

# 生命周期评价在造纸废水处理中的应用

郝文君 张安龙

陕西科技大学陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室 陕西 西安 (710021)

**摘要:**生命周期评价 LCA(Life Cycle Assessment) 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。文章介绍了生命周期评价的概念、技术框架,并以具体实例讨论了造纸废水的生命周期评价分析,为造纸企业清洁生产提供指导。

**关键词:**生命周期评价;环境管理;造纸废水

造纸行业是我国重要的支柱产业,同时也是资源消耗大、污染严重的行业之一,走可持续发展道路成为造纸企业发展的必然选择。为了节约资源、降低资源消耗及生产成本、减轻造纸业的环境污染、促进行业的可持续发展,仅靠传统的末端治理是无法实现的,必须从原料获取、产品生产、使用、再生及废物处理整个生命周期各个阶段进行分析,识别对环境影响最大的生命周期阶段,找出影响环境状况的主要因子,评估产品的资源效益和环境效益,以提供改进生产工艺和设备、进行绿色清洁生产的机会与途径。

## 1 LCA 的概念和技术框架

LCA 是对某一产品系统在整个生命周期中的输入、输出和环境影响进行评价,即对某一产品、事件或过程中的原料消耗、能量消耗,废物排放、环境吸收和消耗能力等环境影响进行评估,确定该产品、事件或过程的环境协调性。生命周期评价理论为评价产品造成的环境影响提供了基础的理论框架,可有效地评价企业和产品系统的环境行为。

根据 ISO14040 标准,LCA 技术框架包含以下 4 个组成部分<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。

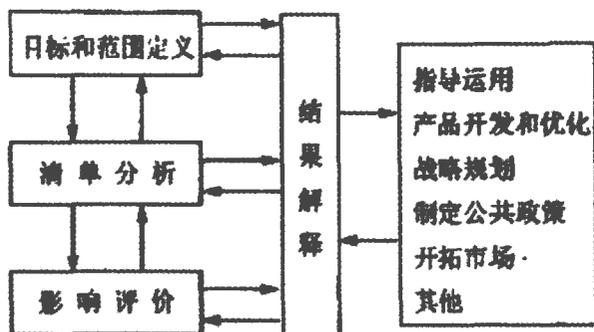


图 1 LCA 技术框架(ISO14040, 1997)

作者简介:郝文君(1991-),女,陕西西安,硕士在读,研究方向:制浆造纸废水处理。

张安龙先生,研究生导师;研究方向:工业废水与废弃物污染控制。

由生命周期评价的组成部分分析得知,LCA 有如下特点:①它是一种全过程评价;②系统性强;③涉及面广;④工作量大;⑤偏重环境影响评价。但是 LCA 无论在理论上,还是在实践方法上都有其局限性,如客观性问题、计算模型的局限性、研究结果的不确定性、数据完整性和精度问题、时间和成本问题、时间和地域的局限性。

## 2 造纸废水处理的 LCA 分析实例

### 2.1 LCA 的分析对象

以山东某造纸企业活性污泥法处理系统为分析对象,比较该企业新旧两条废水处理工艺的环境影响,定义的新工艺与旧工艺的区别为新工艺在污水处理工艺前加入超滤系统。旧工艺的各项数据取 2007-2010 年的年平均均值;新工艺的各项数据取 2012 年和 2013 年的年平均均值。

#### 2.1.1 污水处理流程

处理废水包括:抄纸废水和涂布废水。主要污水处理单元包括:超滤设备、加药反应池、一沉池、稳流池、曝气池和二沉池等。污泥处理单元包括:污泥混合池、储泥池和污泥脱水等。

#### 2.1.2 处理系统水质

进、出水水质见表 1。

表 1 造纸废水进出水水质

污染物指标	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Cr</sub>	SS	总磷	总氮
进水 mg/L	514	1623	1989	0	0
出水 mg/L	12	78	57	0.7	3.2

