

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.001

污水处理能源中和与碳中和案例分析

郝晓地¹, 张益宁¹, 李季¹, 刘杰²

(1. 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-荷未来污水处理技术研发中心, 北京 100044; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

摘要: 污水处理过程因高耗能以及直接温室气体排放,使得逼近碳中和运行势在必行。然而,污水处理多以追求能源中和(Energy neutrality)为目的,且常与碳中和(Carbon neutrality)概念混为一谈。通过欧洲3个不同污水处理厂实例,直观解释并说明能源中和与碳中和的不同。实际运行案例表明,实现能源中和并不意味着同时可以实现碳中和,而如果实现碳中和则可以认为也同时实现了能源中和。这是因为污水处理过程中除能源消耗的间接碳排放外,还会在处理过程中直接产生 N_xO 、 CH_4 、VOCs等温室气体(从COD转化的 CO_2 因大多为生源性,所以不计入碳排放清单)。此外,各种化学药剂(如碳源、除磷药剂等)的生产与运输过程也会间接产生 CO_2 等温室气体。厂外植树造林、风力发电、外源有机物厌氧共消化固然有助于污水处理厂实现碳中和,但这些方式并非污水处理厂分内之事,应该都是“伪中和”。其实,污水处理厂要想同时实现能源中和与碳中和,只有深入挖掘污水余热热能方能实现。

关键词: 污水处理; 能源中和; 碳中和; 温室气体; 厌氧消化; 余热热能

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0001-08

Case Analysis of Energy Neutrality and Carbon Neutrality for Wastewater Treatment

HAO Xiao-di¹, ZHANG Yi-ning¹, LI Ji¹, LIU Jie²

(1. 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; 2. Capital Eco-Pro Group, Beijing 100044, China)

Abstract: Due to the high energy consumption and direct greenhouse gases (GHGs) emission, carbon-neutral operation of wastewater treatment process has become imperative. However, energy neutrality of wastewater treatment plants (WWTPs) is often pursued, which is easily confused with the concept of carbon neutrality. With this study, three different European WWTPs are utilized to elucidate the difference between energy neutrality and carbon neutrality. The case studies indicate that achieving energy neutrality does not mean that carbon neutrality can be realized at the same time. Reversely, energy neutrality should be simultaneously realized if carbon neutrality is achieved. This is because there are also direct GHGs like N_xO , CH_4 , and VOCs during the treatment process (biogenic CO_2 converted from COD is not included in the carbon emission inventory), besides indirect carbon emissions from

energy consumption. Furthermore, both production and transportation of chemicals (such as carbon sources, chemical phosphorus agents, etc.) can indirectly generate GHGs. Afforestation, wind power, and anaerobic co-digestion with exogenous organics can certainly contribute to carbon neutrality for WWTPs, but these measures are usually conducted outside WWTPs so that they should be called as “pseudo-neutrality”. In fact, simultaneously achieving energy neutrality and carbon neutrality for WWTPs can be only accomplished under the condition of utilizing thermal energy.

Key words: wastewater treatment; energy neutrality; carbon neutrality; greenhouse gases (GHGs); anaerobic digestion; thermal energy

当今,能源中和被越来越多的污水处理厂提及;同时,污水处理实现碳中和也是大势所趋。能源中和与碳中和是否为同义语,可以相提并论吗?这个问题目前还比较模糊,需要借助碳中和热度以及碳中和实现路径予以厘清。

能源中和,顾名思义指污水处理厂减少自身能源消耗且能够在厂内外回收或产生一种或多种清洁能源,可以直接(电、热自用)或间接(产生能量并网)弥补污水处理厂自身能源消耗量,从而达到污水处理不依靠化石能源等(电、热)而实现能源自给自足。对污水处理厂而言,实现能源中和可采取以下措施:①减少污水处理自身能源消耗;②提高污水中能源回收效率;③寻找其他外部可再生能源^[1]。

相对而言,污水处理厂碳中和概念更为直观。它指的是,污水处理厂通过自身节能降耗或增加自身产能,或增加碳汇,使该污水处理厂碳减排量与碳排放量相互抵消。然而,污水处理厂碳排放构成较为复杂,分为直接碳排和间接碳排^[2]。直接碳排放表示污水处理厂在水处理过程中因有机物降解、氮转化过程产生的各种温室气体(主要指 CO_2 、 CH_4 和 N_2O)碳排放量。其中,直接碳排放中的 CO_2 (亦含少量化石碳成分)主要是生源性的,所以,一般并不计入碳排放清单^[3]。间接碳排放指的是污水处理厂消耗外部化石能源等(产电、产热)以及各种化学

