

述评与讨论

污水处理环境综合效益评价方法及案例应用

郝晓地, 王向阳, 江瀚, 李爽

(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: 污水处理作为消除水环境污染的重要功能单元,对其在改善水环境之外的其他环境影响缺乏评价。通过修正并优化污水处理全生命周期评价(LCA)方法,建立全生命周期评价与多目标数学规划法相耦合(LCA-MOP)模型评价实际污水处理厂后揭示,污水处理厂对环境产生的综合效益居然是负值!当出水排放标准提高时,污水处理对环境产生的负效益则会加剧。着眼于全生命周期评价,传统污水处理实际上是一种环境的“污染源”,至少有将水污染转嫁为大气污染之嫌。因此,改善水体环境质量一味依靠提高污水处理排放标准,并重在考核出水水质和运行成本,势必将污水处理推向“污染大户”的边缘。为使污水处理对环境产生的负效益降至最低程度,必须大力发展可持续污水处理技术,尽可能实现污水资源化、能源化之远大目标。只有污水处理升级至“绿色”并逐渐向“蓝色”过渡,方有可能实现对环境“零”影响甚至取得“正”效益。

关键词: 污水处理; 环境综合效益; 全生命周期评价(LCA); 出水标准; 水环境效益; 大气污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)06-0006-10

Evaluation Method of the Environmental Comprehensive Benefit for Wastewater Treatment and a Case Study

HAO Xiao-di, WANG Xiang-yang, JIANG Han, LI Shuang

(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: As an important functional unit for alleviating water environmental pollution, wastewater treatment has rarely been assessed on the other environmental impacts besides on its water environment benefit. By modifying and optimizing the method of life cycle assessment (LCA) used on wastewater treatment, a coupling model (LCA-MOP) associated with the multi-objective programming approach was set up to assess an actual wastewater treatment plant (WWTP). The assessment revealed that the environmental comprehensive benefit of wastewater treatment was a negative value. The adverse environmental influence would be aggravated when the effluent discharging standards were enhanced. Based on LCA, conventional wastewater treatment was actually a source of environmental pollution, which

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878022); 北京“未来城市设计高精尖中心”项目(2018)

was at least suspected to convert pollution from water to air. For this reason, the way, improving water environment quality only by enhancing the effluent discharging standards and focusing on the effluent quality and operation costs, would push wastewater treatment to the margin of "heavy polluter". To reduce the adverse environmental influence of wastewater treatment to a minimum value, sustainable wastewater treatment technologies must be developed so that the ambitious target extracting resource and energy from wastewater should be realized. Thus, wastewater treatment needed to be upgraded to "green" and gradually developed to "blue", only in this way, its "zero" impact on the environment could be accomplished, and even the "positive" benefit would be achieved.

Key words: wastewater treatment; environmental comprehensive benefit; life cycle assessment (LCA); effluent criteria; water environment benefit; air pollution

传统污水处理以能源、资源消耗为代价而去除污水中的有机物(COD)与营养物质(N、P),以获得期望的水环境效益。某种程度上说,传统污水处理有将水污染转化为大气污染之嫌,且存在所含热能/化学能及不可再生资源(磷)流失现象^[1]。仅关注出水水质,一味提高排放标准的做法对环境综合效益并不一定非常有利,可能还会带来负作用。因此,需要对污水处理进行环境综合效益评价,不仅关注出水水质,还应关注包括能源/资源消耗以及其他环境影响在内的环境综合效益指标,以综合衡量污水处理产生的环境综合效应。对此,全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法作为一种客观而又具体的评价工具,已被用于污水处理环境综合影响评价之中。

在国内外有关LCA在污水处理中的实际应用已较为成熟,常用指标体系有CML 2001、EDIP、EI 99等^[2];评价标准国外有ISO 14040—2006和ISO 14044—2006,国内有《环境管理 生命周期评价原则与框架》(GB/T 24040—2008)和《环境管理 生命周期评价要求与指南》(GB/T 24044—2008)。然而,国内外目前针对污水处理的LCA方法多限于核算污水处理厂环境负荷与当量值,少有对不同影响归一化后评价环境综合效益的研究,特别是针对出水标准提高对环境综合效益产生的变化。

根据现有国内外LCA准则与技术手册,通过修正并优化LCA模型,建立与多目标数学规划方法相耦合模型,应用实际污水处理厂数据,定量评价污水处理对环境产生的综合效益。同时,也特别针对我国目前污水处理标准不断提高之趋势,评价高标准排放对水环境之外产生的不良影响,并比较其对环境产生的综合影响值。

1 评价方法

通过对现有用于污水处理LCA方法的总结与分析,优化模型,建立可用于核算出水标准提高后对环境产生的综合影响方法模型。

国内现有污水处理LCA方法主要问题是各自为政,在初衷与结果上还没有形成一致性的方法;有人没有进行结果归一便直接计算综合影响^[3],更多的人采用国外归一化基准值和权重进行计算,使结果常常脱离我国实际情况^[4-5]。为此,研究尝试对LCA方法进行改进与优化;根据2012年和2013年《中国环境统计年鉴》等文献,将大部分归一化基准值进行本土化;结合国内实情,采用层次分析法获得更为合理的权重值;构建影响评价结果的归一化、赋予权重而获得环境综合影响指标的方法;在评价环境影响改善过程中,引入数学方法中的多目标规划方法,创建在污水处理过程中处于对立面水污染与大气污染平衡、优化减量方法。通过对LCA方法的改进与优化,最后以某污水厂的实际数据评价出水标准提高对环境产生的综合效益。