### 2.2 LCA 的研究范围和功能单位

研究范围划定为:山东某造纸企业废水处理设施的建设阶段(包括建筑材料开采、生产、运输)、运行阶段(包括药品的生产、废水处理、污泥的处理与处置)、

废水处理设施的拆除阶段。由于企业技术的改进,在造纸和废水处理过程中存在部分水回用,本研究的功能单位定义为生产 1t 铜版纸。

### 2.3 生命周期清单分析

#### 2.3.1 施工建设阶段清单预处理

由于处理技术的不断发展,废水量的增长以及出水排放要求的不断提高,大部分污水处理厂在 15~20 年内需要某种程度的改造和更新<sup>[2]</sup>。因此,施工建设阶段的建筑材料消耗量以及施工建设阶段的能耗问题均按 20 年的运行期进行考虑。

用于废水处理厂建设的建筑材料主要包括:水泥、锯材、钢材、砂、碎石、铸铁管、钢管配件和闸阀。建筑材料消耗量可根据主要建筑材料清单,换算成统一的功能单位,见表 2。

表 2 建筑材料消耗量清单

	超滤前	超滤后
材料数量 t/t 纸·年	$8.58 \times 10^{-3}$	$7.15 \times 10^{-3}$

施工建设阶段的能耗主要由各种建筑材料生产能耗、建筑施工直接能耗和建筑材料运输能耗三部分组成。

建材生产能耗清单引用文献资料<sup>[3]</sup>。施工能耗可根据处理系统的施工面积(1235m<sup>2</sup>)以及单位面积的施工能耗进行计算。电耗按燃料热当量(热电转换率以 32%计)计算,即 1kWh=11080kJ。

建材运输能耗可根据各方案的建材消耗量、运输里程及其运输单耗进行计算。其中建筑材料运输里程平均取 20km,运输单耗为 1836kJ/(t·km)。消耗的柴油量按柴油热值换算,柴油热值=42.8MJ/kg<sup>[4]</sup>。

施工建设阶段能耗清单,见表 3。

表 3 施工建设阶段能耗清单

	超滤前	超滤后
电 kWh/t 纸	0.56	0.47
柴油 t/t 纸	$7.41 \times 10^{-6}$	$6.17 \times 10^{-6}$

#### 2.3.2 运行阶段清单预处理

本研究的运行阶段包括药品的生产、废水处理、污泥的处理与处置。其中废水经处理达标后排入河流;污泥经处理与处置后外运。

运行中需投加的药品包括:PAC、PAM、尿素和磷酸。其中 PAC 作为混凝剂、PAM 作为助凝剂投入加药反应池。尿素和磷酸作为营养物质投入曝气池,保证微生物的正常生长与繁殖。另外药品 PAM 也用于污泥脱水。

运行中的耗能设备包括:超滤设备、污水泵、冷却塔、风机、污泥泵、加药泵、搅拌机和压滤机。

运行阶段的药品投加量、能源消耗量以及最终污染物排放量的数据来自该企业的废水年报。但 PAC、PAM、尿素和磷酸均为次级资源,电为次级能源,并非完整清单所要求的初级资源或能源。并且从生命周期的角度分析,这些次级资源和能源在生产和加工过程中都产生环境性排放,也应该纳入生命周期排放之中。因此,要得到处理 1t 造纸废水的生命周期环境负荷,不仅要考虑生产过程中的资源、能源消耗和环境排放,还要对各相关次级资源和能源进行环境负荷的上游追溯。

本研究的 LCA 软件具有较为完整的数据库,可将输入的资源 and 能源转化为初级数据<sup>[5]</sup>。该软件中已有 PAC、磷酸、电的清单数据库,尿素、PAM 的清单需自己创建,采用现场调查和文献调查相结合的办法创建了这些清单。根据该软件的数据库,PAM 应上游追溯至生产盐酸、丙烯腈、纯碱的清单;尿素只需找出清单。

#### 2.3.3 拆除阶段清单预处理

拆除阶段的能源消耗主要与进行拆除作业的机器设备有关,根据有关文献,拆除能耗按建设能耗的 90%计算<sup>[2]</sup>,而建筑垃圾可按照 80%的全部建筑材料计算<sup>[6]</sup>。

