

基于 LCA 的 POPs 控制技术系统 评估方法研究

冯 嫣^{1,2} 吕永龙^{1*} 王铁宇¹ 贺桂珍¹ 耿 静¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 POPs 控制的技术举措是各行业削减 POPs 排放的重要手段。为了在众多 POPs 控制技术中筛选出更可靠、更经济可行的技术, 将 POPs 控制技术分为替代技术、入料控制技术、过程控制技术及末端处置技术四个大类, 并结合综合指标法和生命周期法建立了 POPs 控制技术系统评估框架。同时, 以山西某焦化厂出焦除尘布袋技术作为案例进行定量评估, 系统地给出了布袋除尘器在经济运行、环境保护以及技术效果三方面的指标值。评价结果显示布袋除尘技术在技术稳定性、去除 POPs 污染物效果等技术指标上有较好的表现, 并且不会产生额外的环境影响负荷。

关键词 POPs 控制技术 技术评估 生命周期评价

中图分类号 X829 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)03-0709-08

LCA-based integrated evaluation framework of POPs control technologies

Feng Yan^{1,2} L Yonglong¹ Wang Tieyu¹ He Guizhen¹ Geng Jing¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental

Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract POPs control technologies are very important methods in many sectors to reduce POPs release. In order to select suitable and economical technologies, POPs control technologies are classified into four categories and integrated evaluation framework based on life cycle assessment is built. In the case study of coking industry conducted in Shanxi Province, bag filter is chosen to be evaluated with economic index, environmental impact index and technical index. The results indicate that bag filter is environmental friendly and has good technical performance.

Key words POPs control technology; technology evaluation; life circle assessment

为了控制持久性有机污染物 (persistent organic pollutants POPs) 的污染, 中国于 2007 年 7 月启动了“《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》国家实施计划”, 明确提出引进国外技术及开发各种替代技术或者替代产品等进行 POPs 的削减。在此背景下, POPs 削减控制技术在中国得到广泛应用。目前, 国际上各行业用于 POPs 控制的技术种类繁多^[1,2], 技术成熟度、适用条件、技术效果等差别很大。有必要建立一套对于 POPs 控制技术的系统评估方法, 便于企业和政府引进适用的技术。

对 POPs 控制技术的综合评价, 不仅需要考虑其对 POPs 的去除效果、对环境产生的负面效果, 也应当考虑到技术是否具有经济可行性。从已有的研究看, POPs 控制技术评估的国内外研究还比较少,

已见的研究中主要采用的是层次分析法^[3,4]、专家打分法^[3~5]等, 主要针对常规的 POPs 污染物处置技术, 对各指标进行定性讨论, 权重的赋值主观化。

本研究尝试采用定量的方法进行技术评估。为了全面综合地分析技术的特点和应用限制等因素, 采用了生命周期分析法 (life cycle assessment LCA)。LCA 能够保证技术评估的定量性, 对于产品

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2008BAC32B07); 国家“973”重点基础研究发展规划项目 (2007CB407307); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX2-YW-420-5)

收稿日期: 2009-05-11; 修订日期: 2009-06-15

作者简介: 冯嫣 (1983~), 女, 硕士研究生, 主要从事 POPs 污染控制技术分类与评价研究工作。E-mail: fengy17@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yll@cees.ac.cn

或系统进行全过程评估,并给出各个环节的输入输出,反映系统在不同环节的能量消耗或者环境影响^[6]。因此,本研究尝试将 LCA 与指标体系相结合,建立综合有效的 POPs 控制技术评估方法框架,以助于决策拟定机构或者研究机构对技术进行改进筛选并更合理地引进或推广优选技术。

1 POPs控制技术特点及分类

POPs 类污染物质分为有意产生和无意产生两大类,相应的控制技术也不同。有意产生类 POPs 如 DDT 等农药类物质,已通过寻求替代产品和停止生产等方式进行了污染控制。无意产生类 POPs 主要指一些工业过程中产生的副产物,如多氯联苯 (PCBs)、多环芳烃 (PAHs) 和二恶英/呋喃 (PCDDs/PCDFs) 等物质,主要产生于有色金属冶炼、氯碱、水泥、钢铁、焦化和焚烧等行业^[1,8]。目前,此类污染物是削减关注的重点,在各行业已经发展出相应的控制技术^[7]。为此,国际上专门制定了《最佳可用 (BAT) 最佳环境实践 (BEP) 技术导则》(以下简称《BAT/BEP 导则》),指导各国的实践。通过对《BAT/BEP 导则》的分析以及国外相关行业的规定,我们总结出这些技术具有以下特点:

(1) 技术范围广泛,种类繁多。削减 POPs 的技术种类很多,而且用于生产的各个阶段,原理和功能差异显著,从原材料的分选技术到废渣的处理技术都可以用作 POPs 污染的控制。

(2) POPs 削减功能和其他技术功能耦合。很多技术在削减 POPs 污染物的同时,也削减其他如 COD、NO_x 等常规污染物。

(3) 同一技术可应用于不同行业并显示出不同的污染去除贡献效果。比如,布袋除尘器可以用于钢铁、焦化、有色金属冶炼和水泥建材等多种行业,针对的污染物也不同。

(4) 技术可能对行业产品的生产产生影响。一些技术为了达到降低 POPs 排放的目的,对生产的过程参数或者生产工艺进行了改动,这有可能影响行业产品的产量或者品质。

鉴于 POPs 控制技术有这些特点,在进行 POPs 控制技术评估时应根据其具体行业具体生产阶段的应用来开展,根据技术作用于生产的不同阶段将技术进行分类。从行业生产的生命周期来考虑,将技术分为四个大类:替代技术、入料控制技术、过程控制技术以及末端控制技术(图 1)。

(1) 替代技术:用以代替原有的生产工艺以避免 POPs 类污染的技术。此类技术包括在钢铁烧炼工序中用来代替传统工艺的直接还原铁技术。

(2) 入料控制技术:通过对原材料进行再加工来削减 POPs 污染的技术。例如在有色金属冶炼中对于原始矿石进行的分选、粉碎和预热等技术。

(3) 过程控制技术:通过对生产过程某些参数的更改控制以削减 POPs 的技术。例如,在冷却高温气体过程中采用的烟气急冷技术等。

(4) 末端控制技术:将含有无意产生 POPs 的废气废渣废水进行处理,削减其排放量的技术。此类技术发展得较为完备,根据处理对象的不同,又可分为尾气处置技术、废水处置技术和残渣处置技术等。例如,处理气体的旋风除尘器、布袋除尘器;处理废水的生化处理技术以及处理固废的高温焚烧技术等。

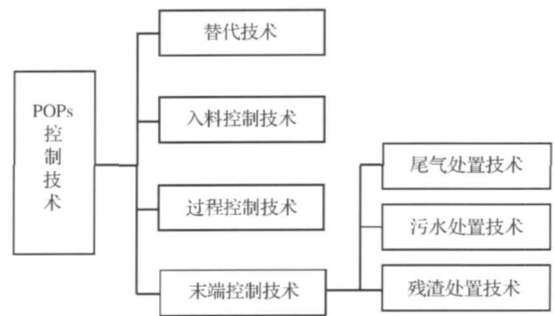


图 1 POPs 控制技术分类

Fig 1 Classification of POPs control technologies

2 POPs控制技术评估框架的构建

2.1 综合评价指标体系

在同类 POPs 控制技术的比较中,着重考虑的主要是经济性、环境友好性和技术性三方面的因素。综合指标体系也基于这三个方面建立,主要考察经济指标、环境指标以及技术指标。细节指标层基于对企业的经济承担能力、LCA 环境影响种类和 POPs 控制技术特点等因素的考虑建立。具体的指标体系如表 1 所示。

2.1.1 经济指标

经济指标不仅考虑技术的成本,也考虑技术产生的经济效益。POPs 控制技术可能会带来经济效益,比如有的 POPs 控制技术可通过污染物处理的降温过程进行发电。

表 1 POPs 控制技术综合评价指标体系
Table 1 Indicator system for integrated assessment of POPs control technologies

目标层	准则层	因子层	指标层	
POPs 控制技术综合评估	经济指标	收益	技术效益 企业生产效益	
		成本	投资费用 运行费用	
	环境指标	资源消耗	原材料消耗	
			能源消耗	
		环境污染	全球变暖	
			酸化	
			臭氧层破坏	
			湖泊水体富营养化	
			生态毒性	
	固体废弃物处置			
光化学臭氧				
职业健康	呼吸直接暴露			
技术指标	处理达标性	POPs 去除率 其他污染物去除达标率		
	技术可靠性	技术故障率 生产影响率		

