电,只能被就近(受限于热损失)直接利用^[1]。但无论如何,污水余温热能利用应该被列入碳交易机制下的碳减排清单。

CDM 碳减排项目认定过程中虽还未列出余温利用方法,但根据余温热能特性,完全可以套用 CDM Methodologies Booklet 中的相关方法,如 AM0072、AM0058、AMS - III. Q、AMS - II. E. 等。参考和借鉴这些相关方法,可以勾勒出碳交易机制下的污水余温热能利用方式,如图 2 所示。显然,污水余温热能作为一种可再生清洁能源,经热泵交换后用于供暖、制冷完全可作为一种新的供暖/制冷系统,以节省传统能源。

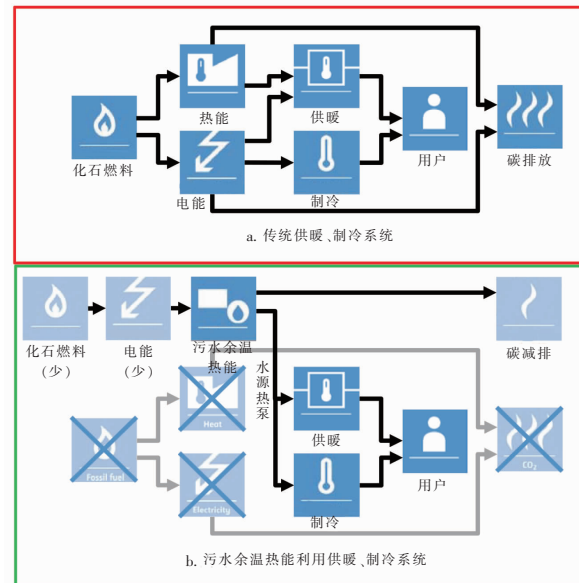


图2 碳交易机制下污水余温热能利用方式

Fig.2 Schematic process of wastewater thermal energy utilization in the framework of carbon emission trading

2 余温热能潜在 CERs 计算

2.1 余温热能碳额计算公式

水源热泵提取的热量与化石燃料燃烧产生热量可以视为等同,这样便可大大减少化石燃料使用量,因此会带来巨额碳减排量。制冷时水源热泵同理可以替代传统空调,亦可实现可观碳减排量,只不过水源热泵制热(COP 为 $1.77 \sim 10.63$)与制冷(COP 为 $2.23 \sim 5.35$)时的能效比(COP)略有不同而已^[2]。余温热能用于供热时,碳减排量由两部分组成:一部分是水源热泵交换出的热能替代化石燃料燃烧产热

所带来的碳减排量,另一部分则是在运行过程中消耗电能而增加的间接碳排放,两者之差即为余温热能用于供热时的碳减排量;余温热能用于制冷时,碳减排量则来源于所减少的电能使用。

水源热泵理论碳减排量(碳额)可根据等量燃煤锅炉以及空调消耗的化石能源碳排放量计算^[5]:

$$A_{H/C} = A \pm \frac{A}{COP_{H/C} \pm 1} \quad (1)$$

$$M_{CO_2, H/C} = A_{H/C} \times \left(\frac{1}{\alpha_{H/C}} - \frac{1}{\delta \times COP_{H/C}} \right) \times EF_{CO_2} \quad (2)$$

式中: $A_{H/C}$ 为热泵理论供热量/制冷量, kJ/m^3 ; A 为污水余温可利用的热量,与提取温差有关^[1], kJ/m^3 ; $COP_{H/C}$ 为水源热泵供热/制冷能效比,供热时为 1.77 ~ 10.63,取 3.5,制冷时为 2.23 ~ 5.35,取 4.8^[2]; $M_{CO_2, H/C}$ 为热能利用碳减排量(下标 H/C 分别为供热/制冷工况), $\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{m}^3$; $\alpha_{H/C}$ 为当热能利用用于供热时, α_H 为燃煤锅炉房供热效率(同时考虑管网输送效率),一般为 55% ~ 75%,取 60%^[6],当热能利用用于制冷时, $\alpha_C = \delta \times COP_A$, COP_A 为空气源热泵制冷能效比,一般为 2.8 ~ 3.4,计算取 3.4^[7]; δ 为热电转化效率(同时考虑电能输送损失),一般为 35% ~ 50%,取 35%^[8]; EF_{CO_2} 为燃煤 CO_2 当量排放因子,取 96.10 $\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{GJ}$ ^[9]。

