

## 生命周期评价及其在污水处理领域的应用综述\*

徐善宝<sup>1,2\*\*</sup> 高生旺<sup>2</sup> 夏训峰<sup>2</sup> 席北斗<sup>2</sup> 陕永杰<sup>1\*</sup>

1. 山西师范大学地理科学学院 临汾 041004;

2. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染过程模拟  
与控制重点实验室 北京 100012.

**摘要** 生命周期评价既可以作为评价产品生产全过程的有效手段,又可以作为一种环境管理工具,现已在国际上广泛应用。在介绍生命周期评价概念和理论框架的基础上,针对目前国内外研究现状,回顾了生命周期评价在污水处理领域各个方面的应用,同时对生命周期评价在污水处理领域中的发展给予展望,推动了全生命周期评价理论在我国污水处理领域的丰富与发展。

**关键词** 生命周期评价 污水处理 环境影响中图分类号: X65 文献标识码: A 文章编号:

污水处理系统在运行过程中可降低原水中污染物的浓度,但污水处理设施从建设到运行的生命周期过程中会消耗资源、能源并向环境排放污染物。以往对污水处理技术的传统评价方法多考虑技术的处理效率和经济效益等因素,而没有考虑环境效益因素,忽略了污水处理设施在建设和运行期间的直接和间接的环境排放。而生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)方法是评估研究对象环境负荷的工具<sup>[1]</sup>,受到国际上的普遍认同。

通过对污水处理技术环境影响评价,可充实污水处理技术生命周期评价的数据库,为选择环境影响较小的污水处理工艺贡献决策依据,为污水处理的可持续发展奠定科学基础。

### 1 生命周期评价理论

#### 1.1 生命周期评价

所谓LCA,是指对产品、工艺或服务的整个生命周期——从原材料获取到设计、制造、使用、循环利用和最终处理等,定量计算、评价产品实际、潜在消耗的资源 and 能源以及排出的环境负荷,并通过分析,寻求改善环境的机会的过程和方法。

生命周期评价起源于1969年美国中西部研究所受可口可乐委托对饮料容器从原材料采掘到废弃物最终处理的全过程所进行的跟踪与定量分析。20世纪90年代,我国开始研究生命周期评价方法。随着其理论和方法学的发展,在环境管理、政策与规划中的应用发展迅速。其应用范围涉及多个行业,如工业、农业、服务业等,包括产品及工艺的评价、清洁生产审核、环境标志、绿色产品评估、环境工程等方面。

#### 1.2 生命周期评价的技术框架

ISO14040中将生命周期评价分为目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释等四阶段。

\* [基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07103-007)。

\*\* 第一作者:徐善宝(1992),男,研究生,E-mail:X19920424@163.com

\* 通信作者,E-mail:shanyongjie2005@163.com

联系电话:17835065679

联系地址:山西省临汾市尧都区贡院街1号山西师范大学

邮政编码:041004

### 1.2.1 目的与范围的确定

目的与范围的确定是生命周期评价的第一步。它的重要性在于决定为何要进行某项生命周期评价,并表述所要研究的系统和数据类型。在确定生命周期评价研究范围时需要分析的因素主要有:研究范围的修改及论证、功能、功能单位、系统边界、数据类型、输入输出初步选择准则、数据质量要求等。

污水处理系统的生命周期评价的范围主要包括施工建造、运营、报废拆除等三个阶段。

### 1.2.2 清单分析

清单分析是对产品、工艺流程、活动等研究系统整个生命周期阶段的资源和能源使用以及向环境(如:空气、水、土壤)排放的废弃物进行定性、定量的分析过程。清单分析开始于原材料的开采,中间产品的制造、加工、分配、运输、利用、维护过程,以及最后的产品处置。清单分析的关键是形成以产品功能单位表述的产品系统的资源、能源的输入以及废弃物的输出。