基于国外ISO评价标准与传统方法论,对LCA用于污水处理厂环境综合影响评价包括5个阶段:目标与范围界定;清单分析;影响评价;结果分析;影响改善^[6-8]。

1.1 目标与范围界定

LCA评价目标为污水处理厂因污水处理造成的直接环境影响,以及物料和能源投入造成的间接环境影响;评价范围为污水处理厂进水至出水范围之内的边界;时限为建设、运营和拆除3个阶段^[7]。

1.2 清单分析

LCA评价数据清单包括污水处理厂建设、运行和拆除三阶段的物耗与能耗。这就需要对LCA过

程内所有投入与产出进行数据分析,包括建材、药剂生产资源/能源消耗、物料运输能耗、污水处理直接能耗以及直接排放至环境的水、固、气等污染物^[9],涉及详细清单分析见表 1。

表 1 污水处理厂 LCA 环境影响评价清单分析

Tab. 1 LCA inventory for assessing the effects of WWTPs on the total environment

| 项目 | 影响物质 | 质量/体积 | 项目 | 影响物质 | 质量/体积 |
|------|-------|------------------------------|------|---------|-------|
| 环境排放 | 水体污染物 | COD | 资源消耗 | 钢筋 | + |
| | | BOD ₅ | | 水泥 | + |
| | | TN | | 木材 | + |
| | | NH ₄ ⁺ | | 其他建材 | + |
| | | TP | 能源消耗 | 絮凝剂/混凝剂 | + |
| | | SS | | 消毒剂 | + |
| | | 重金属 | | 碳源/乙酸钠 | + |
| | 大气污染物 | CO ₂ | | 再生水 | - |
| | | CH ₄ | | 磷回收 | - |
| | | CO | | 电 | + |
| | | NO _x | | 煤 | + |
| | | SO ₂ | | 石油 | + |
| | 固体污染物 | 栅渣 | | 厌氧消化 | - |
| | | 沉砂 | | 热泵 | - |
| | | 脱水污泥 | | | |

注: “+”、“-”分别代表统计项对环境影响产生正、负贡献,即对环境产生的负、正效益。

1.3 影响评价

生命周期影响评价 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 为整个 LCA 过程的核心内容,难度和争议较大,目前并没有被普遍接受^[10-11],较为接受的 LCIA 方法有: 丹麦的 EDIP 方法、莱顿大学环境研究中心的 CML2001 方法、生态指标法 Eco-indicator 99 和瑞典 EPS 方法等^[11-12]。

国际环境毒理学与化学学会 (SETAC)、国际标准化组织 (ISO) 和美国国家环保署 (EPA) 等组织将 LCIA 分为 3 个步骤: 分类、特征化与量化^[6,10]。

1.3.1 分类

分类是对不同环境影响进行分类,包括能源/资源消耗、生态影响和人体健康三大类^[13],具体如图 1 所示。

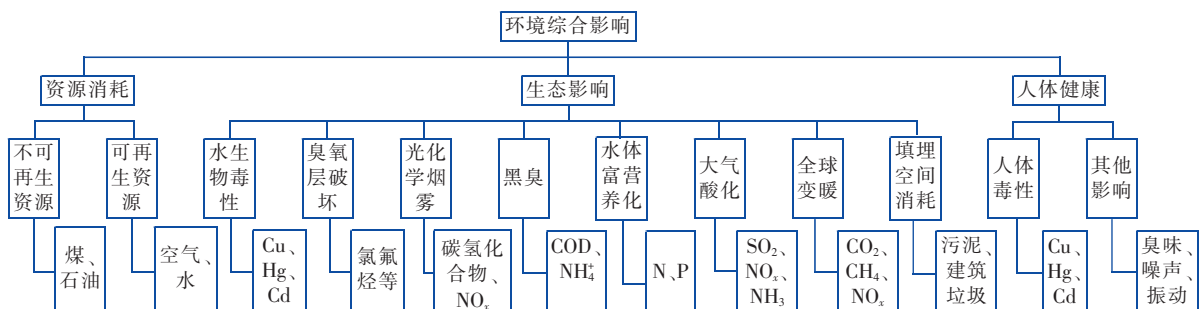


Fig. 1 Classifications of the environmental impacts of wastewater treatment

1.3.2 特征化

根据环境影响分类,使用影响因子可以计算出各种影响环境负荷。采用美国 EPA 公布的环境因子实施定量化^[2]。每项影响的环境负荷 (Environmental Burden, EB) 可根据下式计算^[14-15]:

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

式中 i ——排放物质中所含各种化学物质种类
 n ——排放物质中各影响物质总数
 m_i ——清单分析中第 i 种物质的质量
 PF_i ——第 i 种物质对某类环境所造成影响

的特征化因子(采用美国 EPA 提供的数值)

1.3.3 量化

通过式(1)获得环境负荷(即环境影响特征化结果)后,需对结果进行归一化,使不同的影响环境负荷间可以进行相互比较,即,统一为归一化结果(Normalization Environmental Burden, NEB)。归一化方法是利用不同环境影响类型的本土化基准值,将 EB 与基准值对比,取相对值即可^[16]。

进行量化的过程主要是对数据归一化处理后不同环境影响赋予权重,以获得环境综合影响值。研究中采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)计算权重;AHP 是一种实用、多准则决策方法,其过程是根据问题性质以及所要达到的目标把复杂的环境问题分解为不同组合因素,形成一个自上而下的支配关系^[15];AHP 过程主要是建立不同环境影响间重要性比较关系,即, A - P 判断矩阵。判断矩阵的构造过程主要分为两步:①根据不同环境影响两两间相对重要性,按照表 2 所示的重要性进行标度,并进行矩阵的逻辑一致性检验^[15];②计算权重值 W。

