

生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述^{*}罗小勇^{1,2} 黄希望¹ 王大伟¹ 李 轶¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

摘要: 生命周期评价为全面评价污水处理提供了工具。在介绍生命周期评价理论的基础上, 对其在污水处理领域的应用理论进行分析, 对其国内外应用现状和特点进行回顾性评价。同时展望了生命周期评价在污水处理领域的发展, 并提出了意见和建议以推动生命周期评价在我国得到更好的应用。

关键词: 生命周期评价; 污水处理; 环境负荷

DOI: 10. 7617/j. issn. 1000 - 8942. 2013. 04. 030

THE THEORY OF LIFE CYCLE ASSESSMENT AND ITS APPLICATION IN
WASTEWATER TREATMENTLuo Xiaoyong^{1,2} Huang Xiwang¹ Wang Dawei¹ Li Yi¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

Abstract: The life cycle assessment (LCA) provides a tool for complete evaluation of wastewater treatment. Based on the introducing of the theory of LCA, the paper analyzes the application of the LCA theory in wastewater treatment and conducts a retrospective evaluation of its application status and characteristics at home and abroad. At the same time, to promote the development of LCA in China, the paper puts forward the opinions and suggestions for the development of LCA in the field of wastewater treatment.

Keywords: life cycle assessment; wastewater treatment; environmental burden

污水处理厂以产生新的环境污染和资源消耗为代价将水中的污染物进行分离、分解转化成无害、少害或易于处置的物质。但传统上评估和选择污水处理工艺的方法未充分考虑不同方案造成的环境负荷, 在技术和经济方面的考虑也具有一定的局限性^[1], 根本无法做到以最小的资源和环境代价去解决城市污水的污染问题。而正成为许多政府和企业环境管理的有力工具的生命周期评价(life cycle assessment, LCA), 就是一种能对其所从事活动全过程的资源消耗和造成的环境影响有一个彻底、全面、综合了解的评价方法。

1 生命周期评价

目前国际上对生命周期评价的定义有许多^[2], 但其总体核心是: LCA 是对贯穿产品生命周期全过程, 从原材料获取、生产、使用、直至最终处置的环境

影响及其潜在影响的研究。生命周期评价具有系统性强、涉及领域广、评价工作量大、主观性和针对性、数据完整性和精度有限等特点。

生命周期评价最初应用于 1969 年美国可口可乐公司对不同饮料容器的资源消耗和环境释放所作的特征分析。随后国际环境毒理学与化学学会 (SETAC) 以及国际标准化组织 (ISO) 分别对 LCA 的定义及标准框架做出规定, 进一步推动了 LCA 在国际范围内的发展。自 20 世纪 90 年代起, 生命周期评价在我国已开展相关研究^[3], 许多学者利用 LCA 对我国不同行业的环境影响进行研究^[4-9]。高成康等^[10]利用 LCA 对风力发电机的环境负荷进行分析研究。李劲等^[11]将 LCA 应用到城市生活垃圾回收处理系统的不确定性分析中。王兴润等^[12]利用 LCA 对含油污泥的不同处置方法进行评价。

由此可见, 随着 LCA 的发展, LCA 现在已成为一种

^{*} 国家自然科学基金项目 (51009050); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201201067)。

具有广泛应用的产品环境特征分析和决策支持工具。其应用范围包括清洁生产及其设计、环境审计、绿色产品评估、环境标志、环境管理、工业生产等领域^[13]。

2 污水处理厂 LCA 理论框架

LCA 的主要目标是通过确定和量化研究能量和物质利用及废弃物的环境排放来评估一种产品、工序和生产活动造成的环境负荷;评价能源、材料利用和废弃物排放的影响;评价环境改善的方法。其最终目的在于以可持续的方式来满足人类对产品和服务的需求,即在维持可持续发展的前提下提高资源和能源的利用率^[14]。生命周期评价主要包括 4 个阶段:目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。ISO14000 系列为 LCA 提供了一致框架,如图 1 所示。