余温热能碳额计算时,水源热泵提取温差取 4 $^{\circ}\text{C}$,则水源热泵供热/制冷量分别为 23 408 kJ/m^3 和 13 837 kJ/m^3 ,理论供热/制冷碳额 M_{CO_2} 分别为 1.91 与 0.33 $\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{m}^3$ 。

2.2 实例污水厂计算与分析

污水余温热能利用碳额与水量以及是否能多次提取有关。因此,以规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的北京市政污水处理厂为案例,计算其出水余温热能利用潜在碳额,同时分析多次提取后碳额的变化趋势。

2.2.1 一次提取碳额

当水源热泵提取温差为 4 $^{\circ}\text{C}$ 时,污水处理出水热能提取一次后,供热/制冷碳额分别为 1 910 和 330 $\text{tCO}_2 - \text{eq}/\text{d}$,相当于 1 910 个与 330 个 CERs。按照 9 个月供热、3 个月制冷计算,全年实际碳额为 $54.5 \times 10^4 \text{ tCO}_2 - \text{eq}$ 。然而,若全年供热(用于污泥低温干化)时,碳额可高达 $69.7 \times 10^4 \text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$ 。

不同地区试点碳交易价格不尽相同,北京等大城市碳价最高。根据中国碳排放交易网的数据,北

京目前为 80 ~ 100 元/ $\text{tCO}_2 - \text{eq}$,高于全国水平约 1 倍。按 90 元/ $\text{tCO}_2 - \text{eq}$ 碳价计算,规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的案例污水厂出水余温热能一次提取最大可获得碳额(供热工况)市场价值 $\geq 6\,000$ 万元/a。

2.2.2 多次提取碳额

出水若只经水源热泵提取一次热能,出水中仍含有大量剩余热能;只要出水温度接近受纳水体温度(最佳生态出水温度^[10]),实际上出水可进行多次热交换提取碳额。以北京为例,夏季地表水平均温度 $T = 23 \sim 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$,而冬季 $T = 0 \sim 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11];夏季出水温度 $T = 22 \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季 $T = 10 \sim 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。当水源热泵提取温差为 4 $^{\circ}\text{C}$ 时,出水余温热能在夏季可提取 2 次,而冬季则可提取 2 ~ 3 次。

此外,在多次提取过程中热泵进水温度发生了变化,导致热泵系统 COP 有所改变;供热工况下,机组 COP 随进水水温下降有明显下降趋势,进水温度每降低 1 $^{\circ}\text{C}$,系统 COP 降低 2.0% ~ 2.6%^[12];制冷工况下,机组 COP 随进水水温上升亦有明显下降趋势,污水进水温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$,系统 COP 会降低 2.5% ~ 3.0%^[13]。出水余温热能用于供热/制冷时,多次提取碳额计算结果见表 2。

表 2 出水余温热能多次提取碳额计算结果($Q = 100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

Tab. 2 CERs of effluent thermal energy by multiple utilization ($Q = 100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)

项目	供热			制冷	
提取次数/次	1	2	3	1	2
进水温度/ $^{\circ}\text{C}$	16 ^a	12	8	22 ^a	26
出水温度/ $^{\circ}\text{C}$	12 ^b	8	4	26 ^b	30
COP	3.5	3.2 ^c	2.8 ^c	4.8	4.3 ^c
碳额/($\text{tCO}_2 - \text{eq} \cdot \text{d}^{-1}$)	1 910	1 790	1 640	326	234
总碳额/ ($\text{tCO}_2 - \text{eq} \cdot \text{d}^{-1}$)	5 340			560	

注: ^a指供热工况下,取出水温度(热泵初次进水温度) $T = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$;制冷工况下,取出水 $T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。^b指出水经水源热泵提取热能之后,水温降低/升高,数值与提取温差有关。本研究提取温差为 4 $^{\circ}\text{C}$,则在供热工况下,出水可实现 3 次热能提取,水源热泵最终出水温度可降低至 4 $^{\circ}\text{C}$;而在制冷工况下,出水可实现 2 次热能提取,热泵最终出水温度会升至 30 $^{\circ}\text{C}$ 。^c指机组 COP 随进水温度变化而变化,进水温度每变化 1 $^{\circ}\text{C}$,机组 COP 降低 2.0% ~ 3.0%,即,机组 COP 较前一次提取降低 10% ~ 12%,取 10%。

