

# Research on Environmental Impact Assessment of Total Life Cycle for WESP in Coal-Fired Power Plants

Yunzhe Ma<sup>1</sup>, Liying Guo<sup>2</sup>, Dongge Wang<sup>3</sup>, Xiuying Li<sup>4</sup>, Sheng Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>3</sup>Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>4</sup>Jingyu Meteorological Bureau of Jilin Province, Baishan Jilin

Email: [wangsheng9999@126.com](mailto:wangsheng9999@126.com)

Received: Jun. 1<sup>st</sup>, 2015; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2015; published: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

LCA method has been used to research on the environment impact assessment for WESP about some power plant of 330 MW in the course of renovation project including raw materials product, transportation and WESP operation steps. After all the energy consumption and environment impact in all steps have been assessed, environmental impact index can be given in the end. The result has shown that the load of environment impact about the renovation project of coal-fired power plant is 4.55E+04 kg, which is far below the load of environment impact after operation of 8.52E+04 kg, so it has the positive role in improving the environment.

## Keywords

WESP, LCA, Energy Consumption, Pollution Emission, Environment Impact

# 燃煤电厂湿式电除尘生命全周期环境影响评估研究

马韵哲<sup>1</sup>, 郭丽颖<sup>2</sup>, 王东歌<sup>3</sup>, 李秀颖<sup>4</sup>, 王 圣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国电环境保护研究院, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京工业大学, 江苏 南京

<sup>3</sup>南京信息工程大学, 江苏 南京

<sup>4</sup>吉林省靖宇县气象局, 吉林 白山

Email: [wangsheng9999@126.com](mailto:wangsheng9999@126.com)

收稿日期: 2015年6月1日; 录用日期: 2015年6月20日; 发布日期: 2015年6月23日

## 摘要

运用生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA),以某电厂330 MW机组实施的湿式电除尘器(wet electrostatic precipitator, WESP)改造项目为研究对象,对原料生产、运输及WESP装置运行阶段进行生命周期清单分析,分别计算各阶段的能源消耗及对环境的影响进行评估,最后得到环境影响指数。结果表明:该电厂改造项目中WESP的全生命周期造成的环境负影响指数为 $4.55E+04$  kg,远低于其运行后对大气污染物减排产生的环境正影响指数 $8.52E+05$  kg,对环境有积极的改善作用。

## 关键词

湿式电除尘器, 生命周期评价, 能源消耗, 污染物排放, 环境影响

## 1. 引言

我国以煤炭为主的能源结构短期内不会改变,成为大气环境质量变化的主要因素之一[1]。近期灰霾天气的频发已引起公众对燃煤电厂烟尘排放的极大关注,各项更加严格的行业标准和环保政策纷纷出台[2]。目前,为了满足最新大气污染物排放标准的要求,控制烟尘、 $SO_3$ 、水雾及石膏液滴、细颗粒物( $PM_{2.5}$ )、汞及其化合物的排放,实现多污染物协调处理,燃煤电厂提出了在脱硫吸收塔后置湿式电除尘(WESP)的方案[3]。

生命周期评价方法是研究某系统全过程、整个生命周期的对环境影响的方法[4]。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,其相关理念已逐步引入我国,在很多行业都得到了较好的应用[5],如王峰等学者在乙烯行业、谢小天等学者在生活垃圾处理行业、谢明辉等学者在太阳能级多晶硅行业、彭小瑜等学者在农业的环境影响评估中都采用了生命周期评价方法[6]-[9]。在火电行业方面,刘聚明等学者对火电温室气体排放、王红学者对脱硫工艺、梁增英等学者对烟气脱硝技术等方面也运用了生命周期评价方法进行了详尽的研究[10]-[12]。但通过分析发现,当前对于燃煤电厂新兴的WESP装置生命周期评估研究还是空白。针对这一现状,本文以某电厂330 MW机组实施的WESP改造项目为研究对象,首次运用生命周期评价方法,系统地从环境效益角度验证燃煤电厂采用WESP深度净化的可行性。

## 2. LCA 方法及边界条件

生命周期评价(LCA)是一种评价产品、工艺生产过程或活动从原材料的采集和加工到生产、运输、销售、使用、回收、养护、循环利用和最终处理整个生命周期有关的环境负荷过程。生命周期评价的过程包括:首先辨识和量化整个生命周期阶段中能量和物质的消耗以及环境释放,然后评价这些消耗和释放对环境的影响,最后辨识和评价减少这些影响的机会。生命周期评价注重研究系统在生态健康、人类健康和资源消耗领域内的环境影响。

生命周期评价包括四个阶段：1) 目的与范围确定。将生命周期评估研究的目的及范围予以清楚地确定，使其与预期的应用相一致。2) 清单分析。编制一份与研究的产品系统有关的投入产出清单，包含资料搜集及运算，以便量化一个产品系统的相关投入与产出，这些投入与产出包括资源的使用及对空气、水体及土地的污染排放等。3) 影响评估。采用生命周期清单分析的结果，来评估与这些投入产出相关的潜在环境影响。4) 结果分析。将清单分析及影响评估所发现的与研究目的有关的结果合并在一起，对结果进行评估，包括完整性、敏感性和一致性检查，进而形成结论与建议。

