

污水处理厂碳减排的研究与案例

Research and Case of Carbon Reduction in Sewage Treatment Plants

骆侃

Kan Luo

杭州市水务集团 中国·浙江 杭州 310009

Hangzhou Water Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310009, China

摘要: 污水处理厂在运行中排放大量 CO₂, 其中直接碳排放主要来自生物反应过程中 CH₄、N₂O 和 CO₂ 的逸散, 间接碳排放主要来自生产过程中电力、药剂等消耗。结合具体工程案例, 探索污水处理厂实现碳减排的措施, 经过计算, 该案例污水处理厂碳减排率可达 37.24%, 实现了污水处理的节能和低碳。同时展望该污水处理厂进一步碳减排的可能性。

Abstract: Sewage treatment plants emit a large amount of CO₂ during operation, of which the direct carbon emission mainly comes from the escape of CH₄, N₂O and CO₂ in the biological reaction process, and the indirect carbon emission mainly comes from the consumption of electricity and pharmaceuticals in the production process. Combined with a specific engineering case, the paper explored measures to achieve carbon emission reduction in sewage treatment plants. Through calculation, the carbon emission reduction rate of the sewage treatment plant in this case can reach 37.24%, realizing energy saving and low carbon in sewage treatment. At the same time, the possibility of further carbon emission reduction was forecasted.

关键词: 污水处理厂; 碳减排; 碳排放计算; 碳中和

Keywords: sewage treatment plant; carbon emission reduction; carbon emission calculation; carbon neutralization

DOI: 10.12346/edwch.v1i2.7841

1 引言

从能量转化的角度来说, 传统污水处理模式本质上是以能耗换水质, 即使用大量电能以去除污水中的污染物, 同时产生大量二氧化碳排放。污水处理行业的碳排放量约占全社会总排放量的 1%, 在环保产业中占比很大。污水处理过程中会排放二氧化碳、甲烷和氧化亚氮。其中, 二氧化碳主要来源于污水治理设施的能耗过程, 而水污染物降解产生的二氧化碳则认定为生源性碳排放; 甲烷主要来源于污水处理的厌氧环节, 包括管网、厌氧池、化粪池、污泥厌氧消化池等; 氧化亚氮主要来源于污水处理过程的硝化、反硝化阶段。另一方面, 污水处理本身也是碳减排过程, 未经处理的污水直排会导致黑臭, 引发厌氧反应, 会产生更多的碳排放。

在污水处理过程中, 若能通过提高污水处理综合能效、提高污水集中收集处理率、探索污水和污泥资源化利用等手段, 实现污水处理的节能和低碳, 将会是污水处理行业对实

现“双碳”目标的重要贡献。

2 污水处理厂的碳减排措施分析

污水处理过程中化石源 CO₂ 排放量由污水进水水质情况决定, 不属于污水处理厂可调控范围内。污水处理厂产生碳排放的主要因素为: ①电力消耗产生间接碳排放; ②处理过程中消耗的各类药剂产生间接排放。次要因素为: 污水处理中产生的 N₂O 直接排放。其他因素为: ①污泥焚烧产生 N₂O 排放; ②污水处理产生 CH₄ 排放; ③污泥焚烧产生化石源 CO₂ 排放; ④运输过程产生碳排放。

所以, 降低污水处理厂碳排放水平, 减少碳排放强度, 首先应主要致力于降低主要因素碳排放强度, 其次降低次要因素碳排放强度, 最后设法减少其他因素碳排放强度。

2.1 降低电力和药剂消耗

①降低电力消耗。电力消耗产生的间接排放是污水处理

【作者简介】骆侃 (1985-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事市政工程、水利工程的管理、技术与建设研究。

厂的主要排放因素,因此,详细分析厂区内电力消耗占比情况,优化机械设备运行能效,降低电力消耗量,是重要的减排思路。

对于曝气过程,可采取如下措施:第一,采用新式设备与工艺,提高曝气效率,如更换新型高效设备、使用微气泡曝气等方法;第二,使用前反馈或后反馈曝气优化控制技术,及时调整曝气量,避免过度曝气产生的电能损失;第三,结合生物模型与自动化控制技术,精确控制曝气流量,尽可能提升曝气系统能效。

对于水泵机组,可采取如下措施:第一,及时维护受磨损、腐蚀的设备,更新、升级新型高效设备;第二,优化水泵机组运行方案,优化水泵机组的运行状态、时段等,避免水泵低效或无效运行;第三,采用变频水泵机组,可在流量较低时相应地降低功率,避免空转而浪费电能。