表 2 结果表明,出水余温热能多次提取后碳额较一次提取碳额翻倍。规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水厂其出水余温热能经 3 次提取后可得最大总碳额

为 5 340 tCO₂ - eq/d (供热工况), 每年获得 195 万个 CERs, 带来高达 1.56 ~ 1.95 亿元/a 的碳市场价值。

3 余热能碳交易市场潜力分析

3.1 碳交易市场发展趋势及相关政策

随着各个国家、地区碳减排量需求提高以及碳市场日益完善, 碳市场涵盖的碳排放量与日俱增, 碳市场体量及价值稳定上升。在中国碳交易市场建立之后两者变化尤为明显, 且在未来仍有不断攀升的趋势, 如图 3 所示。

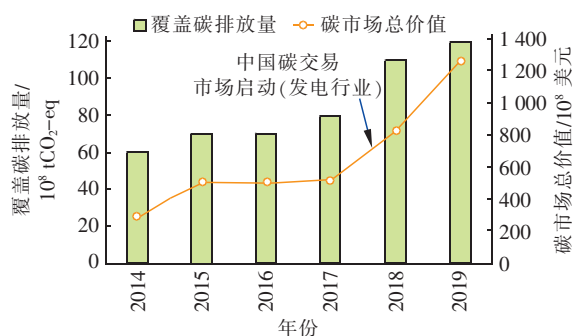


图3 全球碳定价政策总价值与所覆盖的碳排放量变化

Fig. 3 Total value of global carbon pricing initiatives and changes in carbon emissions

虽然目前全球主要碳交易市场涉及的行业仍集中于能源密集型产业、发电行业和航空业, 但是, 已经出现诸多国家和组织将目光投向更多行业的迹象。在欧洲, 欧盟强推《欧洲绿色新政》这一长期发展战略, 旨在应对气候与环境挑战, 以实现欧洲“碳中和”目标。《欧洲绿色新政》碳中和目标贯穿欧盟所有政策领域, 将涉及能源、工业、生产与消费、基础设施、交通、粮食和农业、建筑、税收和社会福利等领域, 尤其针对工业、能源、建筑业等高碳排放行业。为此, 欧洲国家须提高碳减排力度, 扩大减排范围、加快减排进程, 这就给欧洲地区碳交易市场交易体量、规模、碳定价等方面带来了新的发展契机。

在国内, 目前全国碳排放交易体系正处于快速发展阶段, 《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》中提出, 以发电行业为突破口率先启动全国碳排放交易体系, 分阶段逐步扩大碳交易市场覆盖范围。在此期间, 生态环境部不断完善《碳排放权交易管理暂行条例》, 将充分利用市场机制控制温室气体排放, 以推动全国碳市场的建设和发展。

3.2 余热能市场潜力

污水处理厂在运行过程中会直接或间接产生以

CO₂、CH₄ 和 N₂O 为主的 3 种温室气体^[14], 因此, 污水处理厂被视为温室气体来源之一。污水处理虽然是国民经济中规模较小的行业, 但却属于能源密集型高能耗行业, 其碳排放量占全社会总排放量的 1% ~ 3%^[15]。随着中国城镇化建设加快、城镇人口数量增加以及国家对环保重视程度提高, 污水处理总量与处理率会持续上升, 更多温室气体将通过污水处理厂释放到大气中。

碳减排将是污水处理行业未来发展的“必由之路”, 污水处理行业今后无疑会纳入碳交易市场。虽然污水处理厂自身存在诸多节能降耗实现碳减排的方法^[15], 但这些方法往往“事倍功半”。若能转变思路, 通过回收利用污水余热能可实现更多碳减排量, 从而使污水处理厂运行走向“碳中和”目标。