药剂在生产和运输过程中产生的碳足迹。

显然,污水厂实现能源中和不等同于实现碳中和。能源中和仅意味着污水厂能耗实现自给自足,只抵消了间接碳排放量中的能耗碳足迹,而间接碳排放量中的药耗碳足迹以及直接碳排放中的 N_2O 、 CH_4 、VOCs等温室气体产生的碳排放量并未被抵消。反过来看,污水处理厂如果实现了碳中和,一般可认为同时可以实现能源中和。例如,污水余热热能潜力巨大,但属于不能直接发电利用的低品位能源,只能作为热/冷输出供热或制冷,污水厂仍然需要依靠外部电力;这种低品位能源(热/冷清洁能源)被厂外社会使用后可替代/弥补高品位能源(电、天然气等)的使用,进而减少社会大量碳排放,这些被节省的碳排放完全可以用来抵消污水厂的自身电耗碳足迹^[4]。换句话说,污水处理碳中和是间接实现能源中和,所供应社会的热/冷可被视为一种“碳汇”。

为此,通过3个欧洲实际案例分析来说明污水处理厂能源中和与碳中和的关系,解析高耗能污水处理向能源中和甚至是碳中和运行转变策略,以期为我国污水处理厂“双碳”目标提供参考。

1 德国 Bochum – Ölbachtal 污水处理厂

Bochum – Ölbachtal 污水处理厂位于德国北莱茵—威斯特法伦州鲁尔区波鸿市,处理规模 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,工艺流程如图1所示。

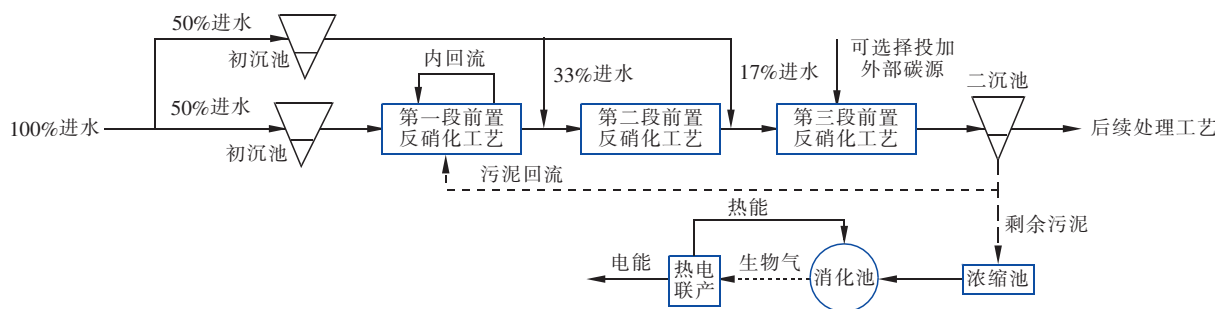


图1 Bochum – Ölbachtal 污水处理厂工艺简化流程

Fig. 1 Wastewater treatment process in Bochum – Ölbachtal WWTP

该厂进水 COD 为 380 mg/L、TN 为 56 mg/L、TP 为 6.5 mg/L,采用三段进水前置反硝化工艺,生化段出水采用化学药剂方式除磷,出水水质满足欧盟排放标准($TN \leq 13$ mg/L, $TP \leq 1$ mg/L)^[5]。

1.1 能源中和评价

Bochum – Ölbachtal 污水处理厂在 2013 年升级改造前, Ruhrverband 公司对其耗电情况进行了统计^[5](见表 1),结果表明,与德国《污水处理厂能源手册(MURL)》中的标准值相比,该厂生物处理阶段除曝气单元外,其他单元耗电量均远远超标,具有较

大的节能空间。为此,该厂对生物处理阶段进行升级改造,将原有单点进水改为三段进水,并只保留了第一段可控制开启/关闭的硝化液内回流管道(见图 1);同时优化了该厂其他设备。2015 年 Bochum – Ölbachtal 污水处理厂正式改造完成,改造后耗电情况^[5]见表 1。最终该厂总电耗由 34.6 kW · h/(PE · a)(折合吨水电耗 0.47 kW · h/m³)降低至 24.1 kW · h/(PE · a)(吨水电耗 0.33 kW · h/m³),能耗降低 30.3%。同时出水总氮也稳定在 5 mg/L 以下,达到出水 $TN \leq 13$ mg/L 的排放要求。

表 1 Bochum – Ölbachtal 污水处理厂改造前、后耗电量对比

Tab. 1 Comparison of energy consumption before and after the improvement of Bochum – Ölbachtal WWTP

