

DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2312-5042-1767

污水处理厂提标改造的全生命周期 综合影响评价

——以某城市污水厂为例

路云霞¹ 安浩^{2*}1.南京市生态环境保护科学研究院 江苏南京 210013; 2.中国五冶集团
有限公司 四川成都 610063

摘要: 污水处理厂在建设、运行、改造和拆除过程中不可避免地会产生各种各样的废弃物,危害环境。通过污水处理全生命周期方法,评估实际污水处理厂提标改造的综合影响后表明,若仅提高出水排放标准,污水处理则会对整体环境产生负效益。采用合理的排放标准、光伏发电和污泥资源利用,可有效地弥补对总环境的负面影响,可将综合影响指标从 2.04×10^4 t/FU 分别降至 2.01×10^4 、 2.00×10^4 和 9.22×10^3 t/FU,降幅为1.33%、1.79%、54.75%。

关键词: 污水处理 全生命周期评价 提标改造 环境影响

中图分类号: X506

文献标识码: A

文章编号: 1672-3791(2024)05-0158-04

Assessment of the Comprehensive Effect of the Whole Life Cycle of the Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plants

—Taking an Urban Wastewater Treatment Plant as an Example

LU Yunxia¹ AN Hao^{2*}(1.Nanjing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu Province, 210013
China; 2.China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan Province, 610063 China)

Abstract: Wastewater treatment plants will inevitably produce various waste in the process of construction, operation, remodelling and dismantlement, which can harm environmental health. This paper assesses the comprehensive impact of the actual upgrading and reconstruction of wastewater treatment plants with the whole life cycle approach of sewage treatment, and results show that if only the effluent discharge standard is improved, wastewater treatment will have negative benefits to the overall environment. Adopting reasonable discharge standards, photovoltaic power generation and sludge resource utilization can help compensate for negative impacts on the overall environment, and reduce the comprehensive impact indicators from 2.04×10^4 t/FU to 2.01×10^4 , 2.00×10^4 and 9.22×10^3 t/FU respectively, with a reduction of 1.33%, 1.79% and 54.75%.

Key Words: Wastewater Treatment; Life Cycle Assessment; Emission Standard Upgrading; Environmental impacts

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(项目编号:51508263)。

作者简介: 路云霞(1985—),女,硕士,高级工程师,研究方向为环境管理与政策研究。

通信作者: 安浩(1984—),男,博士,高级工程师,研究方向为污染控制及资源化利用。E-mail: ahsky0523@126.com。

随着排放标准的提高,污水处理工艺流程相应延长,污水处理的能耗日趋增大,药剂投加量也随之增加,由此产生了一系列的环境负面效益^[1]。

本研究以山东省潍坊市某城市污水厂实施的提标改造为例,采用LCA的相关原理和方法,对案例厂提标改造全生命周期的环境综合效益进行量化评估,分析负面效益产生(或增加)的关键驱动因子,研究对应的解决措施和方法,以期构建综合效益高、碳排放量低的污水治理模式提供支撑。

1 研究方法

1.1 污水处理厂概况

山东潍坊某城市污水厂总设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (其中,一期 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,二期 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。主要接纳服务区内居民生活污水和部分工业区的纳管尾水。一期出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准;二期扩建时,同步对一期进行了改造,出水执行一级A标准。2019年,对污水厂进行进一步提标改造,出水执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的IV类标准(不考察TN)。

1.2 生命周期影响评价

依据ISO 14040的基本原理,LCA评估分为4个阶段。

1.2.1 目标与范围

项目边界以提升泵房进水为起点,以消毒池出水口为终点,涵盖建设、运行和拆除3个阶段。

1.2.2 清单分析

本研究所采用的清单由输入、输出和回收3个部分组成。

1.2.3 影响评价

生命周期影响评价(LCIA)是LCA体系的核心组成部分。ISO和EPA等组织将LCIA评估过程分为分类、特征化与量化3个步骤^[2]。

(1)分类。

环境影响通常分为资源消耗、生态影响和健康风险三大类^[3]。包括全球变暖潜能P1、其他影响P2、水体富营养化潜能P3、水体黑臭潜能P4、生物毒性潜能P5、不可再生资源消耗P6、土地填埋消耗P7、大气酸化潜能P8、可再生资源消耗P9这9个子类。