②降低药剂消耗。提高污水处理水平,增强生物处理能力,并采用精确加药系统,能减少各类药剂用量以降低碳排放强度。

2.2 污水回收利用

①污水资源化利用方案。现如今,污水已经不单单是一种废物,而被认为是一种潜在能量和资源的载体^[1]。中国水资源匮乏,污水经过深度处理再生后循环利用能够提供稳定的水源,并且能够减少污染源排放。污水资源化利用是指污水经无害化处理达到特定水质标准,作为再生水替代常规水资源,用于工业生产、市政杂用、居民生活、生态补水、农业灌溉、回灌地下水等功能,可以降低用户对自来水的使用量,降低取水设施、输配水设施、给水处理厂的工作(水量和污染物处理)负荷,从而降低温室气体排放量。此外,再生水通过输水管线回用至作物灌溉、绿地浇水或杂用等,可以等量减少跨区域调水、取水设施的工作负荷,是一种在系统层面进行源头控制实现碳减排的策略。

污水厂外回用的途径有:结合污水处理厂的基本布局,将污水处理厂尾水排入内河,实现河道水系的生态补水;作为市政道路浇洒、绿化用水;结合周边的工业园区等预期再生水用户,视不同要求分质供水。

污水处理厂内回用的途径有:在污水处理厂增设优质再生水生产系统,采用膜处理等再生水处理设施,处理后水质达到工业用水循环冷却补充水水质标准后,用于溶药、构筑物 and 道路的冲洗、绿化的浇灌用水。

②污水源热泵技术。污水处理厂排放的尾水温度基本稳定,与自然环境存在一定的温差,冬天远高于环境温度,夏天远低于环境温度,通过污水源热泵技术把温差进一步“放大”,冬天可以吸取污水中的热量,作为热泵的热源来制热,夏天可以往污水中放热,作为热泵的冷源来制冷,经济效益和环境效益相当可观^[2]。除了满足厂区自身的供冷和供热外,污水源热泵还可以与厂外实现供冷(热)系统联动,扩大输出范围,节能潜力巨大。

2.3 污泥回收利用

①污泥热能利用。污泥中蕴含一定的能量,将其利用,反作用于污泥处理过程或作为燃料供给接收单位,都是污泥热能资源化利用的有效方案。

污水处理厂污泥焚烧产生的热量可一部分通过空气预热器加热入炉流化风,提高炉温,从而提高综合入炉含水率,降低干化部分能耗;另一部分通过余热锅炉进行回收,产生蒸汽或热水热源,以补充污泥干化部分能耗。

污水处理厂污泥低温炭化过程分解部分有机物,可补充全部炭化用热及部分干化用热,降低干化部分能耗,同时炭化产物保有大部分污泥中的有机物,热值相对较高,可将其用于片区内其他焚烧设施补燃,或以燃料棒形式外供。

②污泥处理产物资源化。污水处理厂的污泥经过干化+焚烧后,产物主要为灰渣,其余为部分危废,危废可采用螯合固化方式在厂内进行处理,产物与灰渣一同探索资源化出路。焚烧产物均为无机物,其资源化利用主要为建材利用,可用于水泥熟料、水泥砂浆、沥青、吸附剂材料、制砖、建筑填料等建材资源化方向。

污水处理厂的污泥经过干化+低温炭化后,产物为炭产品,具有较多的有机物,除上述热能资源化利用方案,还可用于与焚烧产物同等建材利用方向,同时还可作为堆肥、肥料、土壤土质改良剂等土地利用方向。

③污泥磷回收。磷是动植物生长必不可少的营养元素,也是不可再生的有限资源,如何将污水、污泥中的磷进行回收,是污水处理厂需着重考虑的问题。

国外机构和学者已经对从污水和污泥中回收磷进行了大量的研究,已经有较多成熟的磷回收技术及工程应用^[3]。特别是在欧洲,由于磷矿资源稀缺,进口依赖度高,欧盟及其成员国率先颁布了各种法规、政策以及项目计划,有效推动了一大批磷回收与再利用项目的推广和实施。德国于2017年通过了《污水污泥条例》的修订,其核心内容是要求从污水、污泥或其焚烧灰中回收磷。国内目前对此关注度也在日渐提高。

磷可以在污水和污泥处理流程中的脱水清液、消化后浓缩污泥,或者污泥焚烧飞灰中进行回收。从脱水清液中回收工艺相对简单易行,投资较低;从污泥或者焚烧飞灰中回收的效率较高,但往往需要较高的能耗和药剂消耗,并且投资较高。由于各地区或国家的自然环境和市场环境不同,应当因地制宜选用。

3 污水处理厂碳排放计算方案

3.1 确定核算边界

污水处理厂碳排放核算物理边界覆盖厂区自进水至出水,囊括所有污水污泥处理构筑物、能源资源消耗及与其他企业物料运输过程产生的碳排放活动,时间边界仅包括运行维护。

污水处理厂主要温室气体排放活动包括:

①污水处理过程直接排放。以常见的采用 AAO 工艺的污水处理厂为例,在处理过程中,由于微生物生化反应降解污水中污染物,产生了化石源 CO₂、CH₄ 与 N₂O,造成直接排放。

②污泥处理过程直接排放。若污水处理厂采用干化焚烧方式处理剩余污泥,其燃烧过程中将产生化石源 CO₂ 与 N₂O,造成直接排放。

③资源、能源消耗间接排放。污水处理厂运行中消耗了电能,产生了间接排放;使用各种药剂也产生了间接排放;剩余污泥与各类药剂需在厂区与其他企业间进行运输,因而产生了间接排放。

3.2 主要运行参数

核算所需污水处理厂主要运行参数如表 1 所示。

3.3 案例介绍

华东地区某污水处理厂建设规模为 10 万 m³/d,采用全地下式的建设形式,污水处理采用“多段 AAO+ 高效沉淀池+深床滤池”工艺,污泥处理采用干化至 40% 外运的方式,设计进、出水水质如表 2 和表 3 所示。

3.4 核算结果

该污水处理厂碳排放和碳减排核算结果见表 4。

3.5 案例污水处理厂进一步碳减排的可能性

案例污水处理厂附近有居民区和公共商业设施,如果外部条件允许,可以铺设一定规模的供热和制冷的管网,并将厂内的污水源热泵设施向厂外进行冷(热)量输出,这样可以大幅度减少新建供热和制冷设施并运行所带来的碳排放。

通过核算,使用厂内水源热泵向厂外输出的方式,相对于中央空调制冷来说,每年可减少碳排放量约 6733.67tCO₂-eq/a。相对于集中供热来说,每年可减少碳排放量约 25122.67tCO₂-eq/a。可以看出,仅向厂外供热一项已经高于

该厂减排前的年排放总量。由此说明,污水处理厂达到零碳排放、“碳中和”是可以实现的。

案例污水处理厂为全地下式污水处理厂,其上部为生态湿地和休闲公园,若采用光伏设施会影响其上部景观效果,所以该厂不建议建设光伏设施。若是采用地上式布置形式的污水处理厂,厂内有大量池体,池体上方可以用于安装光伏设备,光伏板的安装还可以对水池进行遮挡,能有效抑制池内水体藻类生长,提升水质。污水处理厂本身能耗高,在配套光伏电站后,可以代替传统电力的供给,有效降低生产运营成本,达到节能减排的目的,一举多得。

表 1 核算所需污水处理厂主要运行参数

排放活动	监测数据	
污水处理直接排放	化石源 CO ₂	处理厂进出水 BOD ₅ 浓度 (mg/L)
		处理厂进出水 TN 浓度 (mg/L)
		生物固体平均停留时间 SRT (d)
		水力停留时间 HRT (d)
		混合液挥发性悬浮固体浓度 (mg/L)
		水温 (°C)
	CH ₄	处理厂进水 BOD ₅ 浓度 (mg/L)
	N ₂ O	处理厂进水 TN 浓度 (mg/L)
污泥处理直接排放	化石源 CO ₂	处理污泥干重 (kg/d)
		处理污泥碳含量 (%)
	N ₂ O	污水流量 (m ³ /d)
		处理污泥干重 (kg/d)
资源、能源消耗间接排放	电力消耗	厂区电能消耗量 (kWh/d)
		污水流量 (m ³ /d)
	药剂消耗	各类药剂消耗量 (kg/d)
		污水流量 (m ³ /d)
	运输排放	运输总量与距离 (kg)、(km)
		污水流量 (m ³ /d)

表 2 旱季设计进出水水质及污染物去除率

项目	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	氨氮 (mg/L)	TP (mg/L)
设计进水水质	370	165	170	40	35	5
设计出水水质	30	6	10	10 (8)	1.5	0.3
污染物去除效率 (%)	≥ 91.9	≥ 96.4	≥ 94.1	≥ 75.0 (80.0)	≥ 95.7	≥ 94.0

表 3 雨季设计进出水水质及污染物去除率

项目	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	氨氮 (mg/L)	TP (mg/L)
设计进水水质	300	135	145	30	25	4
设计出水水质	30	6	10	10 (8)	1.5	0.3
污染物去除效率 (%)	≥ 90.0	≥ 95.6	≥ 93.1	≥ 66.7 (73.3)	≥ 80.0 (68.0)	≥ 87.5