项 目		改造前		改造后		降耗率 ^c / %
		总耗电量/ (10 ⁴ kW · h · a ⁻¹)	单位耗电量/ (kW · h · PE ⁻¹ · a ⁻¹)	总耗电量/ (10 ⁴ kW · h · a ⁻¹)	单位耗电量/ (kW · h · PE ⁻¹ · a ⁻¹)	
预处理 + 后续处理 ^a		247 ^b	11.6 ^b	247	11.6	
生物 处理	曝气	217.2	10.2	200	9.4	7.8
	内回流	100	4.7	3.0	0.2	95.7
	搅拌	112.8	5.3	52.5	2.5	52.8
	污泥回流	600	2.8	7.5	0.4	85.7
总计		1 277	34.6	510	24.1	30.3
注： ^a 包括格栅、提升泵站、沉砂池、二沉池、除磷工艺、污泥处理处置工艺等； ^b 根据年耗电总量及生物处理段耗电量推算； ^c 降耗率 = (改造前单位耗电量 - 改造后单位耗电量)/改造前单位耗电量 × 100%。						

以该厂 2015 年能量平衡进行评价。2015 年上半年该厂污泥厌氧消化热电联产系统(CHP)产生净电能 2.47 GW · h, CHP 产热无论升级前后均已自给自足^[5]。根据 2015 年上半年 CHP 产电数据推算,全年 CHP 产生净电能 4.94 GW · h。2013 年工艺升级前,该厂污水处理全流程年总耗电量为 12.77 GW · h,通过厌氧消化能源转化,能源自给率仅为 38.7%。工艺升级后,根据 2015 年上半年总耗电量推算,该厂全年总耗电量为 5.1 GW · h,在厌氧消化效率不变的情况下,能源自给率达 96.9%,已接近能源中和。

Bochum – Ölbachtal 污水处理厂仅采用自身节能降耗方式,维持原有厌氧消化不变,能源自给率从 38.7% 升至 96.9%,接近能源中和。值得注意的是,该案例中进水 COD 为 380 mg/L,与我国市政污水 COD(200 ~ 400 mg/L^[6])高值接近,这对我国污水厂以节能降耗为目的的升级改造,并利用厌氧消化能源转化实现能源中和目标具有一定的参考价值。

1.2 节能降耗措施

① 减少回流泵耗能。改造后取消了第二、第

三段内回流,只保留第一段内回流,且根据第一段末端硝酸盐(NO_3^-)浓度高低选择性开启回流泵,以提高反硝化程度。改进后内回流泵水头损失从 19 kPa 降低到 13 kPa,内回流比从 0.9 降低至 0.5。

② 通过合理分配进水比例,继续使用原有反应池,以降低成本,缩短工期。该厂根据硝化和反硝化池体积间的差异,通过数学模拟对进水进行最佳分配。三段进水比例依次为 50%、33%、17%,原第二段内回流管道被直接改为 33% 污水进水管。

③ 其他设备能耗优化。盘式曝气器更换为板式曝气器,增加浸没深度且替代搅拌器。改造前搅拌器功耗为 2.15 W/m³,而替换搅拌器后功耗降低至 0.88 W/m³。

1.3 经济性评价

德国《污水纳税法》规定,如果污水处理厂出水 $TN < 5$ mg/L,则无需支付污水氮排放费。改造前 Bochum – Ölbachtal 污水处理厂出水 $TN > 5$ mg/L,污水氮排放费为 16 万欧元/a。改造后该厂选择在三段反硝化池投加碳源(根据第三段硝化池出水 TN 决定),以保证出水 $TN < 5$ mg/L。外加碳源成本

约 10 万欧元/a, 因此, 投加碳源更为经济。该厂改造前、后的运行成本见表 2, 可知该厂工艺改造后每年至少节省 50 万欧元。

表 2 Bochum - Ölbachtal 污水处理厂改造前、后的运营成本情况

Tab. 2 Operational costs before and after the improvement of Bochum - Ölbachtal WWTP 万欧元 · a⁻¹

项目	运营成本				运营成 本总计	总投资 成本	总成本
	工资	材料费	电费	污水排放费			
改造前	0	0	97	16	113	0	113
改造后	0	3.1	50	0	53.1	7.6	60.7
成本变化	0	3.1	-47	-16	-59.9	7.6	-52.3

1.4 碳中和核算

根据碳足迹模型^[3], Bochum - Ölbachtal 污水处理厂碳排/减排核算结果见表 3。其中, 碳排放量分为: ①直接碳排放量。CH₄、N₂O 当量人口直接碳排放量为 7 kgCO₂ - eq/(PE · a), 则年碳排总量为 1 491 tCO₂ - eq/a; ②间接碳排放量, 分为能耗与药耗两部分。能耗包括污水处理所需电耗和热耗。根据资料, 该厂全年总电耗为 5.1 GW · h, 按 2015 年德国电力温室气体排放强度为 0.46 kgCO₂/(kW · h) 核算^[7], 总电耗产生的碳排放量为 2 346 tCO₂ - eq/a, 污泥厌氧消化池因保温耗能所产生的碳排放量为 1 264 tCO₂ - eq/a。药耗碳排主要包括除磷药剂与外加碳源的碳足迹, 其中, 除磷药剂碳排放量约 154 tCO₂ - eq/a, 外加碳源碳排放量约 385 tCO₂ - eq/a。综上, Bochum - Ölbachtal 污水处理厂碳排放总量为 5 640 tCO₂ - eq/a。