2.1.2 环境指标

环境指标考察技术对环境产生的负面影响, 包括对自然资源的消耗、对环境造成的污染以及对操作技术的工人带来的健康危害。资源消耗主要考虑如煤、燃油和矿石等不可再生资源及当地紧缺资源的消耗。环境污染主要选取了全球变暖、酸化、臭氧层破坏、水体富营养化、固体废弃物处置、光化学臭氧和生态毒性这 7 种环境污染影响。技术操作工人的健康危害主要是通过吸入毒性的 POPs 物质而引起的, 因此主要考虑工人对 POPs 的呼吸暴露水平。

2.1.3 技术指标

POPs 控制技术的主要特点和主要功能是对 POPs 排放的削减。所以技术指标是筛选 POPs 控制技术时主要考虑的因素之一。因为 POPs 控制技术可能会改变生产工艺从而对产品的生产造成影响, 因此提出的生产影响率是指采用 POPs 控制技术造成的产品减产及相关经济损失与原产品经济效益的比值。由于 POPs 控制技术并不单一去除 POPs 因此在评估中同时设立其他污染物去除达标率指标。

2.2 LCA 方法框架

根据 ISO14040 标准给出的定义, LCA 包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价和解释 4 个阶段^[4,9]

2.2.1 系统边界设定

技术生命周期评价首先要界定系统的边界并确

定能量物质流。根据生命周期评价的要求, 完整的技术生命周期应包括技术的设备制造、运输安装、运行维护及废弃更新 4 个阶段。但在具体研究中, 考虑到评价目的以及数据可得性, 并结合已经设定的指标体系, 需要对技术的生命周期进行简化和限制。为了筛选具有实用性和可得性的技术, 主要考虑已在企业得到应用的技术, 不考虑技术的废弃更新阶段。同时, 因为设定的指标体系中, 经济指标和技术指标都基于技术在企业中运行维护的阶段计算的, 所以在评价中, 仅考虑技术的运行维护一个阶段。所评价的对象可以是单一技术, 也可以是技术系统 (即由多项有助于削减 POPs 的技术组合而成的系统)。具体系统边界设定如图 2 所示。

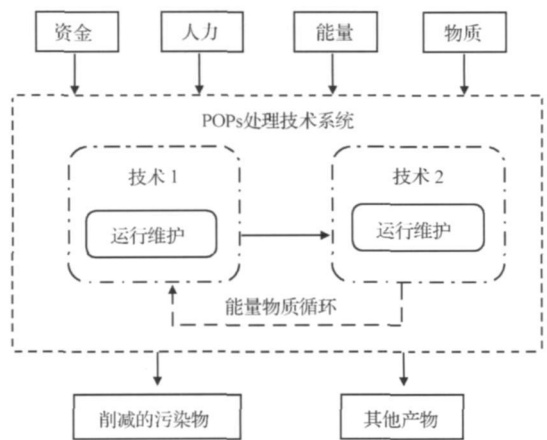


图 2 技术评价系统边界设定

Fig 2 Boundary of LCA system in technology evaluation

POPs 控制技术作用于生产线而削减或者消除 POPs 及其他污染物, 作用机理主要有 3 种: 一是改变污染物的存在状态, 比如将气态污染物吸附到载体中成为固体或者液体, 活性炭吸附和污泥等即属此类; 二是改变污染物的浓度, 如通过膜分离将污水中污染物浓缩成高污染水; 三是作用于原料或者工艺过程以避免污染物的产生。根据技术作用机理, 在考虑系统输出时主要考虑附加污染物排放, 即不考虑原有生产过程的污染物排放, 而考虑采用技术后产生的额外污染物或其他产品, 如吸附污染物载体的排放、浓缩污染物排放和更改工艺后增加的污染物排放等。

2.2.2 生命周期清单分析

在考虑各环节的输入输出时, 以技术运行中的能量流和物质流为基础, 主要考虑不可再生资源与当地紧缺资源的消耗。同时应考虑主要的附加污染

物的排放与相应处置过程。

2.2.3 生命周期影响评价

因为各种环境影响有不同的作用方式和影响范围,需要基于地域性加以考虑。因此在研究技术系统的环境影响时主要采用了比较成熟的 EDIP 方法^[10]环境影响分类体系,并进行了简化。环境影响分类体系如表 2 所示。在具体的计算中,以资源耗竭系数、环境影响负荷系数和 POPs 职业暴露系数来表征环境影响。资源耗竭系数及环境影响负荷系数采用杨建新等^[11]建立的模型计算,将系统所产生的影响标准化,并根据不同影响的重要程度进行加权,计算公式如下。