注:括号外数值为日平均值,括号内数值为月平均值。

表4 某10万吨/日污水处理厂碳排放和碳减排核算表

一	直接排放强度(以CO ₂ 当量计)	0.2709	kgCO ₂ -eq/m ³
1	化石源CO ₂ 排放强度		
(1)	污水处理化石源CO ₂ 排放强度	0.0233	kgCO ₂ -eq/m ³
(2)	人工湿地化石源CO ₂ 排放强度	0.0003	kgCO ₂ -eq/m ³
2	CH ₄ 排放强度		
(1)	污水处理CH ₄ 排放强度	0.0166	kgCO ₂ -eq/m ³
(2)	人工湿地CH ₄ 排放强度	0.0403	kgCO ₂ -eq/m ³
(3)	收纳水体CH ₄ 排放强度	0.0012	kgCO ₂ -eq/m ³
3	N ₂ O排放		
(1)	污水处理N ₂ O排放强度	0.1766	kgCO ₂ -eq/m ³
(2)	人工湿地N ₂ O排放强度	0.0043	kgCO ₂ -eq/m ³
(3)	受纳水体N ₂ O排放强度	0.0083	kgCO ₂ -eq/m ³
二	间接排放强度(以CO ₂ 当量计)	0.3373	kgCO ₂ -eq/m ³
1	电力消耗排放强度	0.3206	kgCO ₂ -eq/m ³
2	药剂(材料)消耗排放强度		
(1)	聚丙烯酰胺产生的间接碳排放强度	0.0034	kgCO ₂ -eq/m ³
(2)	硫酸铝产生的间接碳排放强度	0.0004	kgCO ₂ -eq/m ³
(3)	次氯酸钠产生的间接碳排放强度	0.0092	kgCO ₂ -eq/m ³
(4)	聚合氯化铝产生的间接碳排放强度	0.0001	kgCO ₂ -eq/m ³
(5)	氢氧化钠产生的间接碳排放强度	0.0031	kgCO ₂ -eq/m ³
3	运输过程产生的碳排放强度	0.0005	kgCO ₂ -eq/m ³
三	资源/能源回收碳补偿(以CO ₂ 当量计)	0.1556	kgCO ₂ -eq/m ³
1	能源回收碳补偿		
	污水源热泵提取的热能	0.0529	kgCO ₂ -eq/m ³
2	植物碳汇	0.1027	kgCO ₂ -eq/m ³
四	其它碳减排措施(以CO ₂ 当量计)	0.0709	kgCO ₂ -eq/m ³
1	变频技术	0.0288	kgCO ₂ -eq/m ³
2	污水源热泵提取冷量	0.0380	kgCO ₂ -eq/m ³
3	精确加药	0.0015	kgCO ₂ -eq/m ³
4	再生水利用	0.0026	kgCO ₂ -eq/m ³
五	减排前排放强度	0.6082	kgCO ₂ -eq/m ³
	减排前年排放量	22200.44	tCO ₂ -eq/a
六	碳减排强度	0.2265	kgCO ₂ -eq/m ³
	年减排量	8267.36	tCO ₂ -eq/a
七	实际碳排放强度	0.3817	kgCO ₂ -eq/m ³
	实际碳年排放量	13933.07	tCO ₂ -eq/a
八	碳减排率	37.24%	

4 结语

污水处理过程实际就是碳排放的过程。污水处理厂的直接碳排放主要来自生物反应过程中CH₄、N₂O和CO₂的逸散,间接碳排放主要是生产过程中电力、药剂等的消耗。在污水处理系统运行过程中,甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)、电耗三个载体直接或间接产生的碳排放量大体相当。其中,CH₄排放主要发生在化粪池、管道淤积、污水直接排放等情景,N₂O排放主要发生在污水好氧处理过程和受纳水体,而电耗、物耗等产生的间接碳排放取决于污水处理厂的管理水平。

污水处理厂实现碳减排的措施,在降碳方面,可通过厂网一体流域化管理,实现系统性降碳;建立基于污染物特征变化的多种调控策略,实现精细化运营管理;工艺和设备协同管理,提高系统的稳定性、可靠性和能源利用效率。在替碳方面,可利用沼气热电联产技术,替代外部电能消耗;建

设分布式光伏发电项目,提高绿色能源利用量,打造资源化再生水厂;开发水源热泵技术,可在冬季为用户供热,夏季为用户制冷。在固碳方面,可大力推广高品质再生水回用;大力推进污泥资源化利用^[4]。

参考文献

- [1] 聂凡,吴百春,何东明,等.炼化污水处理厂降耗及资源能量回收模式探讨[J].工业水处理,2020,40(9):23-29.
- [2] 雷英杰.双碳”时代,解码污水处理行业新路径[J].环境经济,2021(15):24-25.
- [3] 林莉峰,胡维杰,王丽花.城市污水和污泥中磷回收技术发展和应用前景——以上海市为例[J].给水排水,2022,48(5):23-30.
- [4] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方案之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(4):423-434.