经核算, 该厂通过污泥厌氧消化热电联产系统产电约 5 GW · h/a、产生热能约 6.53 GW · h/a, 共

实现碳减排量 3 564 tCO₂ - eq/a, 碳减排总量为 3 564 tCO₂ - eq/a, 碳中和率为 63.2%。显然, 能源中和率(96.9%)与碳中和率(63.2%)并不相等, 也不是一码事。

该案例表明, 污水处理厂通过工艺升级改造虽然可实现显著的节能降耗效果, 并最大限度地逼近能源中和运行, 但是, 在无额外利用污水潜在能源(如余温热能)的情况下, 还是难以实现碳中和运行目的。

表 3 Bochum - Ölbachtal 污水处理厂碳排/减排核算

Tab. 3 Carbon emission and reduction data in Bochum - Ölbachtal WWTP

碳排放量/(tCO ₂ - eq · a ⁻¹)					碳减排量/ (tCO ₂ - eq · a ⁻¹)		碳中 和率/ %
直接 碳排	间接碳排				热电联产		
	电能	热能 ^a	除磷药剂	外加碳源	电能	热能 ^a	
1 491	2 346	1 264	154	385	2 300	1 264	63.2
注： ^a 根据同等热值天然气碳排放量计算 ^[8] 。							

注: ^a 根据同等热值天然气碳排放量计算^[8]。

2 德国 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂

Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂位于德国汉堡市, 负责处理周边 200 万居民的生活污水以及欧洲第三大海港的工业废水, 处理水量达 38.2 × 10⁴ m³/d(规模约为 240 万当量人口)^[9], 进水 COD、TN、TP 分别为 850、67、9.4 mg/L^[10]。该厂由汉堡水务公司经营, 改造前是全市最大的公共能源消耗单位之一^[11], 其主流处理工艺为活性污泥法, 生化段出水投加化学药剂除磷。污泥处理包括剩余污泥厌氧消化产沼气、沼气热电联产、消化后污泥继续干化及焚烧用于能量回收。该厂污水、污泥处理全工艺流程见图 2。

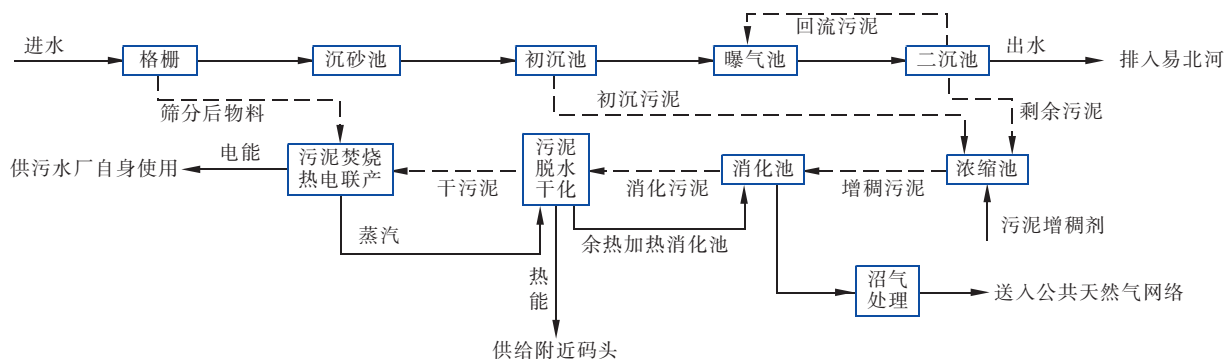


图 2 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂污水、污泥处理/处置工艺流程

Fig. 2 Wastewater treatment process and sludge treatment/disposal process in Köhlbrandhöft/Dradenau WWTP

2.1 能源中和评价

Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂对剩余污

泥进行厌氧消化, 同时收集厂外生物废弃物与污泥共消化以增加沼气产量, 并实现沼气转换为天然气

对外输送。后续消化熟污泥施以焚烧处置,通过热电联产进一步回收电能和热能。其中,电能可弥补自身电耗使用,热能则被输送至污泥干化设备,可完全满足高温干化需要;污泥干化后的低温余热可继续供消化池保温使用。如此设计,可实现电能与热能的高效回收利用。此外,自 2009 年起该厂富余热能还向附近码头输出供应。