(2)特征化。

按式(1)计算,得到环境影响负荷值(EB)。

$$EB = \sum_{i=1}^n m_i EF_i \quad (1)$$

式(1)中: m_i 表示第*i*种物质的清单分析排放量; EF_i 表示第*i*种物质的某类环境影响的相关性系数。

(3)量化。

对式(1)的结果进行归一化处理(NEB)。其中,本研究采用层次分析法(AHP)构建A-P判断矩阵,并依据潍坊区域社会经济条件,并参考相关文献的报道^[3],采用九标标度法,依次计算得到P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8和P9的权重:

$$W = [0.308, 0.224, 0.157, 0.108, 0.074, 0.051, 0.035, 0.025, 0.0179]^T$$

采用式(2)核算LCIA结果,作为案例厂提标改造情境下评价“综合效益”的方法。

$$LCIA = \sum_{n=1}^9 w_i \times NEB_i \quad n = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (2)$$

式(2)中, NEB_i 表示第*i*种环境负荷归一化结果。

2 评价结果与讨论

2.1 数据清单

本研究以污水厂相关物质消耗清单和进出水水质指标为例,具体数据如表1所示。其中,将LCIA的功能单位定义为是 $1\text{FU} = 1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

上述表1中,输入的资源 and 消耗的能源所涉及的环境影响相关系数和特征化因子、污水和污泥处理与处置过程的碳排放相关系数,均采用文献中数据核算获得^[3]。

2.2 特征化及量化结果分析

特征化和量化结果如图1所示,与相关研究结论基本一致^[3]:污水处理厂环境负荷中,全球变暖影响和土地填埋空间消耗潜能影响显著。在特征化的基础上,综合考虑区位自然地理和社会经济发展情况,进行归一化处理后,全球变暖影响因其全球性影响且影响时间较长、赋值权重较大,比重上升明显;可再生资源消耗下降最为明显,主要是其所赋权重较小,导致其量化结果所占比重与特征化结果相比,降幅显著。

2.3 全生命周期综合影响结果

通过式(2)计算可以得到提标改造情况下,案例污水厂的LCIA分别为:

$$LCIA_1 = 9.515 \times 10^3, LCIA_2 = 1.089 \times 10^4, LCIA_{\text{总}} = 2.04 \times 10^4$$

从LCIA的计算结果分析可知,仅考虑提标改造,二期对环境影响更大、环境综合效益更低,这与相关研究结论相同^[3]。主要原因是项目所在区域以火电为主,工艺整体能耗和药耗增加,会引起全生命周期范围内的温室气体排放、大气酸化等环境影响数值增大。

2.4 污水厂提标优化路径研究

2.4.1 清洁能源利用对环境产生的综合效益分析

本研究中案例污水厂太阳能光伏发电系统设计

表1 主要影响物清单

项目	影响物质		输入		输出	
	类型	单位	一期	二期	一期	二期
建设阶段	钢筋	t	3 917.5	4 218	—	—
	水泥	t	11 964.7	14 780.6	—	—
	木材	m ³	736.5	617.5	—	—
	光伏材料	kWp	—	750	—	—
	直接能耗	kWh	5 200 873	6 606 653.4	—	—
	水耗	t	85 371.9	111 741.1	—	—
	COD	mg/L	254.7	234.8	28.6	24.2
	BOD ₅	mg/L	110.7	101.5	8.5	7.3
	TN	mg/L	40.7	43.2	12.9	9.8
	NH ₄ ⁺	mg/L	33.2	38.5	0.34	0.42
	TP	mg/L	2.8	2.7	0.29	0.23
运行阶段	SS	mg/L	249	261	9	7
	能耗	kWh/m ³	0.32	0.29	—	—
	PAC	t/d	1.25	—	—	—
	FeSO ₄ (液)	t/d	—	3.5	—	—
	PAM	t/d	0.2	0.14	—	—
	甲醇	t/d	3.6	—	—	—
	二氧化氯	t/d	0.25	—	—	—
	次氯酸钠	t/d	—	3.9	—	—
	乙酸	t/d	—	15.7	—	—
	活性炭	t/d	2~3.5(根据水质)		—	—
	80%污泥	t/d	—	—	229.28	—
拆除阶段	光伏	kWh/d	—	—	2 309.8	—
	拆除能耗	kWh	2 096 324.2	2 617 800.6	—	—
	运输油耗	L	39 556.6	48 769.8	—	—
	建筑垃圾	t	—	—	29 789.9	37 200.3
	钢材回收	t	—	—	3 134	3 374.4
	覆土	t	66 199.7	82 667.4	—	—