#### 2.3.4 生命周期清单计算及分析

利用 AIST-LCA Ver4 进行计算,需首先按照一定格式输入上述已经分析得到的清单。例如运行阶段,绘制系统边界图时将污水处理和污泥处理并列摆放,并在各自的 Data sheet 中选择需要输入的资源、能源及污染物名称并输入数量,由于 Data sheet 中资源列表为初级资源,而废水处理中的 PAM、PAC、尿素和磷酸属于次级资源,因此需在 Upstream connection 中创建上游物质连接,通过该功能绘制系统边界图直至清单中的物质在软件中都能找到,以达到转化为初级资源的目的。通过 AIS T-LCA Ver4 软件最终输出处理 1t 造纸废水的生命周期清单表。

在环境污染中,单项污染物排放量所占份额最大的是 CO<sub>2</sub>,约占其生命周期排放量的 47.4%,污泥、工业废弃物、COD 所占份额依次减小,分别为 41.6%、9.3%、0.91%,可认为这些污染物的排放在生命周期排放中占主导地位。比较上超滤前后的 CO<sub>2</sub> 排放量,上超滤后比上超滤前 CO<sub>2</sub> 的排放量下降了一半多,由原先的 0.0455t 纸降到 0.0219t 纸。

同时该软件分析得出:从生命周期角度来看造纸废水治理工艺的环境负荷主要来自运行阶段;药品中

PAC 对环境的影响最大,这是由于废水处理中投加的 PAC 量较其他药品量大且 PAC 生产中消耗的资源量大。

## 2.4 生命周期影响评价

### 2.4.1 生命周期影响评价简介

生命周期影响评价:对清单阶段数据进行定量或定性的评价,此评价考虑了对生态系统、人体健康和其它方面<sup>[7]</sup>的影响。从概念上讲,影响评价有 3 个过程即影响分类、特征化和量化。

采用日本产业技术综合研究所 LCA 研究中心开发的生命周期影响评价系统 LIME 进行评价,在进行影响评价时,首先根据获得的污染清单,计算它们对城市空气污染、全球变暖等 11 种类型的影响,由这 11 种影响类型评价对需要保护的人类健康、社会财富、物种多样化和初级生产力等 4 个保护目标的危害,根据 4 个保护目标相应的权重,最终求得单一的生态指标:生态化的币值 Yen。评价对象的损害大小,可以通过生态化的币值 Yen 直接表示。

### 2.4.2 评价结果

采用 AIST-LCA Ver4 评价软件,可将已获得的造纸废水治理工艺的污染清单按影响类型分类计算,经评价危害后得超滤前后建设和拆除阶段、运行阶段的四张危害评价结果表。由于每张表的各列单位不同,该评价软件可将危害评价结果表中各列的数据赋给一个权重,使得污水治理方法对 4 个环境保护目标的影响折算成共同的单位:生态货币值 Yen。该软件中 LCA 评价结果包括两部分内容:建设和拆除阶段、运行阶段。图 2 为建设和拆除阶段的 LCA 评价结果。图 2 表明该阶段的主要环境影响为:全球变暖、酸化、光化学污染、固体废弃物、资源消耗和城市空气污染。其中排在第一位的是固体废弃物,其次为资源消耗,全球变暖排在第三。从图 2 也可以看出,建设和拆除阶段中上超滤前的各项环境影响值都大于上超滤后的值,其中对环境的影响最大的是固体废弃物:上超滤前为  $8.10 \times 10^{-3}$ Yen,上超滤后为  $6.76 \times 10^{-3}$ Yen;对环境的影响最小的是光化学污染:上超滤前为  $1.97 \times 10^{-8}$ Yen,上超滤后为  $1.64 \times 10^{-8}$ Yen。

最终采用 AIST-LCA Ver4 评价软件可得到造纸废水治理工艺的 LCA 评价结果,如表 4。由表 4 可见,该生命周期的环境影响为:全球变暖、对人体的毒性、资源消耗,等等。其中造成的最大环境影响为城市空气污染,其次为全球变暖、固体废弃物和资源消耗。经比较发现:上超滤前的生态化币值比上超滤后的生态