污水处理系统的清单分析可以从施工建造、运营、报废拆除等三个阶段来收集数据,主要对资源消耗、能源消耗、排放的污染物进行分析。

### 1.2.3 影响评价

环境影响评价就是衡量产品、工艺或活动对环境造成影响的程度。环境影响评价的步骤一般有分类和特征化、归一化,加权为可选步骤。

分类是把影响因子分配到不同的影响类型。特征化是分别对单个环境影响类型的环境影响进行汇总,用相应的参照物表示。归一化的目的是使结果可以相互比较,让人们对环境影响评价的结果有更加直观的了解。归一化的基准值也不尽相同,有区域标准值、人均当量值等。加权,是确定不同环境影响类型的相对贡献大小或权重,以期得到总的环境影响水平的过程。

污水处理系统的环境影响评价中,环境影响类型分为资源消耗、人体健康和生态环境影响。为增强对国内的参考价值,归一化基准值可选用中国范围内的排放和消耗总量数据。

### 1.2.4 结果解释

结果解释就是根据清单分析和环境影响评价的结果,进行环境影响的分析,识别出系统环境影响较大的阶段,并进行评估(比如敏感性、完整性和一致性检查),最后得出结论并提出改进建议。

通过对污水处理系统进行环境影响评价得出评价结果后,首先对评价结果进行分析,其次是进行敏感度分析、不确定性分析等,最后提出技术改善建议。

## 2 LCA 在污水处理领域的应用

生命周期评价在污水处理中的应用多为评价污水处理厂或污水处理工艺的环境影响及进行污水处理工艺的比较与选择。

### 2.1 污水处理过程的评价

国外对生命周期评价方法研究较早,对生活污水和工业污水均有较多的研究。Enrico Benetto<sup>[2]</sup>等将生态卫生系统与传统卫生系统比较,得知生态卫生系统可减少60%的系统质量破坏,而在资源、人类健康、气候变化上影响更大。Hiroko Yoshida<sup>[3]</sup>等在城市污水处理厂的LCA评价中,比较了多种数据收集方案的影响,结果表明,LCA结果很大程度上取决于输入数据的覆盖率。Rodríguez R<sup>[4]</sup>等使用LCA方法对比分析了应用于制药废水处理的均相和非均相芬顿方法。均质和非均相芬顿过程的比较表明,非均相芬顿方法是一种更环保的制药废水的处理方法。

国内对城市生活污水处理厂或处理工艺研究较多。韩进光<sup>[5]</sup>等对北石桥污水处理厂生命周期的资源、能源消耗和直接的环境排放数据进行了汇总和分析,并与典型活性污泥法工艺进行对比,结果表明北石桥污水处理厂的DE型氧化沟工艺的总环境影响低于典型活性污泥法工艺。

在工业废水处理方面,王宇坤<sup>[6]</sup>建立一套制药工业废水处理厂生命周期评价模型,分析污水处理厂在资源消耗、生态环境和人体健康方面的影响,同时提出改善措施。

### 2.2 污水处理工艺的比较

国内外不少学者运用 LCA 进行工艺的比较与选择,可以帮助决策和优化。Carolina Alfonso<sup>[7]</sup>等将 LCA 方法运用到分析比较污水处理厂恶臭处理技术(生物滤池、生物滴滤池、活性炭塔、化学洗涤器、生物滴滤池+活性炭塔)的环境影响中,进行技术选择,分析得知生物处理方法(生物滤池和生物滴滤池)具有较低的环境影响。Matthew O'connor<sup>[8]</sup>等运用 LCA 评价 14 种制浆造纸处理方案,重点对富营养化、淡水水生生物毒性、温室气体排放等环境影响类别之间的权衡进行研究。

在国内,黄希望<sup>[9]</sup>应用 LCA 针对某城市 A2/O 工艺污水处理厂的建设以及运营产生的环境影响情况作出评估,并且和其他类型的污水处理厂(五阶段 Bardenpho 工艺、人工湿地)进行比较。刘丽<sup>[10]</sup>选用生命周期评价方法,对污水处理厂改造前的 A/O 工艺和改造后的 A/A/O 工艺进行生命周期的比较分析,得知改造后的 A/A/O 工艺要优于改造前的 A/O 工艺。