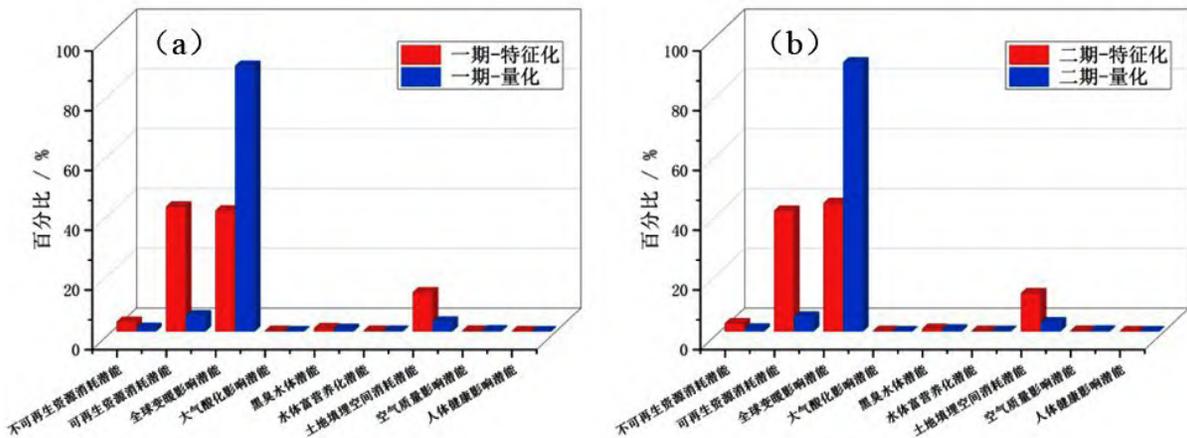


图1 特征化/量化结果对比

规模为750 kWp,采用2 376块320 Wp的多晶硅光伏组件,敷设面积为4 752 m²。测算得到光伏系统25

年总发电量约为21 077 080.44 kWh,平均日发电量为2 309.8 kWh/d。

通过式(2)计算可以得到光伏系统指标值为:
 $LCIA_{光}=3.65 \times 10^2$ 。

将光伏系统纳入污水厂全生命周期影响整体评价,则 $LCIA_{总}^{\prime}=2.00 \times 10^4$, $LCIA$ 降低 1.79%, 即其对环境综合影响会产生正效益,这与相关研究结论一致^[3]。

2.4.2 污泥资源化利用

目前,案例厂服务区内未建成污泥焚烧中心,为充分利用区域资源,综合考虑运距及处理处置费用等,并参考国内相关区域污水厂污泥处理处置情况^[4-5],案例厂污泥资源化拟采用热解+厌氧消化。厌氧消化的平均回收潜力采用文献报道的 1482 kWh/t^[5]。根据表 2 中的折算干污泥量,计算得到案例厂可回收的能量为 67 958.09 kWh/d。通过式(1)、式(2),计算可以得到污泥资源化指标值为: $LCIA_{泥}=1.12 \times 10^4$ 。

根据污水厂总体能耗计算可得,案例厂仅通过热解+厌氧消化的方式对污泥进行资源化利用,在不考虑其他损失的情况下, $LCIA_{合}$ 可由原来的 2.04×10^4 降低至 9.22×10^3 ,降低 54.75%,减排效益明显,基本达到国内外先进的污泥资源量利用的电能、热能水平^[4]。