表 2 环境影响分类

Table 2 Classification of environmental impacts for LCA

类型	全球性影响	区域性影响 光化学臭氧	局地性影响
环境污染	全球变暖	酸化	固体废弃物处置
	臭氧层损耗	湖泊水体 富营养化	生态毒性
资源消耗	化石燃料(煤、油、 天然气等)		水
	金属及其他矿物质		
职业健康			职业暴露风险

资源耗竭系数(resource depletion index, RD I)^[12]:将技术运行中的能量耗损通过中国能源结构还原成消耗的煤、油和天然气的量,将其余不可再生资源消耗还原成原金属矿石资源的耗损量。通过与人均资源消耗量的比值来进行标准化,并通过各种资源不同的稀缺程度进行加权。具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{RDI} &= \sum \text{WR}(j) = \sum \frac{\text{RR}(j)_s}{\text{RES}(\text{PE})_{j_s}} \times \frac{\text{RC}(j)}{\text{RR}(j)_s} \\ &= \sum \frac{\text{RC}(j)}{\text{RES}(\text{PE})_{j_s}} \end{aligned} \quad (1)$$

RD I 资源耗竭系数; RR(j)_s: j 种资源在评价基准年(base year)人均消耗量;

RC(j): 技术系统对第 j 中资源的年消耗量;
RES(PE)_{j_s}: j 种资源评价基准年人均蕴藏量。

环境影响负荷(environmental impact bad EIL): 将排放的各种污染物质的量分配到各种环境影响,通过当量因子进行整合,根据人均环境影响潜值进行标准化。各种污染物对应不同种类环境影响的当量因子在一些研究中已经提出并得到了应用^[11, 14],而不同污染物生态毒性的当量因子并不易确定。美国环境保护局(USEPA)在这一方面进

行了比较长期的工作, Huijbregts 等^[15]以对二氯苯作为基准物,系统地提出了 181 种污染物质(包括重金属、无机污染物和有机污染物)的毒性潜值,可以作为考察生态毒性的毒性定量因子应用。在考察不同环境影响的权重时,通过此类影响的当前水平和管理目标水平之间的距离来确定各环境影响的权重。具体计算公式如下:

$$\text{EIL} = \sum \text{WP}(j) = \sum \left[\frac{\sum Q(j)_i \times \text{EF}(k)_i}{\text{ER}(j)_i} \right] \quad (2)$$

EIL: 环境影响负荷; EF(j)_s: 第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子; ER(j)_i: 为目标年限第 j 类环境影响潜值基准; $Q(j)$ _i: 为系统产生的 i 类物质分配到环境影响 j 类上的标准量。

POPs 职业暴露系数(occupational exposure index, OEI): 技术操作工人在工作时间段对 POPs 的呼吸暴露量,与其职业暴露控制标准的比值。暴露量的计算公式^[13]如下:

$$E = \int_0^t C_i \times d_i = C_a \times t \quad (3)$$

E : 人体吸入 PAHs 浓度; C_i : 不同时间段目标 POPs 浓度; C_a : 工作时间段平均浓度; t 为时间(h);

通常空气污染物浓度难于连续测定,对于连续运行的系统而言,污染物浓度保持在一定范围内,因此可以采用某一个时段的测定值作为平均值来计算。在评价中,可以采用国际上已经有的职业暴露最高允许浓度作为基准值,通过暴露浓度与最高允许浓度之间的比值作为职业暴露系数。对于职业暴露最高允许浓度,国际上一些国家,如荷兰和美国,已经有了初步的研究,并颁布了相应的污染物浓度控制标准。

$$\text{职业暴露风险系数 OEI} = E / \text{PEL} \quad (4)$$

PEL(permissible exposure limits): 根据健康致癌效应等提出的最高允许暴露浓度。

2.3 各项指标获取

2.3.1 经济指标(economic index EI)

通过贴现率^[16]将技术服务的生产线的经济效益与技术使用年限内的总成本整合到基准年进行比较。根据贴现率的成本(效益)计算公式如下:

$$C_a = \frac{C}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r_i)^{t-r_0}} \quad (5)$$

n : 技术系统的服务年限;

t_0 : 基准年;

C_{it} : 平均年成本或者效益;

C_{it} : 第 t 年的成本或者效益 (所有成本: 包括初始投资及运行维护费用及人力成本);

r : 年贴现率, 取当年银行整年利率, 环境方面的经济计算通常取 $r = 5\%$;