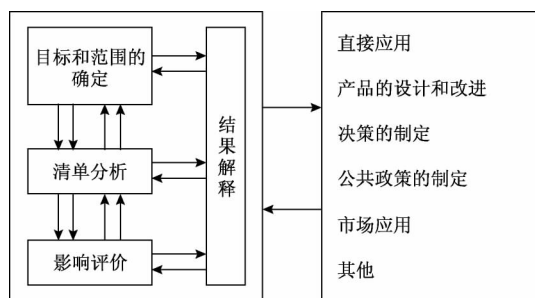


图 1 生命周期评价理论框架

Fig.1 Theoretical framework of LCA

2.1 目标和范围的确定

目标和范围的确定(goal and scope definition)是 LCA 研究的第一步,是其后的评价过程所依赖的出发点和立足点。污水处理厂生命周期评价目标包括:识别城市污水处理工程生命周期内各阶段环境因素(资源消耗、能源消耗以及环境影响等);进行城市污水处理项目决策、规划、优先项选择、过程设计、内容设计;选择有关环境表现参数。污水处理厂生命周期评价的范围确定是由所开展的污水处理项目的研究目的、未来应用及研究深度和广度等因素确定的^[15],这是一个反复的过程,必要时可以进行修改。根据污水处理、水循环等特点,我们关注焦点的差异必然要求考虑的边界有所不同,但其范围主要包括施工建造、运营、报废拆除等三个阶段,如图 2 所示。

2.2 清单分析

清单分析(life cycle inventory analysis, LCI)是量化和评价所研究的产品、工艺或活动在整个生命周期的资源和能源使用以及环境释放的过程,其是 LCA 研究工作的基础。该步骤包括数据收集清单表制作、数据收集、数据合理性判断、数据合并、数据分配及敏感性分析等。