国外的污水处理评价一般包含污泥处理和药品清单分析,而国内一般将污水处理与污泥处理分开研究。近年也有不少学者加入污泥分析和药品分析,如郗文君<sup>[11]</sup>以山东某造纸企业活性污泥法处理系统为分析对象,运用 LCA 比较该企业新旧两条废水处理工艺的环境影响,将污水处理和污泥处理并列考虑分析,并加入了投加药品的分析,使分析更具完整性。

### 2.3 污泥处理工艺的评价

国内外污泥处理处置的方法很多,一般采用简单填埋、焚烧等传统处置方法,或堆肥、消化制沼气、制建材等资源化利用途径。污泥处理工艺的 LCA 分析有助于筛选环境影响较小的工艺。

Enrica<sup>[12]</sup>等通过 4 种方案将污泥处理湿地与其他处理方法比较,进行技术、经济、环境的评估,旨在验证污泥处理湿地对于小国家的适用性。在国内,廖艳芬<sup>[13]</sup>等采用 LCA 方法分别对污泥的 4 种处理方法,即干化焚烧、污泥与煤混燃发电、污泥与生活垃圾掺烧发电和填埋处理方法的环境影响进行比较。结果表明,处理 1t 湿污泥,填埋处理的能耗和总环境负荷均最低。刘洪涛<sup>[14]</sup>等运用 LCA 方法,从温室效应、土地占用和能耗方面,评价比较了好氧发酵、填埋、焚烧三种污泥处理处置工艺的环境负荷。

### 2.4 污水的再生利用与低碳策略

在污水再生利用方面,Ranjani Theragowda<sup>[15]</sup>等对回用在热电厂冷却系统中的城市污水厂二级处理出水的 6 种深度处理方案进行了评价与比较,分析表明药剂的生产和发电过程是深度处理过程环境影响较大的环节。M. Ortiz<sup>[16]</sup>等对于有无增加后续深度处理过程的传统活性污泥法进行 LCA 分析,结果表明深度处理没有明显增加环境负荷,且经处理后的净化水有多种用途,因此深度处理可在水资源短缺地区应用。

在国内,Q. H. Zhang<sup>[17]</sup>对西安某污水处理和回用工程的环境影响进行分析,污水回用后的环境效益可以与污水处理和深度处理过程的环境负荷相抵消,表明污水回用可产生环境正效益。童乐利用 LCA 理论,系统地评估了典型工业园区污水再生利用系统的环境效应,并对比了四种回用的情景,分析系统环境影响的关键因子。研究结果表明,海洋水生生态毒性潜势为系统最主要的环境影响类别。

在低碳策略方面,根据污水厂的资源和能源消耗等环境影响,提出降低能耗等低碳运行措施。赵晶晶<sup>[18]</sup>以哈尔滨市某二级污水处理厂为例,从生命周期评价角度分析了污水处理厂生命周期对资源消耗、全球变暖的影响,并提出了污水处理厂低碳运行措施。

### 2.5 农村污水处理工艺

近年来,随着我国“幸福乡村建设”、“美丽乡村建设”目标的提出,农村生活污水的处理也在日益受到国家的重视与关注,农村人居环境发生了巨大的改变。

国外的农村污水处理技术多为生态处理技术,包括美国高效藻类塘、法国蚯蚓生态滤池、日本净化槽、韩国人工湿地技术等。Valerie J. Fuchs<sup>[19]</sup>等研究比较了在考虑温室气体排放时,垂直流和水平流人工湿地的环境影响。

在国内,贾璐颖采用 LCA 方法评价人工湿地、氧化塘、土地处理三种面源污染治理技术的环境影响,为面源污染治理技术的选择和决策提供分析依据。

## 3 LCA 在污水处理领域的研究展望

综上所述,目前国外在污水处理技术的生命周期评价方面进行了大量的研究,其中不但涉及到了污水处理厂以及工业废水的研究,同时还包含了药品清单分析和污泥处理的研究,形成更全面并且完整的生命周期评价研究。而国内则是在污水处理厂的评价和污水处理工艺的比较方面进行了大量的研究。伴随国内生命周期评价方法的不断发展和完善,国内研究也逐渐加入了药品清单分析和污泥处理与处置的研究。另外,农村生活污水处理技术的研究也逐渐开展起来。