化币值要大得多,分别为 1.40Yen 和 1.15Yen。

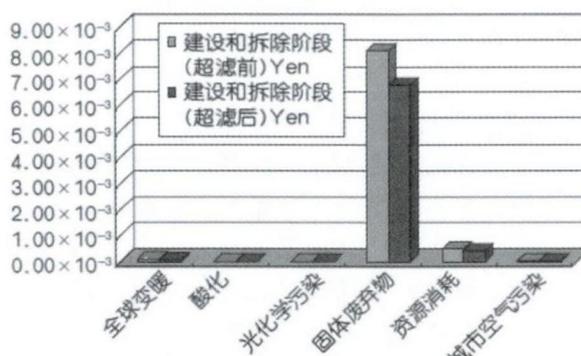


图 2 超滤前后建设和拆除阶段的 LCA 评价

表 4 两种污水治理方法的 LCA 评价结果

	上超滤前 Yen	上超滤后 Yen
全球变暖	$8.07 \times 10^{-2}$	$3.88 \times 10^{-2}$
对人体的毒性	$1.47 \times 10^{-5}$	$7.15 \times 10^{-6}$
对生态的毒性	$5.26 \times 10^{-6}$	$2.52 \times 10^{-6}$
酸化	$8.47 \times 10^{-3}$	$4.06 \times 10^{-3}$
富营养化	$9.51 \times 10^{-3}$	$3.20 \times 10^{-3}$
光化学污染	$2.53 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$
固体废弃物	$5.16 \times 10^{-2}$	$3.39 \times 10^{-2}$
资源消耗	$4.54 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-2}$
城市空气污染	1.20	1.05
小计	1.40	1.15

### 2.5 生命周期结果解释

生命周期结果解释是将清单分析和影响评估的结果组合在一起,使清单分析结果与确定的目标和范围相一致,从而得出结论和建议。在清单分析中我们已经得出:在造纸废水治理工艺的环境污染中,单项污染物排放量所占份额最大的是  $\text{CO}_2$ ,约占其生命周期排放量的 47.4%,这主要来源于造纸废水治理过程中的直接排放和间接排放。直接排放来源于废水治理过程中煤的燃烧;间接排放来源于机器使用及药品生产加工中电在其生产过程中产生的污染物。

从生命周期影响评价中我们可以得出:超滤设备能够降低造纸废水治理工艺中对环境的影响,减少环境负荷,特别是上超滤后 PAC 的使用量以及污泥的产生量都明显减少。由于该企业的造纸废水为抄纸废水和涂布废水,COD 含量不是很高,但生命周期评价强调对该工艺的全生命周期进行评估,而药品的生产以及耗能设备的使用都消耗大量的电,因此最终得出城市空气污染为造纸废水治理工艺中的最大环境影响。从结论也说明了,为减少该工艺的环境负荷应从源头抓起,减少各环节资源和能源的浪费。利用 AIST-LCA Ver4 评价软件,我们也得出造纸废水治理工艺的环境负荷主要来自运行阶段,4 种药品中 PAC

对环境的影响最大,因此该企业应在保证废水处理率的条件下降低 PAC 的使用量以及减少耗能设备的使用。从整体来看,各造纸企业应改进造纸工艺,提高造纸效率,减少造纸过程中资源和能源的浪费,这将降低造纸废水的处理成本,真正实现清洁生产的目标。

3 结论

LCA 方法在过去 30 多年中,得到了快速发展和广泛应用,近 10 年来 LCA 在造纸业的应用也日渐完善。虽然目前 LCA 在造纸行业的研究工作主要在发达国家中开展,但是相信在不久的将来,发展中国家的 LCA 进展也会突飞猛进,并将 LCA 结果应用于实现产业环境效益和经济效益的双赢,使它真正成为 21 世纪最具生命力和发展前途的环境管理工具,实现造纸工业的可持续发展。

The Application of Life Cycle Assessment in Papermaking Wastewater Treatment

XI Wen-jun ZHANG An-long

(Shaanxi province key lab of papermaking technology and specialty paper, shaanxi university of science technology, xi an, shaanxi province, 710021)

**Abstract:** Life cycle assessment can be an effective means to evaluate the whole process of the product production, and can also be a tool for environment management. In the paper, the concept, technique framework of LCA and its application in pulp and paper industry at home and abroad are introduced which provides guidance for papermaking enterprise clean production.