该厂 2018 年电能与热能流向示意图 3^[12]。

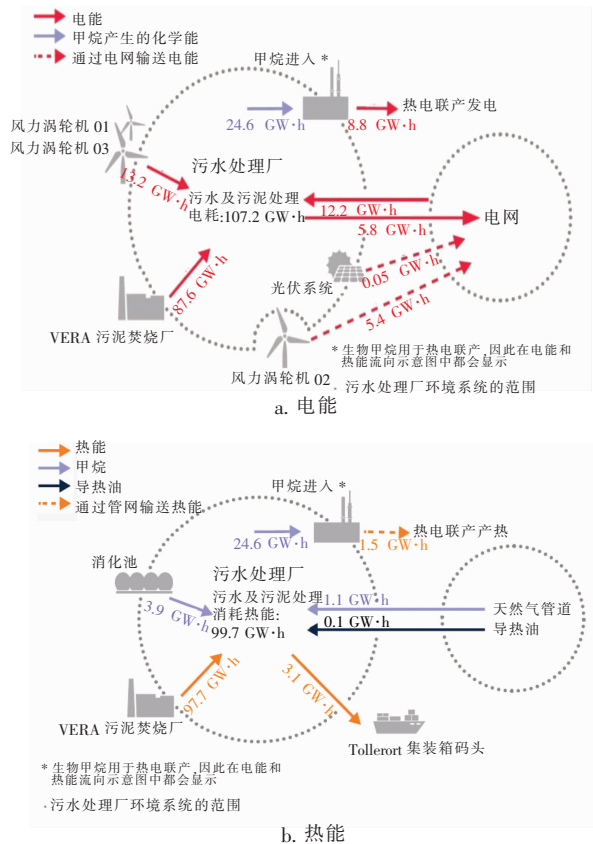


图 3 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂电能与热能流向示意

Fig. 3 Electricity and heat energy recovery in Köhlbrandhöft/Dradenau WWTP

该厂污泥焚烧产能远远大于沼气热电联产,且应用太阳能、风能等清洁能源,在实现能源回收的同时进一步减少 CO₂ 排放。2018 年该厂总电耗为 107.2 GW·h/a,产电量约 115 GW·h/a,电能自给率达 107%;总热耗为 99.7 GW·h/a,产热量约 113 GW·h/a,热能自给率达 113%。可见,该厂通过自身进水中高浓度有机物(COD 为 850 mg/L)、外源有机废弃物、太阳能、风能等综合利用,已超过能源中和目标并可向外供气(CH₄)和供热。预计未来该厂发电量将比耗电量高 30%,热能供应范围也将进

一步扩大^[9]。

该案例具有以下两方面的应用优势:①提高沼气利用效率。沼气利用 CHP 产生电能与热能这种方式虽然简便,但并非最优方式。因为电能产生过程中不可避免地会造成能量损失,而产生的热能又受到供应区域的限制。因此,该厂通过胺洗去除沼气中的 CO₂,使沼气成分达到天然气使用标准后直接输送至市政天然气管网。该方式在提高能源转化效率、避免能量浪费的同时还可实现一定的经济效益。②污泥焚烧是一种实现能源中和较经济的方式,该厂污泥焚烧可充分回收污泥中的有机质能源,产能远远大于沼气热电联产。

2.2 碳中和率核算

根据碳足迹模型^[3]计算该厂碳排放量^[12],结果见表 4。由表 4 可以看出,该厂总碳排放量为 176 703 tCO₂ - eq/a。

表 4 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂碳排放量核算

Tab. 4 Carbon emission in Köhlbrandhöft/Dradenau WWTP

tCO₂ - eq · a⁻¹

项目	数值	说明
直接碳排放量 ^a	CH ₄ ^b	0
	N ₂ O	95 015
	HFCs、PFCs	238
间接碳排放量	电耗 ^c	43 737.6
	热耗 ^c	19 305.6
	聚合氯化铝(PAC)	1 993 按用量为 1 230 t/a、 排放因子为 1.62 计
	硫酸亚铁	13 616 按用量为 8 510 t/a、 排放因子为 1.6 计
	絮凝剂	2 797.5 按用量为 1 119 t/a、 排放因子为 2.5 计

注: ^a《京都议定书》中规定控制的 6 种温室气体分别为二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)^[13]。该厂 SF₆ 碳排放量为 0 tCO₂ - eq/a,故忽略。^b除技术原因等极少量泄漏外,CH₄ 基本全部利用。^c该厂过去采用市政天然气管网供热,热能碳排放量根据同等热值天然气碳排放量计算^[8]。