表 2 重要性标度

Tab.2 Scales of importance

| 标度 a_{ij} | 定义 | 标度 a_{ij} | 定义 |
|-------------|------------------|-------------|------------------------------------|
| 1 | i 与 j 因素同等重要 | 9 | i 比 j 因素绝对重要 |
| 3 | i 比 j 因素略为重要 | 2, 4, 6, 8 | 中间状态 |
| 5 | i 比 j 因素较为重要 | 倒数 | 若 j 与 i 因素比较,得到值为 a_{ij} 的倒数 |
| 7 | i 比 j 因素非常重要 | | |

最终,根据式(2)可计算出污水处理厂环境综合影响值。本研究的最终结果可作为不同工艺、不同规模、不同污水处理厂在相同功能单元下评价污水处理厂“环保”性能的一般方法。

$$LCIA = \sum_{i=1}^n W_i NEB_i \quad (2)$$

式中 LCIA——环境综合影响指标值

W_i ——第 i 种环境影响类型的权重

NEB_i ——经过数据归一化后的第 i 种环境影响类型的环境负荷(EB)潜能值

1.4 结果分析与影响改善

LCA 环境影响评价的最终目的是对评价结果进行分析,进而提出降低影响的技术策略^[6]。目前国内外有关 LCA 研究,大多是仅对评价结果进行分析与解释;即使有研究提出改良方案,也没有采用实

际污水处理厂数据进行验证^[17-19]。本研究引入经济学中多目标优化方法,取长补短,平衡各影响类型,试图找到使环境综合影响最小化的途径。

多目标优化(Multi-objective Programming, MOP)实际上是数学规划中的一个分支,其实质是把多种目标化解为单一目标的最优化方法。以此基础进行多目标优化,以获得最优决策方法^[20]。在污水处理厂 LCA 评价中,提高污水处理厂出水水质有利于降低受纳水体富营养化和缓解水体黑臭现象。但是,出水水质提高意味着污水处理药耗/能耗、温室气体排放量等相应增加。因此,出水水质与能耗/温室气体间平衡需要最优化决策。

本研究通过建立 LCA - MOP (Life Cycle Assessment - Multi-objective Programming) 环境综合影响评价及优化相耦合模型,尝试对分别满足一级 A 出水和“准 IV 类水”两种标准下的实际污水处理厂进行环境综合效益评价,以分析出水标准提高对环境产生的综合影响,试图寻求环境综合影响最小化的有效途径。

2 应用案例

2.1 目标与范围界定

应用案例采用山西某市一市政污水处理厂建设、运行实际数据及拆除估算值。该厂一期工程为氧化沟工艺,设计流量 $Q = 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (实际 $Q = 5.92 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$);二期工程采用 5 段 Bardenpho 工艺,设计流量 $Q = 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (实际 $Q = 9.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。污水经两期工艺分别处理后,在高效纤维滤池内加入化学药剂,用以强化除磷。该厂出水水质设计标准为一级 A,服务年限为 20 年;剩余污泥脱水后外运(6 km)填埋处理。评价中将功能单位(Functional Unit, FU)定义为处理 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 污水产生的环境影响,即, $FU = 1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 数据清单

应用案例数据清单显示于表 3。因该污水厂一、二期处理水汇合后经过滤池深度处理,故最终出水数据相同。由表 3 可知,该厂出水除 SS 外,其余均低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》征求意见稿中特别排放限值,即,地表水环境质量标准 IV 类,所以,出水总体上接近“准 IV 类水”。因此,应用评价以此标准为依据。

计算过程中,所有投入能源和资源生产过程中造成的环境影响的特征化因子从文献^[2,3,5]中获得;

污水处理和污泥处理/处置(填埋)过程碳排放计算亦参考文献已有研究方法^[21]。其中,拆除阶段主要投入为能耗;根据相关参考文献,拆除能耗为 $95 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,或总拆除能耗为建设能耗的90%^[3]。拆除过程中,钢材可以回收再生,其余为建筑垃圾;我国钢材平均回收率为 $0.38 \text{ t}/\text{t}$ ^[22];回收钢材可以抵消建设阶段的建材消耗,废钢回收过程产生的环境影响亦被列入计算结果。

表3 案例污水处理厂LCA评价主要影响物清单

Tab. 3 Inventory of main subjects related with LCA in the case-study plant

| 项目 | 影响物质 | 输入 | | 输出 | |
|------|---|-------------------|-------------------|--------|--------|
| | | 一期 | 二期 | 一期 | 二期 |
| 建设阶段 | 钢筋/t | 3 954 | 8 510 | — | — |
| | 水泥/t | 14 635 | 59 820 | — | — |
| | 木材/ m^3 | 1 038 | 1 830 | — | — |
| 运行阶段 | 直接能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ | $4.50\text{E}+06$ | $5.68\text{E}+06$ | — | — |
| | COD/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 366 | 406 | 18 | |
| | BOD ₅ / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 217 | 168 | 4 | |
| | TN/ $(\text{mgN} \cdot \text{L}^{-1})$ | 47.80 | 45.30 | 13.00 | |
| | NH ₄ ⁺ / $(\text{mgN} \cdot \text{L}^{-1})$ | 30.80 | 22.90 | 0.63 | |
| | TP/ $(\text{mgP} \cdot \text{L}^{-1})$ | 5.31 | 7.24 | 0.25 | |
| | SS/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 191 | 333 | 6 | |
| | 能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$ | 0.33 | 0.31 | — | — |
| | PAC/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$ | 3.90 | 6.03 | — | — |
| | PAM/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$ | 0.09 | 0.14 | — | — |
| | 次氯酸钠/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$ | 2.63 | 4.06 | — | — |
| | 乙酸钠/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$ | 7.97 | 12.31 | — | — |
| | 污泥(含水率为80%)/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$ | — | — | 56 | 104 |
| | 再生水/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ | — | — | 47 259 | |
| 拆除阶段 | 拆除能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ | $4.05\text{E}+06$ | $4.19\text{E}+06$ | — | — |
| | 运输能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ | $3.03\text{E}+04$ | $4.42\text{E}+04$ | — | — |
| | 建筑垃圾/t | — | — | 30 503 | 44 432 |
| | 钢材回收/t | — | — | 1 503 | 3 234 |