未来, 碳市场将趋于稳定。国家碳排放达到峰值后, 中国预计碳价在 2025 年为 75 元/tCO₂ - eq, 2030 年升至 116 元/tCO₂ - eq, 最终在 2050 年达到 186 元/tCO₂ - eq。与此同时, 污水余热能利用碳额碳市场价值会成倍增加, 到 2050 年, 案例污水厂($Q = 100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)碳额市场理论价值将超过 3.6 亿元/a。

在碳交易市场机制下, 污水余热能利用完全可借助以下模式实施: 污水处理行业纳入碳交易体系或是通过开发相关 CDM 项目获得相应 CERs; 同时, 需要政府部门通过相关政策、法规完善碳交易机制, 助力污水余热能在碳市场推动下开发利用, 实现经济、环境双重效益。

4 碳交易机制下污水余热能利用

污水余热能利用有原位利用(管道原位利用、居家原位利用)和集中利用(处理出水利用)两种方式, 目前国内外污水余热能利用以原位利用为主^[3]。污水余热能原位利用存在水源热泵换热器结垢、堵塞、腐蚀等诸多问题, 亦存在冬季线上大规模利用导致对集中式污水处理不利现象^[3]。污水处理后利用出水热交换则可以避免这些问题; 同时, 集中利用出水热能可形成规模, 便于市政供热统一规划利用, 并充分发挥日后纳入碳排放交易机制下的碳额结算。今后当污水余热能利用纳入碳排放交易机制后, 对分散式原位直接利用污水热能应明确不计入碳额。否则, 星罗棋布的分散式热交换系统不仅投资高、占地多, 关键是在冬季还会严重影响集中式市政污水处理厂的运行。

污水处理厂作为“能源工厂”,利用污水/出水热能交换早已不是技术难题。在荷兰等欧洲国家早已存在规模工程应用案例,用作空调热/冷源、区域供热、工业水冷却、温室加温等。然而,这种热能利用方式受限于传输距离(3~5 km),整个市政范围利用受到限制。结合未来剩余污泥处理、处置将走向污泥焚烧的趋势^[16],利用出水余温热能(50~80℃)低温干化污泥将具有广泛利用前景。确实,可以通过分散式干化、集中式焚烧(邻避效应)在污水处理厂内利用低品位热能干化污泥;将干化污泥以最大减量方式运送至焚烧厂集中焚烧后产生的高温热能则可以用于发电。这样就相当于将出水低温热能转变为可以发电的高温热量,实现低品位热能向高品位热能的“华丽转变”,从而获得因污泥发电而应有的更多额外(相对于厌氧消化产 CH_4 ^[1])碳交易额。

5 结语

污水中热能含量巨大,对其有效利用才有可能使污水处理运行实现“碳中和”目标。然而,在我国对污水热能利用的案例不多且均为规模较小的线上原位利用,远不足以发掘其全部潜能。这是因为我国目前还没有把污水热能开发列为可有效降低碳排放量的清洁能源,热能利用还未进入已建立的碳交易市场清单,因此会导致污水热能利用往往得不偿失。

事实上,污水中热能存在着潜在“核证减排量(CERs)”,一旦被政府获准进入碳交易市场清单,热能利用所带来的碳交易额则是巨大的。以北京为例,日处理量百万吨级污水厂出水经水源热泵集中利用,一次热量交换即可带来6 000万元/a的碳额交易利润;亦可二次甚至三次热量交换,这将使碳额交易利润达1.56~1.95亿元/a。况且,碳交易价格还会不断攀升,这将给污水厂带来丰厚的经济收益。

污水处理出水热能集中利用除满足污水处理厂自身及周边公建/民建供热、制冷需要外,亦可为周边农业大棚供暖,特别是还能为污泥焚烧前干化提供低温干化热量。这些低温热能利用场合可以“能源交换”方式间接帮助污水处理厂实现碳中和。

参考文献:

- [1] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74–77.
- [2] HAO X D, LIU R B, HUANG X. Evaluation of the potential for operating a carbon neutral WWTP in China[J]. *Water Research*, 2015, 87: 424–431.
- [3] 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 (in Chinese).
- [4] 雷立钧, 荆哲峰. 国际碳交易市场发展对中国的启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(4): 30–36.
LEI Lijun, JING Zhefeng. Development of international carbon market and its enlightenment for Chinese carbon market construction[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(4): 30–36 (in Chinese).
- [5] 尹军, 韦新东. 城市污水热能利用系统对减轻大气污染的作用[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(10): 36–38.
YIN Jun, WEI Xindong. Effect of municipal sewage thermal energy utilization system on reducing air pollution[J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(10): 36–38 (in Chinese).
- [6] 韩伟国, 江亿, 郭非. 多种供热供暖方式的能耗分析[J]. *暖通空调*, 2005, 35(11): 106–110.
HAN Weiguo, JIANG Yi, GUO Fei. Energy consumption analysis of several kinds of heating systems[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2005, 35(11): 106–110 (in Chinese).
- [7] 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.
- [8] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明, 等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3787–3794.
YANG Qianpeng, LIN Weijie, WANG Yueying, *et al.* Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3787–3794 (in Chinese).
- [9] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: IGES, 2006.
- [10] 于媛. 北京市浅层地温能开发利用地质环境影响评价参数研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
YU Yuan. A Study of the Evaluation Parameters of Geological Environmental Impact on the Development and Utilization of Shallow Geothermal Energy in Beijing

- [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014 (in Chinese).
- [11] 高程, 黄满荣, 陶爽, 等. 北京城区不同水质水体可培养细菌数量的季节动态变化[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1157-1163.
- GAO Cheng, HUANG Manrong, TAO Shuang, *et al.* Seasonal dynamics of culturable bacterium numbers in freshwater bodies of different water quality in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1157-1163 (in Chinese).
- [12] 刘芳, 邢凯泽, 张群力, 等. 直接式污水源热泵系统运行性能研究[J]. 区域供热, 2018(4): 52-57, 142.
- LIU Fang, XING Kaize, ZHANG Qunli, *et al.* Study on operation performance of direct wastewater source heat pump system [J]. *District Heating*, 2018(4): 52-57, 142 (in Chinese).
- [13] ZOU S H, XIE X K. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 201-207.
- [14] HWANG K L, BANG C H, ZOH K D. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 881-884.
- [15] 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, 43(3): 1-3, 73.
- WANG Hongchen. Analysis on carbon emission reduction path of urban wastewater treatment industry in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(3): 1-3, 73 (in Chinese).
- [16] HAO X D, CHEN Q, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Sustainable disposal of excess sludge: incineration without anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2019, 170: 115298.
-
- 作者简介:** 郝晓地 (1960 -), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊《Water Research》区域主编 (Editor)。
- E-mail:** haoxiaodi@bucea.edu.cn
- 收稿日期:** 2020-08-29
- 修回日期:** 2020-09-04

(编辑: 丁彩娟)

(上接第6页)

3 结论

针对我国污水高标准处理的提标建设需求, 构建了具有普适性的“四位一体”精准诊断技术方法, 并在大规模污水处理厂提标改造诊断评估工作中得到成功应用。实践证明, 该方法具有较强的适用性和可操作性, 为我国城镇污水处理系统提标建设及精细化运行管理提供了系统技术支撑。

参考文献:

- [1] 郑兴灿. 城镇污水处理厂一级 A 稳定达标技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- ZHENG Xingcan. Technology of Stable Reaching Class A Standard for Urban WWTP [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [2] 李鹏峰, 孙永利, 隋克俭, 等. 污水厂预处理系统跌水复氧对碳源的消耗及其对策 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 10-12.
- LI Pengfeng, SUN Yongli, SUI Kejian, *et al.* Consumption of carbon source by waterfall reoxygenation of pretreatment system in WWTP and countermeasures [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(7): 10-12 (in Chinese).
- [3] 孙永利, 李鹏峰, 隋克俭, 等. 内回流混合液 DO 对缺氧池脱氮的影响及控制方法 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 81-84.
- SUN Yongli, LI Pengfeng, SUI Kejian, *et al.* Impact of dissolved oxygen in internal reflux mixture on nitrogen removal in anoxic tank and its control measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 81-84 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 李鹏峰 (1981 -), 男, 河北新乐人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水环境治理规划、政策、指南等研究及技术设备研发工作。
- E-mail:** lipengfengtj@163.com
- 收稿日期:** 2021-03-15
- 修回日期:** 2021-04-12

(编辑: 丁彩娟)