该厂通过电能与热能回收实现碳减排,结果见表 5^[12]。其中,电能碳减排量根据 2018 年德国电力温室气体排放强度计算^[7];热能碳减排量根据同等热值天然气碳排放量计算^[8]。该厂电能碳减排量约为 52 923 tCO₂ - eq/a,热能碳减排量约为 21 900 tCO₂ - eq/a,总碳减排量则约为 74 823 tCO₂ - eq/a。

因此,碳中和率仅为42.3%,远未达到碳中和目标。

表5 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂碳减排量核算

Tab.5 Carbon emission reduction in Köhlbrandhöft/

Dradenau WWTTP

项目	产生电能/ ($\text{GW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$)	电能碳减排量 ^a / ($\text{tCO}_2 - \text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$)	产生热能/ ($\text{GW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$)	热能碳减排量 ^b / ($\text{tCO}_2 - \text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$)
污泥焚烧	87.6	40 296	97.7	18 917.8
风能	18.6	8 556		
光伏	0.05	23		
热电联产	8.8	4 048	11.5	2 226.8
消化池产生甲烷			3.9	755.2

Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂的运行实践再次表明,尽管能源中和率已超越100%,但其实现的碳中和率仍然很低,还不足45%。

3 希腊 Chania 污水处理厂

Chania 污水处理厂位于希腊克里特岛干尼亚州市中心东部几公里处,至2017年服务人口为17万人,处理水量 $19\,400\text{ m}^3/\text{d}$,进水COD、TN、TP分别为869、50、8.4 mg/L^[14]。该厂采用传统活性污泥法作为主流工艺,不设额外除磷设施,剩余污泥厌氧消化后产沼气并热电联产。污水、污泥处理/处置全工艺流程如图4所示。

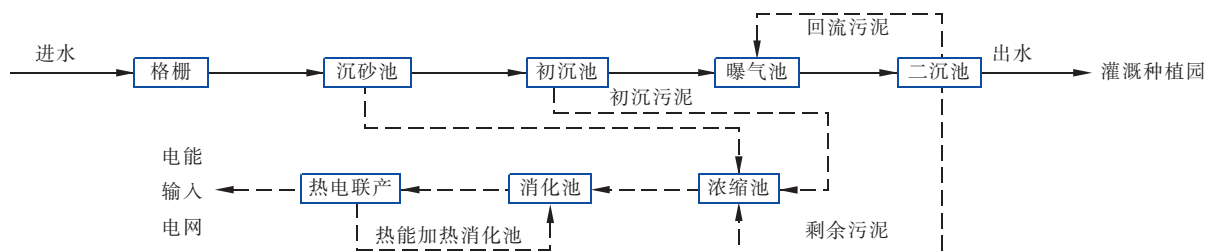


图4 Chania 污水处理厂工艺流程

Fig.4 Wastewater treatment process in Chania WWTTP

3.1 能源中和评价

该厂除污泥厌氧消化并热电联产回收能源外,还采用了光伏发电与风力发电技术。

① 沼气热电联产(CHP)。该厂设有4座污泥厌氧消化池,总池容 $6\,200\text{ m}^3$,厌氧消化温度控制在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,沼气中 CH_4 含量为65%~68%^[14]。CHP产生电能和热能,其中热能用于加热消化池,电能则输入公共电网。

② 太阳能光伏发电。克里特岛是希腊最大的岛屿,当地太阳辐照度很高,太阳能资源丰富。太阳能电池板安装在厂区内部,后续计划在场外继续安装太阳能光伏板。目前太阳能光伏系统峰值功率为640 kW,每年产电 $960\text{ MW} \cdot \text{h}$ 供污水厂使用^[14]。

③ 风力发电。干尼亚州北部紧沿克里特海,由于海陆热力性质差异,海洋比热容远大于陆地,所以在该地安装风力发电装置是可行的。风力涡轮机容量系数为0.28,发电量为 $960\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$,规模为391 kW^[14]。

Chania 污水处理厂2017年总耗电量为 $3\,840\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$,单位耗电量 $0.543\text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。CHP可产电 $768\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$ (总电耗的20%)并输入外部电网;光伏系统可产电 $960\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$ (总电耗的

25%);风力涡轮机产生电能同样为 $960\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$ (总电耗的25%)^[14]。该厂自身产能总计 $2\,688\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$,与总电耗($3\,840\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$)相比,仍存在30%的用电赤字($1\,152\text{ MW} \cdot \text{h}/\text{a}$),即能源中和率仅达到70%。

3.2 碳中和评价

在碳排放方面,直接碳排放主要由 N_2O 、VOCs等间接温室气体引起,与药耗等碳排放共计 $500\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$;间接碳排放中,由于沼气CHP产热完全可满足消化池供热需求,因此,热能导致的间接碳排放量与碳减排量相互抵消。2017年希腊电力温室气体排放强度为 $0.657\text{ kgCO}_2 - \text{eq}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[7]。该厂每年通过电网用电产生的间接碳排放量为 $2\,523\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$,即 $0.36\text{ kgCO}_2 - \text{eq}/\text{m}^3$ 。综上,Chania 污水处理厂总碳排放量为 $3\,023\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$ 。