2.3 环境影响分类

污水处理LCA环境效益评价时需要对环境响应进行分类,以确定不同影响之数值。受案例污水处理厂实际数据所限,案例评价只选取那些重要环境影响指标,分别为全球变暖潜能(Global Warming Potential, GWP)、水体富营养化潜能(Eutrophication Potential, EP)、大气酸化潜能(Acidification Potential, AP)、非生物资源枯竭潜能(Abiotic Resources Depletion Potential, ADP)、人体毒性潜能(Human Toxicity Potential, HTP)、黑臭水体潜能

(Black Odor Potential, BOP)、填埋空间消耗(Landfill Space Depletion, LSD),如表4所示。

表4 案例污水处理厂环境影响分类

Tab. 4 Classifications of the environmental effects on the case-study plant

| 影响类别 | 污染物质 | 排放来源 |
|-----------|---|---------------------------|
| 全球变暖潜能 | CO ₂ 、CH ₄ 、NO _x | 处理过程形成的直接排放以及能耗、药耗形成的间接排放 |
| 水体富营养化潜能 | P、N | 出水排放 |
| 大气酸化潜能 | SO ₂ 、NO _x | 消耗电能生产过程 |
| 非生物资源枯竭潜能 | 煤、石油 | 消耗电能生产过程、物料运输过程 |
| 人体毒性潜能 | Cu、Hg、Cd | 出水排放 |
| 黑臭水体潜能 | COD、NH ₄ ⁺ | 出水排放 |
| 填埋空间消耗 | 脱水污泥、建筑垃圾 | 污水处理过程、建筑物拆除 |

3 评价“准IV类水”影响

3.1 LCA特征化结果与分析

案例研究中采用当量模型,即选取某一项目为参照物,计算其他项目对同类环境影响负荷值EB,不同项目排放因子与影响潜能因子选自相关文献^[2,3,15]。其中,案例厂再生水被用于邻近电厂作为工业冷却水,相应抵消新鲜水生产的LCA环境影响已列入计算(因缺乏工业冷却水生产LCA详细评价,案例研究只涉及温室效应削减量)。此外,因出水中NH₄⁺浓度极低(年平均为 $0.63 \text{ mgN}/\text{L}$),远远低于黑臭水体NH₄⁺浓度限值($8 \text{ mgN}/\text{L}$)^[23],故黑臭水体潜能中不包括NH₄⁺影响。为避免重复计算,将NH₄⁺全部计入富营养化影响项目。

需要指出的是,运营阶段中核算污水处理温室气体直接排放量中因缺乏数据只计算生源性CO₂,并未计算化石碳来源CO₂直接排放量(石油化工产品贡献COD^[24])。若把这部分化石碳排放量计入,污水处理直接碳排放总量和GWP在LCIA中的比例将会变大,即污水处理带来的大气污染效应更加严重。此外,污泥处理、处置全过程(包括运输、填埋、填埋气体释放、渗滤液污染地下水等)所造成的气、水、固影响均被计入每FU污水处理产生的环境负荷之内。

经统计分析,最终可以得到案例污水处理厂在LCA框架下,处理1FU($1 \times 10^4 \text{ m}^3$)污水达到“准IV类水”标准后,因材料、能耗及直接环境排放造成的

环境影响结果。环境影响特征化结果如表 5 所示, 环境影响占比见图 2。

表 5 案例污水处理厂环境影响特征化结果

Tab.5 Characterization results of the case-study plant on the environmental effects

kg 当量物质 · 10⁴ m⁻³

| 项 目 | 环境影响值 | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 建设阶段 | | 运行阶段 | | 拆除阶段 | | 合计 | |
| | 二期 | 一期 | 二期 | 一期 | 二期 | 一期 | 二期 | 一期 |
| 全球变暖 | 9.1E+02 | 1.5E+03 | 2.2E+04 | 2.2E+04 | 1.1E+02 | 9.1E+01 | 2.4E+04 | 2.3E+04 |
| 水体富营养化 | 2.2E-03 | 5.3E-03 | 6.3E+01 | 6.3E+01 | 1.3E-03 | 1.8E-03 | 6.3E+01 | 6.3E+01 |
| 大气酸化 | 4.1E+00 | 6.5E+00 | 2.8E+02 | 3.3E+02 | 4.9E-02 | 6.8E-02 | 2.9E+02 | 3.3E+02 |
| 非生物资源枯竭 | 1.7E-04 | 3.4E-04 | 1.1E-03 | 1.0E-03 | 3.1E-05 | 3.2E-05 | 1.3E-03 | 1.4E-03 |
| 人体毒性 | 3.8E-04 | 6.3E-04 | 7.8E+03 | 9.4E+03 | 1.4E-07 | 9.5E-08 | 7.8E+03 | 9.4E+03 |
| 黑臭 | 1.4E-01 | 3.0E-01 | 4.0E+01 | 4.0E+01 | 5.3E-06 | 3.6E-06 | 4.0E+01 | 4.0E+01 |
| 填埋空间消耗 | 8.5E-03 | 1.1E-02 | 9.5E+03 | 1.1E+04 | 4.6E+02 | 6.7E+02 | 9.9E+03 | 1.2E+04 |