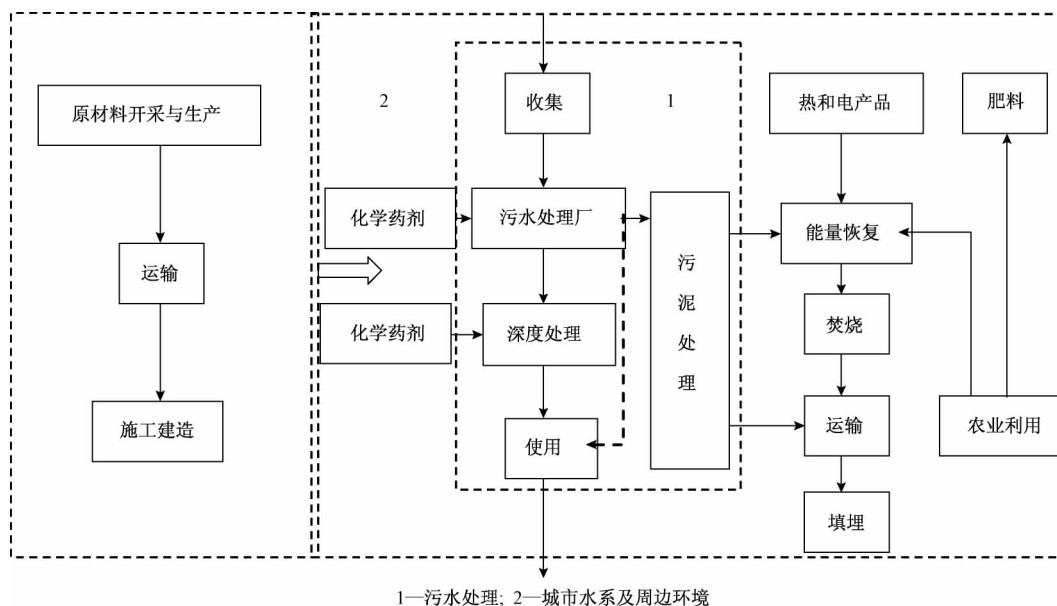


图 2 污水处理厂生命周期

Fig.2 Life cycle of wastewater treatment plant

城市污水的组成随时间、地点不同而显著变化,污水处理厂根据所收集污水的性质可采取不同的处理工艺,根据二级出水水质不同,选择不同的深度处

理工艺对二级出水进行深度处理。污水处理是污水处理厂的主要功能,该阶段的数据清单见表 1。

污泥处理阶段的数据清单主要包括:污泥处理量、

表 1 污水处理阶段清单分析

Table 1 The inventory analysis of wastewater treatment stage

项目	水质参数	资源消耗	环境影响
	指标	指标	指标
深度处理阶段	BOD	设备耗电量	臭气浓度/排放量
	COD	维修费用	H ₂ S 浓度/排放量
	pH	人员工资	SO ₂ 浓度/排放量
	SS	处理药剂	NO _x 浓度/排放量
	N	能源回用	CO ₂ 浓度/排放量
	P		NH ₃ 浓度/排放量
	油类		CH ₄ 浓度/排放量
			CO 浓度/排放量

处理工艺流程、最终的处置方式;污泥处理过程中臭气等气体污染物的浓度及产生量;污泥处理过程中消化阶段产生的沼气利用、污泥饼的日外运量、运往何处及运输距离;污泥处置过程中的 CH₄、CO、渗透液及臭气等。

2.3 影响评价

生命周期影响评价(life cycle impact assessment , LCIA) 是对清单分析中所识别的环境负荷进行定性或定量的描述和评价 ,以确定产品系统的资源、能源消耗及其对环境的影响。它是 LCA 的核心内容 ,也是难度最大、最受争议的部分 ,目前正处于探索阶段 ,还没有被普遍接受的评价方法。SETAC 将其分为分类、特征化和量化评价三个步骤。

2.3.1 分类

根据目标定义和范围界定所确定的系统边界及清单分析阶段所提供的数据清单 ,对污水再生回用系统从污水的收集到再生水的回用与部分出水的排放过程所带来的环境问题进行分类。按照影响类别来划分 ,整个工艺所产生的污染物可分为: 温室效应、大气酸化、水体富营养化、水生物毒性、臭味等五类 ,分类结果见表 2。

2.3.2 特征化

将环境影响分类以后 ,利用环境负荷指标方法将相同影响类型下的不同影响因子进行汇总 ,以期待得到每一种影响类型的综合环境负荷。环境负荷(EB) 作为一个量化数值 ,表示一组排放物质对特定的环境类别(如水体富营养化) 起到影响作用的潜在程度。对每一类环境类别影响的指标 EB ,可从式(1) 计算得到:

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

式中: i 为排放物中所含的各种化学物质种类; n 为排放物中各化学物质的总数; W_i 为第 i 种物质的重量;

表 2 污水处理厂环境影响分类

Table 2 Categories of environmental impact of wastewater treatment plant

环境影响分类	主要相关污染物	主要来源
资源消耗		施工阶段
能源消耗		整个过程
污 染 物 排 放 影 响	温室效应 CO ₂	生物处理、发电、污泥处置
	NO _x	发电
	CH ₄	硝化过程、污泥处置
	CO	运输、发电
	大气酸化 NH ₃	沉砂池、初沉池、生物处理、硝化
	SO ₂	发电
	NO ₂	发电
	水体富营养化 N	排放水
	P	排放水
	水生物毒性 Hg	排放水
	Cd	排放水
	Cu	排放水
	臭味 NH ₃ 、H ₂ S 等	格栅、沉砂池、初沉池、生物处理、污泥处理和处置
	受纳水体	COD、BOD、SS 等 二级出水
	固废	施工废渣、栅渣、污泥和拆除阶段
其他 影响	噪声	整个过程
	振动	整个过程