企业在采用技术时, 并不单纯考虑技术成本, 而要结合企业自身效益加以考虑。因此经济指标选用技术服务年限内企业的年平均效益与技术的年平均成本的比值来表征。

经济指标: $EI = \frac{B}{C}$ (6)

B 为企业对应生产线毛利润贴现到基准年的年平均毛利润; C 为技术在其服务年限中的投资成本和运行成本贴现到基准年计算出的年平均成本。

对于企业而言, 能用于购买运行技术的资本是根据自身经济实力决定的。因此, EI 值越大, 即技术成本占企业效益的比例越小, 技术的经济性越高, 企业越乐意选用此技术。

2.3.2 环境影响指标 (environmental impact index, EII)

$EII = RD I + EI L + OE I$ (7)

资源耗竭、环境影响和职业暴露 3 项内容都表征了技术在实际应用中可能带来的环境问题。实际评价中, 这三方面影响都是企业和政府需要考虑的因素。所以采用均值赋权, 将 3 项系数进行标准化再相加。环境影响指标值越大, 证明技术在 POPs 削减的同时带来的环境负面效应越大。

2.3.3 技术指标 (technical index, TI):

技术指标应考虑技术对于 POPs 类物质的去除效果, 同时也要考虑此类技术运行的稳定性以及对产品生产的影响。由于一种技术往往可以作用于多种污染物, 因此在评价中应考虑技术对其他污染物的削减达标贡献。所以在技术指标的计算中, 引入了技术稳定性 S (stability), 技术对生产的影响度 I (impact), 技术对其他污染的削减达标率 A (additional effect), 技术对 POPs 类物质削减率 D (decrease) 4 个指标。具体计算公式如下:

技术稳定性:

$S = 1 - \frac{\text{因技术事故年均停止运行时间}}{\text{年设计运行时间}}$ (8)

技术对生产的影响率:

$I = \frac{\text{技术造成的产品减产及相关经济损失}}{\text{原产品经济效益}}$ (9)

其他污染去除贡献率:

$A = \frac{\sum \text{污染物去除达标值}}{\text{排放污染物种数}}$ (10)

去除某种环境控制污染物达标赋值: 去除达标, 赋值为 1; 不达标, 赋值为 0。这里的排放污染物主要考虑环保局要求控制的常规污染物。

因此, 得出的 POPs 控制技术的总技术效益指标计算公式如下:

$TI = (D + A) \times S \times (1 - I)$ (11)

TI 值越大, 技术效果越好, 越宜采用。

3 技术评估案例分析

为了验证建立的技术综合评估方法, 我们对山西焦化行业采用的装煤出焦除尘技术进行了实证研究。焦化行业的高温炼焦工序是多环芳烃 (PAHs) 的主要产生环节^[17], 所调研的山西太原地区 8 家焦化企业均采用了布袋除尘器进行污染物的削减。本文选择其中一家焦化厂作为技术实例, 并且以 PAHs 作为目标削减 POPs 进行技术评估。数据来源主要有 3 种: 一是具体调研数据; 二是焦化厂环境影响评价报告数据; 三是文献调研数据。

3.1 技术背景资料

布袋除尘系统处理对象: 出焦及装煤烟尘 (正常生产阶段基本处于连续运行状态); 焦化厂生产规模: 60 万 t/a 系统初始投资: 1 500 万; 系统年运行费用: 600 万 /a 风机功率: 710 kW /h 设计处理量: 28.8 万 m³ /h 人力成本: 8 人, 工资 800 元 /月 (每人每天工作 8 h); 投产时间: 2005 年; 产品设计服务期: 20 年。

3.2 生命清单分析

根据焦化厂环境影响评价报告内容及实地监测结果, 得到布袋除尘器在运行维护过程中的输入输出结果。虽然按工艺过程要求考虑了燃油、煤、电、钢材、水和废气等输入因素, 以及 NO_x、SO₂、PAHs 和粉尘等输出要素, 但布袋除尘器在运行维护过程仅有电和废气的输入以及粉尘的输出。LCA 输入的电的年均处理量为 22 390 560 MJ / 6 219 600 kW h, 废气为 252 288 万 m³ / 379 744 kg 相应的处理单位 kg 污染物为 6 826.9 J 和 1 kg LCA 输出的粉尘年均处理量为 2 190 t 对应的粉尘处理单位 kg 污染物为 0.668 kg。