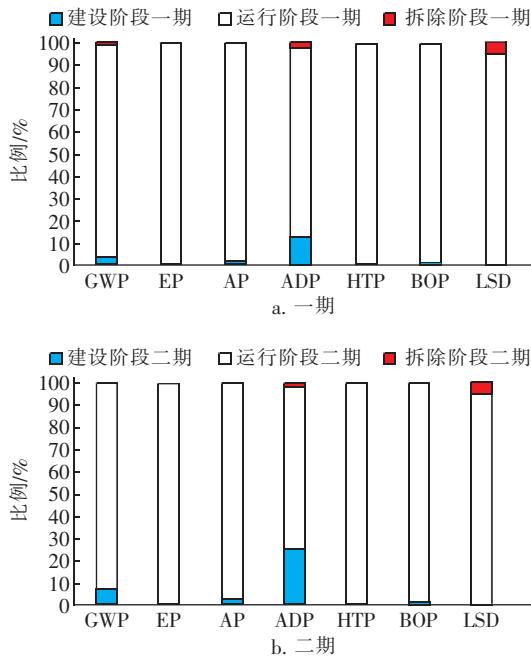


图 2 案例污水处理厂不同阶段对环境影响占比

Fig.2 Percentage of the environmental effects of the case-study plant at the different stages

表 5 显示, 污水处理厂环境负荷中, 填埋空间消耗(LSD) 总量最大, 全球变暖影响潜能(GWP) 次之, 非生物资源枯竭潜能(ADP) 总量最小, 不同环境影响类型总量差别较大。因不同影响类型采用的当量物质不同, 故需要使用基准值归一化和无量纲化后才能进行相互比较。结合表 5 和图 2 可知, 环境影响主要发生在运营阶段: 一期运营阶段 GWP = 95.7%, AP = 98.5%, ADP = 84.4%, LSD = 95.0%, 二期运营阶段 GWP = 93%, AP = 98%, ADP = 73.2%, LSD = 94.0%; 人体毒性潜能(HTP)、水体

富营养化潜能(EP) 与黑臭水体潜能(BOP) 影响也几乎全部来自于运营阶段; 与目前有关研究结果完全一致^[2-3]。一、二期各项环境影响在不同阶段中占比大致接近, 仅在 ADP 项上二期建设阶段比例明显较高, 原因是: ①二期采用了 5 段 Bardenpho 工艺, 因流程长导致建设阶段各项环境影响均比一期高; ②一期采用了氧化沟工艺, 其工艺特性决定它在运行阶段对环境的影响更大。特征化结果表明, 污水处理厂对环境产生的净效益为负值; 若没有足够环境影响抵消手段(如能源、资源回收) 时, 污水处理对环境产生的负影响很大。如果出水排放标准更加严格, 仅靠延长工艺流程来满足出水要求, 势必导致建设与拆除阶段对环境的影响增大。因此, 一味靠提高出水标准而改善水体环境质量的结果恐怕会产生更大的环境综合影响, 并不“环保”。

3.2 环境影响标准化结果

因不同环境影响类型潜能值均以不同参照物作为当量基础, 致使不同环境影响类型间无法直接进行比较, 所以, 需要将特征化结果进行数据归一化(标准化), 以得到无量纲可对比数值。为了使标准化结果更加符合我国实际情况, 案例研究中尽量将归一化基准值本土化, 如, GWP 基准值采用“全球碳计划”组织公布的碳排放报告中中国人均年碳排放值; ADP 基准值采用《2012 年 BP 世界能源统计年鉴》里中国能源消费数据; BOP 和 LSD 基准值分别采用 2013 年《中国环境统计年报》中数据; 其余环境影响归一化基准值均采用 CML2001 - Nov. 2010 评价标准体系中数据^[18]。所有基准值计算均采用同一年数据(2010 年) 进行归一化计算。在“准 IV 类

水”标准下,案例污水处理厂 LCA 归一化因子与计算结果见表 6。

表 6 案例污水处理厂环境影响总量归一化结果

Tab. 6 Normalization results of the environmental effects for the case-study plant

| 环境影响类型 | 归一化基准值/ ($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) | 一期 | 二期 |
|--------|--|-------------------|-------------------|
| GWP | $6.60\text{E}+03$ | $3.56\text{E}+00$ | $3.51\text{E}+00$ |
| EP | $1.58\text{E}+11$ | $4.02\text{E}-10$ | $4.02\text{E}-10$ |
| AP | $2.39\text{E}+11$ | $1.19\text{E}-09$ | $1.39\text{E}-09$ |
| ADP | $1.51\text{E}-03$ | $8.50\text{E}-01$ | $9.20\text{E}-01$ |
| HTP | $2.58\text{E}+12$ | $3.04\text{E}-09$ | $3.66\text{E}-09$ |
| BOP | $3.20\text{E}+01$ | $1.27\text{E}+00$ | $1.28\text{E}+00$ |
| LSD | $2.43\text{E}+02$ | $4.08\text{E}+01$ | $4.96\text{E}+01$ |