通过对 LCA 在污水处理中的应用情况的分析可知,LCA 的发展日趋完善。在进一步发展 LCA 时,国内可开展以下工作:

(1) 生命周期评价作为一种国际化的环境管理工具,从产生之日起不断发展,但是目前生命周期评价方法的方法学和数据库仍有待进一步完善,以进行更科学、更有效的评价。目前,清单分析方法学的研究较完善,但国际上对环境影响评价的方法还没有统一的定论。

(2) 应加强数据质量和数据处理方法等问题的研究,建立完善的污水处理工程数据库,以确保清单分析阶段的正确性,进而保证结果的可靠性,更好地将 LCA 应用于污水处理领域,为设计者和决策者服务。

(3) 在运用 LCA 对污水处理工艺进行评价和优选时,应将经济、技术、处理效率等因素与环境影响一并考虑,进行生命周期内完整的分析与优化。另外,在评价环境影响时,应加入污泥处理影响的分析,也可进行生态毒性影响等方面的分析。

(4) 现有评价的研究多着眼于废水、废气、固体废物或污泥处理等的环境影响,可进行化学品的清单分析,将化学品投加的潜在环境与健康影响加入分析中。

## 参考文献

- [1] 罗小勇,黄希望,王大伟. 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
- [2] Enrico B, Diep N. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 1506-1516
- [3] Hiroko Yoshida, Julie Clavereul, Charlotte Scheutz, et al. Influence of data collection schemes on the Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant [J]. Water Research, 56, 2014: 292-303
- [4] Rodríguez R, Espada J J, Pariente M I, et al. Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 124: 21-29
- [5] 韩进光,郑承军. 西安市北石桥污水处理工程生命周期评价研究 [J]. 给水排水, 2005, (35): 214-217
- [6] 王宇坤. 基于生命周期评价的工业污水处理厂环境影响负荷研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学学位论文, 2009

- [7] Carolina A, Raquel L, Jose M E, et al. Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 77–84
- [8] Matthew O C, Gil G, Warren B. Life cycle assessment comparison of industrial effluent management strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 79: 168–181
- [9] 黄希望, 罗小勇. 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
- [10] 刘丽. 基于 LCA 的 AAO 与 AO 污水处理工艺比较 [D]. 大连: 大连理工大学硕士学位, 2015.
- [11] 郗文君, 张安龙. 生命周期评价在造纸废水处理中的应用 [J]. *环保与节能*, 2014, (4): 24–27
- [12] Enrica Uggetti, Ivett F, Joan G. Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands [J]. *Water Research*, 2011, (45): 573–582
- [13] 廖艳芬, 漆雅庆, 马晓茜. 城市污水污泥焚烧处理环境影响分析 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (11): 2359–2365
- [14] 刘洪涛, 郑海霞, 陈俊. 城镇污水处理厂污泥处理处置工艺生命周期评价 [J]. *中国给水排水*, 2013, 29 (6): 11–13
- [15] Therogowda R, Vidic R, Dzombak D A, et al. Life cycle impact analysis of tertiary treatment alternatives to treat secondary municipal wastewater for reuse in cooling systems [J]. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 2015, 34 (1): 178–188
- [16] Ortiz M, Raluy R G, Serre L. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water – reuse in small town [J]. *Desalination*, 2007, 204 (1): 121–131
- [17] Zhang Q H, Wang X C, Xiong J Q, Chen R, et al. Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project—Case study of Xi'an, China [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 1421–1425
- [18] 赵晶晶. 基于生命周期评价的城镇污水处理厂环境影响及低碳运行对策 [J]. *环境保护与循环经济*, 2014, 8: 30–32
- [19] Valerie J F, James R M, John S G. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions [J]. *Water Research*, 2011, (45): 2073–2081