3.3 指标计算

3.3.1 环境指标计算

(1) 资源耗竭系数

选择 2007 年作为评价基准年。据联合国发布的《2007 世界人口状况报告》^[18]，截至 2007 年 6 月，世界人口达 64.77 亿。根据 BP 能源报告以及美国地质勘探中心的矿物资源统计报告^[19]，可以得到主要的燃料资源及主要金属矿产资源的 2007 年的人均储存量。案例只消耗了能源，所以仅统计了石油、煤和天然气(表 3)。

表 3 世界不可再生能源资源储量

Table 3 Unrenewable resources reserve in the world

不可再生资源	年产量 (亿 t)	世界探明储量 (亿 t/亿 m ³)	探明储量油当量 (亿 t)	人均储量 (t)	储产比
石油	39.06	1.686	1.686	26.03	41.6
煤	63.72	8.474.88	4.170.35	64.39	133
天然气	29.400	1.773.600	1.596.24	24.65	60.3

2007 年全国发电标准煤耗 334 g/kW h^[20]，技术年耗煤量计算如下：

$$334 \text{ g/kW h} \times 6.219.600 \text{ kW h} = 2.077.3464 \times 10^6 \text{ g} = 2.077.3464 \text{ t}$$

根据我国能源消费比例^[20]计算出布袋技术年资源耗竭量及相应的资源耗竭系数(表 4)。

表 4 资源耗竭系数计算

Table 4 Calculation of resources depletion index

能源	能源比例	人均储量 (油当量 t)	人均储量 (煤当量 t)	系统耗煤当量 (t)	耗竭系数
煤	0.694	64.387	130.846	1.441.678	11.02
油	0.204	26.031	52.899	423.779	8.01
气	0.03	24.645	50.082	62.320	1.24
总计	0.928				20.27

资源耗竭系数反映出布袋除尘技术在运行维护中所消耗的能量和物质的多少，并且采用资源的稀缺程度进行加权，反映消耗资源的珍稀程度。

(2) 环境影响负荷

布袋除尘技术在运行维护阶段所产生的附加污染物为其所收集的灰尘。在焦化厂运行中，布袋除尘器除去飞灰被全部回炉充当燃料，重新进入焦炭生产流程而不排放到环境当中，所以并不会造成额外的环境影响效应。因此环境影响负荷系数为 0 表明布袋除尘技术在运行维护阶段产生的环境影响小。

(3) 职业暴露系数

职业暴露浓度：根据焦化厂环境影响报告数据，以及王静等人在焦化厂各区域测得的厂区空气颗粒物中 PAHs 的浓度^[21]。计算焦化厂空气中 PAHs 平均浓度并以苯并芘 (BaP) 作为参照物，采用毒性等量因子 (TEF) 方法^[14, 21]，将所测定的 12 种 PAHs 的浓度统一并且采用式 (3) 计算出工作八小时暴露浓度(表 5)。

表 5 焦化厂空气中 PAHs 含量及职业暴露浓度计算

Table 5 PAHs concentration in coking industry and occupational exposure calculation

PAHs	厂内平均浓度 (μg/m ³)	TEF	BaP 等效浓度 (μg/m ³)	8 h 工作暴露浓度 (μg/m ³)
NA	5.58975	0.001	0.00558975	0.044718
AC	0.6085	0.001	0.0006085	0.004868
FLU	3.10425	0.001	0.00310425	0.024834
IH	0.62525	0.001	0.00062525	0.005002
AN	0.474	0.01	0.00474	0.03792
FL	5.7815	0.001	0.0057815	0.046252
PY	1.849	0.001	0.001849	0.014792
BaA	4.3985	0.1	0.43985	3.5188
CH	0.668	0.01	0.00668	0.05344
BaP	1.082	0	0	0
BkF	0.32075	0.1	0.032075	0.2566
BaP	0.4705	1	0.4705	3.764
总计			0.97140325	7.771226

虽然对 PAHs 的健康风险研究较多，但国际上尚未建立统一的 PAHs 职业暴露浓度标准。根据美国 1995 年提出的 PAHs 毒性研究报告^[22]，规定了煤焦行业工人 8 h 最高允许暴露浓度为：0.2 mg/m³。根据此标准可以计算出布袋除尘器的职业 POPs 暴露系数：0.0078/0.2 = 0.039。职业暴露系数表明操作技术的工人通过呼吸暴露于 PAHs 的程度，计算结果表明相对于美国制定的职业暴露标准，焦化厂布袋除尘技术的工人 PAHs 呼吸暴露水平较低。