在碳减排方面,CHP产电碳减排量为 $504.6\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$,太阳能和风能碳减排量均为 $630.7\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$,所以总碳减排量为 $1\,766\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$ 。基于总碳排放量 $3\,023\text{ tCO}_2 - \text{eq}/\text{a}$,该厂碳中和率只有58.4%。

对于剩余碳排放量,该厂打算进一步通过外部植树造林固碳措施实现削减。按照其现状,按单位

面积人工林碳汇能力为 $7.3 \text{ tCO}_2 - \text{eq/hm}^2$ 计,至少需种植 172.2 hm^2 的土地树木方可完成碳中和任

务。表6列出了该厂各项能源中和与碳中和份额核算。

表6 Chania 污水处理厂各项目能源中和与碳中和核算

Tab.6 Energy neutrality and carbon neutrality efficiency in Chania WWTP

项目	产电量/ ($\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$)	能源中和 率/%	抵消或固存碳排放量/ ($\text{tCO}_2 - \text{eq} \cdot \text{a}^{-1}$)	碳中和 率/%	系统容量	项目成本/ 万欧元
热电联产	768	20	504.6	16.7		
太阳能光伏	960	25	630.7	20.9	640 kW(峰值)	83.2
风力涡轮机	960	25	630.7	20.9	391 kW	43
人工林					$7.3 \text{ tCO}_2 - \text{eq/hm}^2$	
总计	2 688	70	$\geq 1 766$	≥ 58.5		126.2

其实,依靠“森林碳汇”等额外碳汇并非污水处理厂自身实现的碳中和,其本质与购买碳汇无异,其实是“伪中和”。再者,种植树木面积大都是虚拟的。实际上,全球商业巨头早已承诺通过植树造林方式获取“森林碳信用”间接实现各自生产过程的碳中和,而且所有承诺合计起来,森林应该已覆盖地球表面几层了。

以上案例分析表明,污水处理厂通过自身节能降耗、污泥厌氧消化与焚烧能量回收,辅之以额外的太阳能、风能等能源利用,可较容易实现能源中和目标;但碳中和目标的实现,必须达到弥补自身直接碳排与能耗及药耗间接碳排的要求。在此方面,芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂除污泥厌氧消化外热电联产外,重点对出水余温热能予以回收利用,且热能回收份额达全部回收总能量的 90%。这一举措让该厂转型为“能源工厂”。由于余温热能的回收利用,该厂不仅实现能源中和,还形成大量碳汇,导致其碳中和率高达 333%^[15-16]。

4 结语

在普遍强调碳中和的今天,能源中和与碳中和常常被等同起来,即,实现了能源中和也就意味着碳中和也相应实现。但是,对污水处理而言,能源中和与碳中和并不等同,或者说能源中和不一定可实现碳中和,而碳中和则往往可以涵盖能源中和。这是因为污水处理过程中除不计入碳排放的生源性 CO_2 外,还会在处理过程中产生 N_2O 、 CH_4 、VOCs 等温室气体。此外,各种化学药剂(如碳源、除磷药剂等)的生产与运输过程也会产生 CO_2 等温室气体。

德国 Bochum - Ölbachtal 与 Köhlbrandhöft/Dradenau 污水处理厂虽已接近或超过能源中和,但因处理过程的直接碳排以及药耗等碳排比重较大而均难以实现碳中和运行(碳中和率分别为 63.2% 与

42.3%),甚至差距还很大。同样,希腊 Chania 污水处理厂能源中和率为 70% 时碳中和率仅为 58.4%。Chania 污水处理厂打算通过厂外植树造林方式弥补其碳中和赤字(41.6%),但这种方式其实如同购买碳汇,属于“伪中和”。只有通过不断挖掘污水潜能(如余温热能),方能同时实现真正意义上的能源中和与碳中和。

显然,污水处理厂仅仅追求能源中和是远远不够的,要想实现碳中和确实需要认真对待余温热能利用问题。

参考文献:

- [1] MAKTABIFARD M, ZABOROWSKA E, MAKINIA J. Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2018, 17(4): 655 - 689.
- [2] 王曦溪,李振山. 1998—2008 年我国废水污水处理的碳排放估算[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1764 - 1776.
WANG Xixi, LI Zhenshan. Estimation of carbon emission from wastewater treatment from 1998 to 2008 in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7): 1764 - 1776 (in Chinese).
- [3] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
WANG Xiangyang. Study on Calculating Carbon Footprint and Assessing the Total Environmental Impact of Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019 (in Chinese).
- [4] HAO X D, WANG X Y, LIU R B, et al. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2019, 160: 268 - 277.