PF _{i} 为第 i 种物质对某类环境所造成影响的潜能因子。

潜能因子(PF) 表示某种化学物质对某种特定环境类别造成负面影响的潜在能力。目前采用最多的为英国 ICI 公司研究使用的潜能因子。该因子的确定方法为: 首先将某种物质对某类环境的影响作为基准 ,即将它的 PF 定为 1。如在大气酸化类别中以 SO₂ 为基准 (PF = 1) ,其他物质对这类环境的 PF 值则与 SO₂ 相比较而得出。根据各物质的潜能因子 PF 及其排放量便可确定每种污染类型的环境影响负荷。城市污水处理所涉及的各种环境影响类别的 PF 见表 3。

表 3 主要排放物的潜能因子

Table 3 Potential factor of main emissions

影响类目	影响物质 m _{i}	潜能因子 PF
温室效应	CO ₂	1
	NO _x	40
	CH ₄	21
	CO	3
大气酸化	NH ₃	1.88
	SO ₂	1.0
	NO ₂	0.7
水体富营养化	N	1.0
	P	0.067
水生物毒性	Hg	16.67
	Cd	2.0
	Cu	1.0

2.3.3 量化

量化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。通过赋予大气酸化、全球变暖、水体富营养化、水生物毒性一定标度值,可得到一个数字化的可供比较的单一指标。目前在进行污水处理厂生命周期评价时最常使用的是层析分析法(AHP)。其主要分析步骤为:首先建立模型,其次构建各环境影响之间的判断矩阵,然后在进行各因子权重的计算,将各种不同的影响类型综合为单一指标,最后进行一致性检验。

2.3.4 结果解释

结果解释是LCA最后的一个阶段。生命周期解释^[16]是通过清单分析和影响评价的结果所提供的信息进行识别、量化、检验和评价,得出结论,并提出能减少环境负荷的意见和建议。

3 LCA在污水处理中的应用

3.1 国内研究现状

国内对城市污水处理厂生命周期评价的研究着重于现阶段污水处理工艺的管理且研究对象仅为污水处理厂。如王梅等^[17]运用LCA选取恶臭气味、固体废弃物、出水水质、有毒气体等典型环境影响评价因子对金霞城市污水处理厂工艺流程进行分析评价,并提出环境优化措施。孟繁宇等^[18]以哈尔滨某制药废水处理工艺为例,采用生命周期评价定量研究了废水处理全过程的环境影响负荷,结果表明:该废水处理过程对不可再生资源的消耗影响最大,随后依次是填埋空间的消耗、潜在健康影响、全球变暖潜能值、水体富营养化、酸化潜值、气溶胶潜值、光化学烟雾潜值。吉倩倩等^[19]运用LCA以西安市北石桥污水净化中心的污水处理与再生利用全过程为例进行环境影响评价,通过清单分析、当量计算和权重分析等一系列分析过程,计算出污水处理过程的投入成本及污水再生处理前后对环境的影响,得出污水在经过处理后,能够很大程度上减小其对环境的影响,从而产生环境正效益。除了单独考虑环境因素外,陈郁等^[20]使用一套考虑环境因子以及经济和技术要素的生命周期评价体系,将污水处理过程看作产品的生产过程,运用层次分析法对污水处理的综合效益及各单项效益的优劣性进行比较分析。纪楠等^[21]基于国内的清洁生产评价指标,以污水处理厂为研究对象,将LCA作为指导思想,从环境、经济、资源、人类健康、技术性能5个方面选取了全球变暖、固体废弃物、运

行稳定情况等22个指标,按3个层次构建了污水处理厂的生命周期评价体系。

除此之外,国内对运用LCA进行污水处理工艺的比较与选择的研究也较多。如沈兰等^[22]对苏州某造纸企业新旧两条废水处理工艺的生命周期环境影响进行对比研究,所获得的结论较为客观地反映了两种造纸废水治理工艺对环境的影响。杨健等^[23]运用LCA方法对普通活性污泥法、AB活性污泥法和厌氧水解-活性污泥法3种处理系统的生命周期全过程能耗进行了识别和量化分析,并进行相互比较研究。吴敏等^[24]运用LCA方法对普通生物滤池处理工艺生命周期全过程的能耗进行识别和量化分析,并与普通活性污泥法进行平行对照,表明普通生物滤池法的生命周期能耗最低。于建朋等^[25]运用LCA技术,以污水处理工艺设施为主线对曝气生物滤池和普通活性污泥法进行比较研究,得出前者更利于环保的结论。