2.4.3 再生水利用

案例厂现有出水数据与相关标准对比后可知,案例厂实际出水水质明显优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类,完全符合再生水水质需满足《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)和《再生水水质标准》(SL 368—2006)的要求。

城市给水系统主要包括取水、制水、供水系统,均为间接碳排放^[6-7],案例厂的再生水利用碳排放核算结果中,能耗强度 $W_{制}$ 为 0.232 kWh/m^3 , $W_{管}$ 为 907.41 kWh,其中再生水的平均提升高程,综合考虑潍坊地区地形特点,由出水井取水计,取 10 m。另外,自来水制备能耗量为 $2\ 113\ 086.84 \text{ kWh/a}$,碳排放量为 $1\ 699\ 344.44 \text{ kg/a}$;再生水利用能耗量为 $331\ 203.7037 \text{ kWh/a}$,碳排放量为 $266\ 354.018\ 5 \text{ kg/a}$ 。由于案例厂的出水水质已经满足相关再生水利用标准,再生水利用可实现显著的理论减排效益(84.33%),这相关减排效益与文献报道的结果基本相同^[6]。

同时,再生水利用时,尾水中所含污染物与直接排放相比,可尾水中所含减少剩余污染物直接进入天然水体所带来的环境风险。

3 结论与展望

(1)从短期看,提标有益于水体外源污染物减排,但现有污水厂深度处理普遍依赖外部药剂添加进行过程强化,这使得污水处理往往过度。污水尾水 COD 标准若能维持在合理区间,则综合考虑全生命周期的影

响,环境正效益会更明显。

(2)案例厂除磷采用了大量的外加化学药剂,并采用自来水对 PAM 药剂进行溶解分散,这导致了案例厂可再生资源消耗明显高于其他研究结果。后续需要进一步优化除 P 工艺,提升生物除磷效果,降低药剂用量和新鲜用水量。

(3)案例厂接纳了较高比例的工业纳管尾水,这导致了上游企业工艺调整后,尾水中物质组分变化对污水处理工艺产生冲击,进而增加药剂投加(包括碳源、混凝剂、活性炭等)的用量,最终导致整体环境效益的下降。因此,需要尽快建立水质监控预警体系,提升污水厂抗冲击负荷和缓冲能力,降低对应急药剂的依赖。

(4)全生命周期综合效益结果分析表明,绿色能源的使用,可提升污水厂的整体环境效益,后续应继续挖掘污水潜能(如污水余热热能等),进一步降低污水厂对外部能源的需求,提升污水厂能源回收和碳中和的能力。

(5)依据国内现有成熟的污泥资源化项目进行核算,案例厂理论可回收的能量为 67 958.09 kWh/d,污泥资源化可使 $LCIA_{合}$ 由 2.04×10^4 降低至 9.22×10^3 ,降低 54.75%,减排效益明显。

(6)由于尾水再生利用并未纳入 LCA 评估范围。但是案例厂尾水出水水质完全满足相关规范要求,按照 25% 再生水利用率考察,84.33% 的碳减排潜力表明,案例厂尾水具有较好的利用潜力,在污水厂后续的优化改造中,应充分考虑尾水的再生利用。

参考文献

- [1] FANG L L, VALVERDE-PÉREZ B, DAMGAARD A, et al. Life Cycle Assessment as Development and Decision Support Tool for Wastewater Resource Recovery Technology[J]. Water Research, 2016, 88: 538-549.
- [2] 董星辰. 我国省域典型工业部门废水资源化利用的协同环境效益研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [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.
- [4] 欧阳伊雯, 庞蘅洛, 叶红丽, 等. 重庆市城镇污水处理系统的碳排放特征及减污降碳措施建议[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2841-2847.
- [5] 瞿林燕. 江苏省典型污水处理厂污泥资源化利用潜力评估[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [6] 秦波. 上海市某污水厂再生水利用途径探究及效益分析[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 144-148.
- [7] 郑轶丽, 马军, 魏婷, 等. 城市水务系统碳排放测算及减碳对策分析: 以成都市为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1778-1787.