- [5] MARNER S T, SCHRÖTER D, JARDIN N. Towards energy neutrality by optimising the activated sludge process of the WWTP Bochum – Ölbachtal [J]. *Water Science & Technology*, 2016, 73 (12): 3057 – 3063.
- [6] HAO X D, LIU R B, HUANG X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. *Water Research*, 2015, 87: 424 – 431.
- [7] European Environment Agency. Greenhouse Gas Emission Intensity of Electricity Generation—European Environment Agency [EB/OL]. (2021-06-04) [2021-07-12]. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-8/#tab-googlechartid-googlechartid_chart_111_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_date%22%3A%5B2015%5D%7D%7D.
- [8] 黄登捷. 燃气锅炉烟气余热回收空气源热泵应用与分析 [C] // 中国土木工程学会燃气分会. 中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(下册). 天津:《煤气与热力》杂志社, 2019: 1178 – 1181.
- HUANG Dengjie. Application and analysis of air source heat pump for gas boiler flue gas waste heat recovery [C] // China Civil Engineering Society Gas Branch. China Gas Operation and Safety Symposium (Tenth) and Proceedings of the 2019 Annual Conference of the Gas Branch of the Chinese Civil Engineering Society (Volume 2). Tianjin: Gas & Heat, 2019: 1178 – 1181 (in Chinese).
- [9] HENDRIK S. Welcome to the WWTP Hamburg [EB/OL]. (2016-06-04) [2021-07-12]. <https://docplayer.net/48150699-Welcome-to-the-wwtp-hamburg.html>.
- [10] Behörde für Umwelt und Energie (BUE), Wasser, Abwasser und Geologie (W), W2 – Abwasserwirtschaft. Abwasserreinigung des Klärwerkverbundes Köhlbrandhöft/Dradenau in Hamburg [EB/OL]. (2019-06-20) [2021-07-12]. <https://cloud.csiss.gmu.edu/uddi/en/dataset/abwasserreinigung-des-klarwerkverbundes-kohlbrandhoft-dradenau-in-hamburg>.
- [11] LUEDER G. Germany: energy positive water treatment [EB/OL]. (2015-06-12) [2021-05-14]. <https://www.watertechonline.com/wastewater/article/16201690/germany-energy-positive-water-treatment>.
- [12] Hamburger Stadtentwässerung AöR. Qualität – Umweltschutz – Arbeitssicherheit [EB/OL] (2016-06-04) [2021-07-12]. <https://www.hamburgwasser.de/privatkunden/unser-wasser/umweltschutz/umwelterklaerung>.
- [13] 郝晓地, 饶志峰, 李爽, 等. 污水余热热能蕴含着潜在碳交易额 [J]. 中国给水排水, 2021, 37 (12): 1 – 13.
- HAO Xiaodi, RAO Zhifeng LI Shuang, *et al.* Potential carbon trading amount of thermal energy contained in wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (12): 1 – 13 (in Chinese).
- [14] VOUDROUBAS J. Creation of zero carbon emissions wastewater treatment plants—a case study in Crete, Greece [J]. *Energy and Environment Research*, 2018, 8 (1): 64 – 72.
- [15] 郝晓地, 赵梓丞. 应用案例 I 污水处理厂变身能源工厂: 芬兰 Kakolanmäki [EB/OL]. (2021-04-13) [2021-06-04]. http://mp.weixin.qq.com/s?_biz=Mzg5MjYwMTg0Nw==&mid=2247484191&idx=1&sn=fe2c5bd0715e3bb6a579d5715ca7d15f&chksm=c03ad787f74d5e914a8c05f5d9e7e08048e5a08d8ede82974641fb7ba7b8d748cd53d89cf5e2#rd.
- HAO Xiaodi, ZHAO Zicheng. Application case I wastewater treatment plant turned into the energy plant: Finland Kakolanmäki [EB/OL]. (2021-04-13) [2021-06-04]. http://mp.weixin.qq.com/s?_biz=Mzg5MjYwMTg0Nw==&mid=2247484191&idx=1&sn=fe2c5bd0715e3bb6a579d5715ca7d15f&chksm=c03ad787f74d5e914a8c05f5d9e7e08048e5a08d8ede82974641fb7ba7b8d748cd53d89cf5e2#rd (in Chinese).
- [16] Turun Seudun Puhdistamo Oy. Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon Tarkkailututkimus Vuosisraportti 2020 [EB/OL]. (2021-02-25) [2021-06-04]. <https://www.turunseudunpuhdistamo.fi/>.

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: 2021-08-04

修回日期: 2021-08-15

(编辑: 丁彩娟)