表 6 归一化结果显示,全球变暖潜能(GWP)与黑臭水体潜能(BOP)数值处于同一量级。换句话说,虽然 GWP 总量较大,但对污水处理厂综合环境影响指标的贡献与出水黑臭潜能程度相当。此两项与填埋空间消耗(LSD)和不可再生资源消耗潜能(ADP)项环境影响归一化值远远大于其余项,成为环境综合影响的主导因素。出水水质与温室效应等环境影响类别处于矛盾位置,即,如果不断提高出水排放标准,BOP 与 EP 固然会下降,但伴随而来的则是 GWP 等项升高。进一步说明,一味提高出水排放标准,仅关注出水水质和运行成本,而不从宏观角度把握污水处理厂环境综合影响指标,最终将得到并不整体“环保”的结果。

3.3 环境影响量化结果

根据文献和案例污水处理厂当地不同环境影响之重要性^[21],可以得到不同环境影响类型相对重要性判断矩阵,如表 7 所示。

表 7 环境影响判断矩阵 A

Tab. 7 Judgement matrix A of the environmental effects

| 影响类型 | GWP | BOP | ADP | EP | HTP | AP | LSD |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| GWP | 1 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| BOP | 1/3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| ADP | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 |
| EP | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| HTP | 1/4 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 1 | 2 | 4 |
| AP | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1/2 | 1 | 3 |
| LSD | 1/6 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/4 | 1/3 | 1 |

为确保判断矩阵的逻辑性,需要进行一致性检验。经计算,判断矩阵 A 的一致性指标 $\text{CR} =$

$0.06 < 0.1$,说明该判断矩阵具有逻辑一致性。将标度矩阵按列进行正规化,得到正规化矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0.382 & 0.474 & 0.346 & 0.340 & 0.296 & 0.263 & 0.231 \\ 0.127 & 0.158 & 0.346 & 0.113 & 0.148 & 0.158 & 0.115 \\ 0.191 & 0.079 & 0.173 & 0.340 & 0.296 & 0.263 & 0.269 \\ 0.127 & 0.158 & 0.058 & 0.113 & 0.148 & 0.158 & 0.115 \\ 0.095 & 0.079 & 0.043 & 0.057 & 0.074 & 0.105 & 0.154 \\ 0.076 & 0.053 & 0.035 & 0.038 & 0.037 & 0.053 & 0.115 \\ 0.064 & 0.053 & 0.025 & 0.038 & 0.019 & 0.018 & 0.038 \end{bmatrix}$$

再将每行相加,正规化,最终得到向量:

$$W = [0.321 \quad 0.161 \quad 0.222 \quad 0.121 \quad 0.084 \quad 0.056 \quad 0.035]^T$$

这就是案例污水处理厂各环境影响类型在环境综合影响指标值中的权重值。

3.4 案例厂环境综合效益

案例污水处理厂一、二期每处理 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 污水的 LCA 环境影响特征化归一结果,以行向量形式分别表示为:

$$A_1 = [3.56 \quad 4.02\text{E}-10 \quad 1.19\text{E}-09 \quad 0.85 \quad 3.04\text{E}-09 \quad 1.27 \quad 40.80]$$

$$A_2 = [3.51 \quad 4.02\text{E}-10 \quad 1.39\text{E}-09 \quad 0.92 \quad 3.66\text{E}-09 \quad 1.28 \quad 49.60]$$

通过计算 $A_1 \times W$ 、 $A_2 \times W$,可以得到在达到“准 IV 类水”标准情况下,每 FU 污水处理造成的 LCA 环境综合影响指标值分别为: $\text{LCIA}_1 = 2.96$, $\text{LCIA}_2 = 3.27$ 。

从每 FU 污水处理造成的 LCA 环境综合影响指标值分析,二期五段 Bardenpho 工艺对环境影响程度更大,即,综合环境效益更低,这与目前研究认识水平完全一致^[25]。究其原因,主要是工艺特点与规模效应造成五段 Bardenpho 工艺运行过程中单位电耗比氧化沟工艺高。再者,山西以火电为主,单位电耗升高也势必导致电力生产过程中造成的温室气体间接排放、大气酸化和非生物资源枯竭等环境影响数值增大。

整体上看,环境综合影响指标由出水水质黑臭潜能、温室效应潜能、填埋空间消耗和非生物资源枯竭潜能所决定,其余影响类型对环境综合影响的贡献几乎可以忽略。此外,这四项影响类型改善手段处于矛盾位置,可为后面多目标优化提供基础,即,通过适当降低出水要求,满足设计出水标准(一级 A)有可能会使 LCIA 降低。

4 降低出水标准对环境产生的综合效益

如上所述,不同环境影响类型之间存在矛盾,如提高出水水质虽然可以降低黑臭潜值和富营养化潜值,但伴随而来的却是温室气体排放量增加、能耗增多导致的大气酸化和不可再生资源消耗增多。因此,有必要对不同环境影响类型进行权衡,以获得污水处理厂环境综合影响最优化决策,即使环境综合影响数值降至最低。为此,上述案例研究采用多目标决策方法进行评价。

多目标决策是指具有两个以上决策目标,并且需用多种标准进行评价和优选方案的决策^[20]。在案例研究中,评价目的是污水处理厂 LCA 内的环境综合影响指标,且主要对 GWP、BOP、HTP、EP、AP、ADP 和 LSD 这 7 项环境影响类型进行评估。但是,与出水水质相关的 BOP、EP 和 HTP 影响与其余项改善是矛盾的,故而提出最小化环境综合影响决策:①在不超过设计出水标准前提下,适当放宽出水要求,可使环境综合影响指数下降,让污水处理厂更加“环保”;②GWP、AP 和 ADP 这三项环境影响改善措施不相矛盾,可通过采用清洁电力能源、绿色建材等同步降低环境影响,最终使污水处理厂环境综合影响值降低。