完整的污水处理工艺的生命周期评价应当包含污泥处理,但从国内研究来看,一般都将污水和污泥处理分开研究,在进行污水处理厂生命周期评价时较少加入污泥处理和处置,这将导致研究结果不完整或环境负荷偏小^[26]。廖艳芬等^[27]以城市污水污泥为研究对象,应用生命周期评价方法分别对干化焚烧、污泥与煤混燃发电、污泥与生活垃圾掺烧发电3种焚烧处理方式的生命过程进行清单分析,以获得各处理方式的能耗及其对环境的影响。

污水处理过程中需加入的一些化学药品在其生产过程中会增加环境负荷,而国内没有完整的数据库使得数据收集具有困难,致使国内的研究一般都缺乏投加药品的清单分析。这也是LCA在我国发展过程中需要完善的一个方面。

3.2 国外研究现状

国外对生活污水和工业污水均有较多的研究。Kim R J^[28]运用LCA对温度高且含有较多化学物质(如重金属)的工厂、企业洗衣污水进行评价。Vlasopoulos N^[29]运用LCA评价20条适合石油废水处理工艺,最终找出降低环境负荷的方法。除了对整个污水处理工艺流程进行评价之外,还对深度处理部分进行研究,如Mensese M等^[30]运用LCA对城市污水处理厂的不同消毒工艺(紫外照射下氯消毒、臭氧消毒以及臭氧加过氧化氢消毒)进行分析比较。

与国内研究不同,国外的研究不仅包括对污水处理厂的生命周期评价,还包括对某个城市未来水环境

系统对该城市环境负荷的预测,旨在为该城市未来的水环境管理提出对策,如 Sven Lundie 等^[31]运用 LCA 预测 2021 年悉尼市水环境系统可能造成环境影响,通过情景分析得出关键在于能源结构和水处理化学药品选择的结论。国外的对象包括城镇生活污水、工业废水,研究范围较国内广,这对企业、工厂提高环保意识,实现社会的可持续发展具有较好的指导意义。除此之外,国外研究有药品清单的分析^[32],还包括对污泥的研究。

4 LCA 在污水处理领域的发展展望

随着 LCA 实践经验的不断积累而日趋完善,在进一步发展 LCA 时,要注重信息分类和处理方法的研究,建立完善的污水处理工程数据库,以确保信息量化准确,为设计者和决策者提供正确的参考信息,在现有框架下开发出更具普遍意义的数据库软件。同时,在运用 LCA 对污水处理厂进行评价时,并不应一直局限于环境负荷单个方面,应将经济、环境、产品质量等特性进行集与,以真正达到对污水处理厂的全面的分析,对污水处理厂生命周期进行整体最优化的设计。LCA 将成为 21 世纪最具生命力和发展前途的环境管理工具。