环境指标的计算需要将 RDI、EL 和 OEI 3 项数值进行标准化并均权叠加。但标准化的基础是多项技术数据的比较。因此在单一技术评价时，无法得到综合环境指标，可分开讨论。

3.3.2 经济指标计算

根据公式 (4) 和 (5) 可以得到： $E = 270.27$

经济指标表明在设计使用年限中，企业生产线效益与技术成本的比值。计算指标值表明，

布袋除尘技术对企业产生的经济负担小, 技术经济性较高。但要得出更客观的结论以帮助企业选择合适的技术时, 需要对多种技术的经济指标进行比较。

3.3.3 技术指标计算

通过调研, 由于技术故障发生率 0, 事故天数 0 稳定系数: $S = 1$ 。

中国环境控制常规污染物削减: 苯并芘达标: 1; NO_x 达标: 1; 粉尘达标: 1; 其他污染物削减: $A = 1$ 。

PAHs 去除率 (PAHs 主要吸附于颗粒物上, 在缺乏实验数据情况下暂时采用布袋除尘器的粉尘去除率代替 PAHs 的去除率): $D = 0.99$

布袋除尘器为附加地面除尘系统, 不影响主生产线及其产品焦炭的质和量。对生产的影响率 $I = 0$

根据公式 (9) 得出技术综合指标: $T = 1.99$

从具体指标的赋值来看, 布袋除尘技术的技术稳定性高, 能够同时去除国家关注的其他污染物达到排放标准, 附加污染物削减效果好。此外, 布袋除尘技术不影响产品的生产, 目标 POPs 去除率较好。评价结果表明布袋除尘器的技术效果好。

3.4 综合评价结果

经过计算, 可以得出布袋除尘器的经济环境技术的各项指标以及综合指标。计算结果如表 6 所示。

表 6 布袋除尘器综合评价指标值¹⁾

Table 6 Integrated indicators' values of bag filter

主要指标	各项系数		指标值
	系数	值	
经济指标	单位成本	0.0015	270.27
	单位效益	0.3959	
环境指标	资源耗竭系数	20.27	1.99
	环境负荷系数	0	
	职业暴露系数	0.039	
技术指标	目标污染物削减率	0.99	1.99
	其他污染削减贡献率	1	
	技术稳定系数	1	
	产品质量影响系数	0	

1): 因为评价单一技术, 环境指标的 3 项系数无法标准化, 不能叠加得到总的指标值

分析结果表明, 布袋除尘器技术成本与企业生产效益的比值较小, 技术经济性较好。布袋除尘器技术稳定性高, 去除 POPs 比例较高, 并且能将排放废气中的苯并芘、粉尘和氮氧化物也控制达到排放标准, 并且不会对焦炭的生产造成影响, 在具体运行中达到了比较好的技术效果。布袋除尘器在运行中

造成的主要环境影响来源于能源消耗, 产生的额外环境污染负荷小, 操作技术工人的 PAHs 暴露水平较低, 技术的环境表现较好。

4 结论

本研究建立的基于 LCA 的评估方法主要针对 POPs 控制技术, 可以进行单项技术的评估或者同类别多项技术的比较筛选。其主要目的是在同类别 POPs 控制技术中找出经济成本少, 环境友好, POPs 削减效率高, 技术稳定性强的技术。通过案例的分析和验证, 此评估系统主要有以下特点:

(1) 技术指标针对 POPs 控制技术的特点设立。POPs 控制技术可能会影响产品的生产并且通常有耦合的其他技术效果。考虑到这些特点, 在技术指标中设定了其他污染物去除贡献率及对生产的影响率参数, 以便综合评估 POPs 控制技术的效果。

(2) 指标的设定具有实用性。从企业 (技术的选用者)、工程师 (技术的操作及改进人员) 及政府 (技术的推进者) 三大利益相关方出发, 在设定指标时, 选择企业经济效益与技术成本的比例作为技术的经济可行指标, 便于不同规模的企业考虑技术的选择; 技术总效益成本及环境影响指标的计算, 便于政府及企业对技术效果进行比较并对技术带来的正面效益和负面环境影响进行衡量; 职业暴露风险系数便于工程师进行操作的改进和污染的预防。