因案例污水处理厂设计出水标准为一级 A,故出水质量降低极限值为一级 A 排放标准。以此标准作为环境综合影响改善极限,计算其余各项环境影响类型在此极限之下的数值。出水水质降低会使剩余污泥量和化学污泥量减少,进而减小环境影响,具体污泥减少量根据该厂产泥率计算;深度脱氮除磷要求降低,也会使案例厂投加碳源和絮凝剂用量减少;缩短工艺流程,以减少新建深度处理设施带来的环境影响。计算过程与上述“准 IV 类标准”完全相同。

利用式(1)得到改善后的一、二期 LCA 环境影响特征化归一结果分别为:

$$A'_1 = [2.58 \quad 4.96E-10 \quad 1.05E-09 \quad 0.46 \quad 2.83E-09 \quad 3.17 \quad 38.10]$$

$$A'_2 = [2.61 \quad 4.96E-10 \quad 1.26E-09 \quad 0.64 \quad 3.44E-09 \quad 3.17 \quad 46.80]$$

最终得到一级 A 出水下的环境综合影响指标值分别为:一期 LCIA₁' = 2.77、二期 LCIA₂' = 3.13。相比“准 IV 类水标准”,环境综合影响值(LCIA)分别降低 6.4% 和 4.3%,对环境综合影响均有所降低。

一期环境综合影响降低比例较大,主要是因为工艺流程简单、单位电耗等比二期降幅大。二期 LCIA 虽然减少比例不是很大,但亦明显表明,在达到设计出水标准(一级 A)后,再进一步提高出水水质,追求所谓的地表 IV 类水甚至于更高要求,最终对环境产生的综合效益将会降低。

出水标准适当降低,对环境产生的综合影响更小,主要是因为 C、N、P 去除量分别减少,使污水处理过程直接碳排放大为减少。其次,出水标准降低,单位电耗减少,因电耗带来的间接碳排和电能生产过程污染物排放量亦大幅减少。再者,除 P 压力减小,药耗也会相应降低,亦对间接碳排减少、物耗降低和化学污泥量减少有所贡献。可见,适当降低出水排放标准,可有效提高污水处理厂对环境产生的综合效益,会使污水处理厂变得更加“环保”。

5 结论

修正并优化用于污水处理的全生命周期评价(LCA)方法,建立全生命周期评价与多目标数学规划法相耦合(LCA-MOP)模型,用以评价并改善污水处理对环境产生的综合效益。

采用国内污水处理厂实际数据,应用 LCA-MOP 模型分别对满足“准 IV 类水”和达标一级 A 两种情况下污水处理厂产生的环境综合效益进行评价。评价结果表明,在一级 A 出水标准下进一步将出水标准提高至“准 IV 类水”,污水处理厂作为消除水环境污染(黑臭水体与水体富营养化)单位亦会在能源、资源消耗以及温室气体排放等方面产生不利于环境的负面影响,使环境综合效益净值变为负数。换句话说,出水标准提高所带来的水环境效益很容易被所增加的能源消耗、资源消耗以及伴随的大气污染等负面影响所抵消,结果其实是对总环境质量做无用功。

因此,在对污水处理厂环境效益评价和目标改善中,应该摒弃仅着眼于出水水质和运行成本这样的硬性指标,应采用 LCA 方法综合评价对环境产生的净影响。传统污水处理的确存在着“污染转嫁”现象,实际上是一个将水污染转嫁为大气污染的过程。为此,应大力发展可持续污水处理技术,实现污水处理资源化、能源化未来目标,以此来削减污水处理实际上为环境“污染源”的嫌疑。污水处理只有上升至“绿色”并逐渐过渡到“蓝色”,方能实现正的环境效益。

参考文献:

- [1] 郝晓地. 可持续污水-废物处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2006.
Hao Xiaodi. Sustainable Treatment Technologies of Wastewater - Wastes [M]. Beijing: China Architecture & Building Press 2006(in Chinese).
- [2] 梁松. 基于 LCA 的城市污水处理厂环境影响负荷研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2012.
Liang Song. Research on the Environmental Impact Load of the Urban Wastewater Treatment Plant by the Method of Life Cycle Assessment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2012(in Chinese).
- [3] 刘志勇. 生命周期评价在污水处理方面的应用[J]. 中国资源综合利用 2010 28(3): 54-57.
Liu Zhiyong. Life cycle analysis in environmental impact assessment on wastewater treatment plant [J]. China Resources Comprehensive Utilization 2010 28(3): 54-57(in Chinese).
- [4] 陈郁, 郑洪波, 杨凤林, 等. 城市污水处理厂生命周期评价方法初探及应用案例[J]. 大连理工大学学报, 2003 43(3): 292-297.
Chen Yu, Zheng Hongbo, Yang Fenglin, et al. Probe into life cycle assessment method of municipal wastewater treatment plants and application cases [J]. Journal of Dalian University of Technology 2003 43(3): 292-297 (in Chinese).
- [5] 黄希望, 罗小勇, 李轶, 等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析[J]. 水资源保护 2014 30(1): 90-94.
Huang Xiwang, Luo Xiaoyong, Li Yi, et al. Life cycle assessment of a wastewater treatment plant and comparison analysis of environmental impacts of different wastewater treatment systems [J]. Water Resources Protection 2014 30(1): 90-94 (in Chinese).
- [6] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报 2015 30(7): 1232-1242.
Wang Changbo, Zhang Lixiao, Pang Mingyue. A review on hybrid life cycle assessment: Development and application [J]. Journal of Natural Resources 2015 30(7): 1232-1242(in Chinese).
- [7] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策 2013 30(6): 155-160.
Zheng Xiujun, Hu Bin. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment [J]. Science & Technology Progress and Policy 2013 30(6): 155-160(in Chinese).
- [8] de Faria A B B, Ahmadi A, Tiruta-Barna L, et al. Feasibility of rigorous multi-objective optimization of wastewater management and treatment plants [J]. Chem Eng Res Des 2016 115: 394-406.
- [9] Boesch M E, Koehler A, Hellweg S. Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production [J]. Environ Sci Technol 2009 43(19): 7578-7583.
- [10] 罗小勇, 黄希望, 王大伟, 等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J]. 环境工程 2013 31(4): 118-122.
Luo Xiaoyong, Huang Xiwang, Wang Dawei, et al. The theory of life cycle assessment and its application in wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2013 31(4): 118-122(in Chinese).
- [11] 任苇, 刘年丰. 生命周期影响评价(LCIA)方法综述[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版 2002 19(3): 83-86.
Ren Wei, Liu Nianfeng. Summary of the method research of life cycle impact assessment (LCIA) [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Urban Science Edition 2002 19(3): 83-86(in Chinese).
- [12] Dreyer L C, Niemann A L, Hauschild M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99—Does it matter which one you choose? [J]. Int J Life Cycle Assess 2008 8(4): 191-200.
- [13] 杨帆. 重庆市城市污水处理厂升级改造的环境影响评价[D]. 重庆: 重庆大学 2014.
Yang Fan. Environmental Impact Assessment of Urban Sewage Treatment Plant Upgrade in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University 2014(in Chinese).
- [14] 周凌. 城市污水处理厂环境效益的生命周期分析[D]. 重庆: 重庆大学 2006.
Zhou Ling. Life Cycle Analysis of Environmental Benefits of Urban Wastewater Treatment Plants [D]. Chongqing: Chongqing University 2006(in Chinese).
- [15] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社 2003.
Deng Nansheng, Wang Xiaobing. Life Cycle Assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (in Chinese).
- [16] 张倩芸. 基于 LCA 的污水处理系统的环境影响评价研究[D]. 大连: 大连理工大学 2016.
Zhang Qianyun. Research of Environmental Impacts

- Assessment of Wastewater Treatment System Based on LCA [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2016 (in Chinese).
- [17] 王建国, 汤露露, 薛峰, 等. 污水再生膜-复合处理工艺的生命周期评价[J]. 四川环境 2015, 34(2): 97-103.
- Wang Jianguo, Tang Lulu, Xue Feng, et al. Life cycle assessment of membrane complex treatment process in wastewater reuse [J]. Sichuan Environment, 2015, 34(2): 97-103 (in Chinese).
- [18] 吉倩倩. 生命周期评价在城市污水处理的环境效益分析中的应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学 2010.
- Ji Qianqian. A Study on Environmental Benefits of Urban Wastewater Treatment Applying Life Cycle Assessment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology 2010 (in Chinese).
- [19] 刘丽. 基于 LCA 的 AAO 与 AO 污水处理工艺比较[D]. 大连: 大连理工大学 2015.
- Liu Li. Comparison of AAO and AO Sewage Treatment Process Based on LCA [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2015 (in Chinese).
- [20] 李如忠, 舒琨. 基于多目标决策的水污染负荷分配方法[J]. 环境科学学报 2011, 31(12): 2814-2821.
- Li Ruzhong, Shu Kun. Model for wastewater load allocation based on multi-objective decision making [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(12): 2814-2821 (in Chinese).
- [21] 杨世琪. 城镇污水处理系统碳核算方法与模型研究[D]. 重庆: 重庆大学 2013.
- Yang Shiqi. The Method and Model Research of GHG Accounting of Urban Sewage Treatment System [D]. Chongqing: Chongqing University 2013 (in Chinese).
- [22] 高成康, 陈杉, 陈胜, 等. 应用 LCA 分析中国典型钢铁企业的环境负荷[J]. 哈尔滨工业大学学报 2016, 48(4): 177-181.
- Gao Chengkang, Chen Shan, Chen Sheng, et al. Life cycle assessment of integrated iron and steel works in China [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(4): 177-181 (in Chinese).
- [23] 吕佳佳. 黑臭水形成的水质和环境条件研究[D]. 武汉: 华中师范大学 2011.
- Lü Jiajia. Study on the Water Quality and Environmental Conditions Formed by Black Odor Water [D]. Wuhan: Huazhong Normal University 2011 (in Chinese).
- [24] 郝晓地, 王向阳, 曹达启, 等. 污水有机物中化石碳排放 CO₂ 辨析[J]. 中国给水排水 2018, 34(2): 13-17.
- Hao Xiaodi, Wang Xiangyang, Cao Daqi, et al. Analysis of CO₂ emission from fossil carbon in organics from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 13-17 (in Chinese).
- [25] 赵晨晨. 污水处理工艺生命周期环境影响分析与比较[D]. 大连: 大连理工大学 2015.
- Zhao Chenchen. Analysis and Comparison on the Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater Treatment Process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (in Chinese).



作者简介: 郝晓地(1960-), 男, 山西柳林人, 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: 2018-11-07