参考文献

- [1] 杨健,陆雍森.运用生命周期分析(LCA)评估和选择废水处理工艺[J].工业用水与废水,2000,31(3):4-6.
- [2] Mary Ann Curran. Goad based environmental life cycle assessment [J]. Environ Sci Technol, 1993, 27(3): 431-436.
- [3] 孙启宏,万年青,范如华.国外生命周期评价(LCA)研究综述[J].世界标准化与质量管理,2000,12(12):24-26.
- [4] 谷立静.基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究[D].北京:清华大学,2009.
- [5] 朴文华,陈郁.基于 LCA 方法的水泥企业清洁生产审核[J].环境科学学报,2012,32(7):1785-1792.
- [6] 李颖昊,刘涛,郭水华.从 LCA 视角评估钢铁产品改进的环境效益[J].环境工程,2012(S2):437-439.
- [7] 马明珠,张旭.基于 LCA 研究建筑保温的节能减排效益[J].环境工程,2008,26(01):88-89.
- [8] 李英顺,路迈西,胡华龙,等.生命周期评价在铜渣回收工艺中的应用前景[J].环境工程,2009,27(2):81-84.
- [9] 李蔓,王震,孙德智.聚乙烯生产生命周期评价的研究[J].环境科学与技术,2009,32(5):191-195.
- [10] 高成康,董家华.基于 LCA 对风力发电的环境负荷分析[J].东北大学学报.自然科学版,2012,33(7):1034-1037.
- [11] 李劲,王华.基于 LCA 的城市生活垃圾回收处理系统不确定性分析[J].上海环境科学,2011,30(2):47-50.
- [12] 王兴润,买帅,马丽娜,等.含油污泥无害化处置优化研究及生命周期评价[J].环境工程,2011,29(S1):257-259.
- [13] 黄永庆.生命周期评价的应用[J].江西化工,2011(4):1-3.
- [14] Westkamper E, Alting L, Arndt G. Life cycle management and assessment: approaches and visions towards sustainable manufacturing[J]. Annals of CIRP, 2000, 49(2):501-522.
- [15] Ulrika Palme, Margareta Lundin, Anne-Marie Tillman. Sverker molander sustainable development indicators for wastewater systems-researchers and indicator users in a co-operative case study Resources[J]. Conservation and Recycling, 2005, 43:293-311.
- [16] ISO14043 Environmental management: Life cycle assessment-Life cycle interpretation[S]. 2002.
- [17] 王梅,周新平.金霞城市污水处理厂生命周期评价研究[J].平顶山工学院学报,2007,16(3):33-36.
- [18] 孟繁宇,樊庆兴,赵庆良,等.废水处理环境影响负荷的生命周期评价[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(6):982-985.
- [19] 吉倩倩,张琼华,熊家晴,等.运用 LCA 方法分析污水再生处理成本效益[J].环境工程学报,2010,28(3):517-520.
- [20] 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):293-297.
- [21] 纪楠,樊庆兴,石磊.基于 CP 对污水处理厂综合评价指标体系的研究[J].环境科学与管理,2011,36(8):164-167,173.
- [22] 沈兰,韦保仁,顾军,等.造纸废水治理工艺的生命周期评价[J].中华纸业,2010,13(5):47-51.
- [23] 杨健,吴敏.3种活性污泥法处理工艺的生命周期能耗分析[J].上海环境科学,2001,20(12):582-585.
- [24] 吴敏,杨健.普通生物滤池处理工艺的生命周期能耗分析[J].中国给水排水,2001,17(6):69-72.
- [25] 于建朋,郑泽根.城市污水处理厂全过程生命周期评价模式探讨[J].土木建筑与环境工程,2009,31(2):148-151.
- [26] 沈兰,韦保仁.国内外污水处理工艺的生命周期评价概述[J].环境科学与管理,2010,35(5):35-37.
- [27] 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.
- [28] Kim Riisgaard Jorgensen, Alejandro Villanueva. Use of life cycle assessment as decision-support tool for water reuse and handling of residues at a Danish industrial laundry [J]. Waste Management Research, 2004, 22:334-345.
- [29] Vlasopoulos N, Memon F A. Life cycle assessment of wastewater treatment technologies treating petroleum process waters [J]. Science of the Total Environment, 2006, 367:58-70.
- [30] Meneses M. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternative and applications [J]. Chemosphere, 2010, 81:266-272.
- [31] Sven Lundie, Gregory M Peters. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13):3465-3473.
- [32] Nan Munoz, Jose Peral. Life cycle assessment of a coupled solar photocatalytic-biological process for wastewater treatment [J]. Water Research, 2006, 40:3533-3540.

作者通信处 李轶 210098 江苏南京河海大学环境学院
E-mail envly@hhu.edu.cn

2012-10-29 收稿