**Key words:** life cycle assessment; environment management; papermaking wastewater

参考文献

- [1] 姜金龙,吴玉萍,马军等.生命周期评价的技术框架及研究进展[J].兰州理工大学学报,2005,31(4):23-26.
- [2] 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.
- [3] 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,(12):582-585+626.
- [4] 李芳,张学敏,葛蕴珊,李洪文,王晓燕.甲醇柴油与生物柴油常规污染物的对比研究[J].农机化研究,2009,(07):218-222.
- [5] 韦保仁,王俊,田原圣隆,小林谦介,句坂正幸.苏州城市生活垃圾处置方法的生命周期评价[J].中国人口.资源与环境,2009,(02):93-97.
- [6] 李翔.城市住宅(区)建筑能耗的生命周期评价方法研究[D].华中科技大学,2005.
- [7] 陈璧辉,吴旭英,周飞敏.产品包装绿色性评价方法 LCA 剖析[J].包装工程,2008,(03):176-177+181.

收稿日期:2014-11-26

·信息·

2015 年《中国造纸》征订启事

《中国造纸》为专业技术性刊物,国内外公开发售,由中国造纸学会和中国制浆造纸研究院主办,主要报道我国造纸工业在原材料、制浆、造纸、废液综合利用及污染防治、机械设备、分析检验、工艺和质量控制自动化以及制浆造纸专业基础理论等方面的新成就和重要科技成果。

《中国造纸》除及时报道各研究机构、高等院校在科研理论方面取得的突破成果外,还注重报道各制浆造纸厂引进或自行研究探索的新工艺、新技术。《中国造纸》将理论与实践有机结合,更好地满足了科研工作者以及制浆造纸工厂技术人员的需要。《中国造纸》是我国造纸界权威性技术期刊,连续多年入选“中文核心期刊”、“中国科技论文统计源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国科学文献评价数据来源期刊”,并已被 Scopus、CA 等国外著名的期刊索引收录。

《中国造纸》(刊号 CN11-1967/TS, ISSN 0254-508X)为月刊,每月 25 日出版,大 16 开,国内单价:10 元 / 册,全年 120 元;国外及港澳台地区:20 美元 / 册,全年 240 美元。

《中国造纸》国内总发行:北京市报刊发行局,邮发代号:2-194;国外总发行:中国出版对外贸易总公司,发行代码:DK11070。

《中国造纸》全国各地邮局均可订阅,如错过邮局订阅,可直接与中国造纸杂志社发行部联系补订。

电话:(010)64778173(发行部) (010)64778158~61(编辑部)

传真:(010)64778174 E-mail: cpp2108@vip.163.com

通信地址:北京朝阳区望京启阳路 4 号中轻大厦 6 层 中国造纸杂志社 邮政编码:100102

·信息·

湘江纸业获得第 17 项国家发明专利证书

10 月 21 日,永州湘江纸业有限责任公司获得了由中华人民共和国国家知识产权局颁发的国家发明专利证书,这项发明专利是“一种防锈原纸及其生产方法”。这是该公司近年来获得的第 17 项国家发明专利。

“一种防锈原纸及其生产方法”的技术开发是该公司的重要技术创新成果。防锈原纸是一种具有能够防止金属材料和制品发生锈蚀功能的防护用纸,它不同于普通牛皮纸,除了要求具有较好的物理强度外,对纸张本身的定量、透明度、施胶度、pH 值,特别是氯离子和硫酸根离子的含量都有严格的要求。此项技术创新是采用针、阔叶木纤维原料,经 DDS 置换蒸煮制浆、冷喷放、氧碱脱木质素、过氧化氢漂白工艺抄造,提高了纸浆的物理强度和均匀性。在满足防锈原纸物理强度指标要求的前提下,用价格相对低廉的阔叶材部分取代针叶材,节约了长纤维原料,降低了生产成本。这项专利的获权,标志着该公司核心竞争力的提升,具备了雄厚的技术研发实力,增加了行业的技术含量,创造了较显著的社会经济效益。

潘贞叶