(3) 评价周期短、不确定性较少。评价需要的基础数据基于企业的技术运行数据和环境影响报告得到, 可以在短期内通过调研或具体测定得到所需数据进行快捷的评价。需要的背景参数通过现有的统计报告获取, 并采用资源的稀缺性或者环境影响的紧迫性对指标进行赋值, 因此不用另行给出主观假设设定参数, 减少了评价的不确定性。

根据案例的评估, 也发现提出的综合评价体系还存在一些不足, 需要更进一步的研究。

(1) 缺乏统一的 POPs 类物质毒性标准及职业暴露控制标准。不同毒性的物质带来的暴露风险不同, 因此需要一套国际认可的 POPs 类物质毒性标准或者 POPs 类物质的污染控制标准以衡量毒性差异。但现在对于 POPs 类痕量有毒污染物的研究并不完备, 国际上尚未定出完整的控制标准体系, 这方面的研究还待继续。

(2) 指标之间的整合问题也需要进一步研究。环境指标包括资源耗竭系数、环境影响负荷系数以

及职业暴露风险系数。在现有的 LCA 环境评价研究中, 3项系数的评价方法不同, 所得到的数值差距也很大, 因此其整合需要将各项系数进行标准化, 而在评价单一技术时难于达到此要求。现在的解决方法是评价单项技术时采用生命周期解释方法具体分析技术所带来的环境负面效应。在作多项技术评价及比较时, 则可以根据多项技术的系数值将环境负面效应系数进行标准化再叠加。

参考文献

- [1] UNEP. Revised Draft Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices Relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants **2006**, http://dm.pops.int/programmes/BATBEP/processes_procedures/tabid/187/language/en-US/Default.aspx
- [2] Kukami P. S., Crespo J. G., Alfonso C. A. M. Dioxins sources and current remediation technologies — A review. *Environmental International* **2008**, (34): 139~153
- [3] Carpenter B. H., Wilson D. L. Technical/economic assessment of selected PCB decontamination processes. *Journal of Hazardous Materials* **1988**, 17(2): 125~148
- [4] 赵娜娜, 李丽, 易爱华, 等. POPs废物处置技术多目标决策筛选研究. *环境科学研究*, **2007**, 20(3): 164~167
- [5] 邢颖, 吕永龙, 史雅娟, 等. 焚烧、水泥窑和安全填埋法处置 PCBs 污染物技术优选. *环境科学*, **2007**, 28(3): 673~678
- [6] 王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生命周期评价方法及其进展. *上海环境科学*, **1998**, 17(11): 7~10
- [7] 司继涛, 李东, 刘晋文, 等. 危险废物处理处置技术评价方法研究. *环境科学研究*, **2005**, 18(suppl): 39~42
- [8] USEPA. Development The Foundation for Global Action on Persistent Organic Pollutants A United States Perspective. Washington: Office of Research and Development **2002**, EPA/600/p-01/003F, www.epa.gov/ncea/pdfs/pops/popsa.pdf
- [9] Anneliese N. S., Michael N. Life cycle assessment as an engineer's tool? *Journal of Cleaner Production* **2008**, (16): 245~252
- [10] 杨建新, 徐成. 生命周期环境影响类型分类体系研究. *上海环境科学*, **1999**, 18(6): 246~249
- [11] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用. 北京: 气象出版社, **2002**, 70~73
- [12] 王寿兵, 王如松, 吴千红. 生命周期评价中资源耗竭潜力及当量系数的一种算法. *复旦学报(自然科学版)*, **2001**, 40(5): 553~557
- [13] Liby P. J. Assessing total human exposure to contaminants—A multidisciplinary approach. *Environmental Science & Technology* **1990**, 24(7): 938~945
- [14] Nisbet Ian C. T., LaGoy P. K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **1992**, 16(3): 290~300
- [15] Huijbregts M. A. J., Thissen U., Guinee J. B., et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multimedia fate exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere* **2000**, 41: 541~573
- [16] 李克国, 魏国印, 张宝安. 环境经济学. 北京: 中国环境科学出版社, **2003**, 87~89
- [17] 智红梅. 焦化工业与环境保护. *科技情报开发与经济*, **2005**, 15(24): 119~121
- [18] UNPFA. State of World Population 2007. **2008**, www.unfpa.org
- [19] BP Statistical Review of World Energy **2008**, www.bp.com
- [20] 国家统计局. 中国统计年鉴 2007. 北京: 中国统计出版社, **2008**
- [21] 王静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评价. *环境科学*, **2003**, 24(1): 135~138
- [22] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons **1995**, www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp69.html