在对电力行业湿式电除尘器 WESP 装置进行生命周期评价时，重点分析其原材料的生产、运输与运行过程中的主要耗费对环境的影响，主要从能耗和环境影响两个方面考虑，其目标范围如图 1 所示。WESP 装置一般布置在脱硫系统后面，烟气经脱硫系统后进入 WESP 装置深度净化，最后通过烟囱排放到大气环境中。由于该电厂 WESP 装置阳极板材质采用 316L 不锈钢，不具备很好的防腐性能，WESP 运行过程中需要耗费大量的碱去中和和冲洗水的酸性，所以原料主要涉及制作过程中的主要工程材料钢和运行过程中的碱。

在 WESP 生命周期评价中涉及的内容较为繁杂，本评价系统做了以下的假设和简化：1) 工程耗材主要考虑钢材的消耗；2) 由于 WESP 废水排放可作为脱硫系统工艺水再利用，此处不考虑污水排放情况；3) 不考虑设备回收报废阶段；4) WESP 作为终端净化装置，对多种污染物均有去除效果，如表 1、表 2 所示，此处仅选取了烟尘、SO<sub>3</sub> 等主要因子。

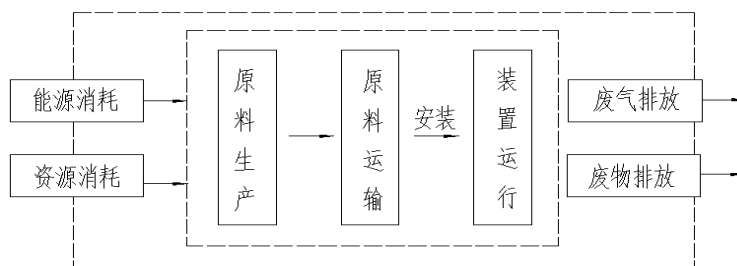


Figure 1. Target range of WESP project  
图 1. WESP 项目的目标范围

Table 1. Flue gas emission parameters and main pollution index  
表 1. 烟气排放参数及主要污染指标

参数		入口污染物含量/(mg/m <sup>3</sup> )					出口污染物含量/(mg/m <sup>3</sup> )						
烟气流量/(m <sup>3</sup> /h)	年利用小时/h	烟气阻力损失/Pa	烟道截面积/m <sup>2</sup>	烟尘	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Hg	烟尘	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Hg
1,896,000	5500	250	135	23.7	49.6	17.4	18.2	0.0049	7.1	38.5	2.0	5.7	0.0029

Table 2. Parameters comparison of flue gas with and without WESP  
表 2. 烟气经 WESP 装置净化与未净化参数对比

项目	能源消耗			污染物排放/(kg/h)				
	电耗(kW/h)	水耗(m <sup>3</sup> /h)	碱耗(0.1MPaG,32%水溶液)(kg/h)	烟尘	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Hg
烟气经过 WESP 装置净化	320	15	100	13.47	73.00	3.80	10.81	0.0054
烟气未经 WESP 处理向外界排放	/	/	/	44.94	94.04	33.00	34.51	0.0093

### 3. WESP 全生命周期相关参数清单

#### 3.1. 烟气相关参数

WESP 工作的基本原理与电除尘器基本相同，主要的差异是 WESP 采用液体冲刷集尘极表面来进行清灰[13] [14]。目前国内 WESP 发展的主要阳极型式有柔性电极、玻璃钢和不锈钢等，该电厂 WESP 阳极采用不锈钢，烟气的排放量及主要大气污染物入口浓度、出口浓度如表 1 所示。

本项目中烟气在经过 WESP 装置深度净化和未经 WESP 深度净化处理直接通过烟囱向外界排放两种情况下能源消耗的量，以及转化成单位小时的污染物排放如表 2 所示。

#### 3.2. 工艺相关参数

该电厂 WESP 项目在制作过程中相关的原料主要是钢，运行过程中相关的原料主要是碱。过程主要包括生产过程、运输过程、运行过程。

##### 3.2.1. 碱及钢生产过程能耗及排放

离子膜法制碱技术作为烧碱行业重点推广的清洁生产技术，具有工艺简单、产品质量高、环保节能等优点，在我国已广泛应用并逐渐占据主导地位，截止到 2013 年底，我国离子膜烧碱产能比例接近 95% [15]。我国《节能减排“十二五”规划》要求单位产品烧碱(离子膜)能耗至 2014 年下降到 330 kg 标准煤/t [16]。同时单位产品离子膜烧碱还要耗电 2100 kWh/t，耗水 4600 kg/t [17]。离子膜生产工艺的污染物来源主要有盐水精制工序和电解工序。吨碱排污情况见表 3。

根据电厂实际情况，电厂及 WESP 的运行寿命按照 30 年计。据此推算，可得出 WESP 装置整个生命周期耗碱的污染物排放量。

WESP 工程建设材料中钢材占主要部分，这其中包括装置本体及内部件、支撑 WESP 装置的钢架及管道等工艺系统。通过该电厂 WESP 改造工程投标材料清册估算，共需钢材约 1000 t。钢材的生产环节涉及从原料厂、烧结球团、高炉、转炉到冷热轧、酸洗等诸多工序[18]。根据中国钢铁工业协会的统计数据[19]，确定吨钢的主要能耗，并最终得出污染物的排放情况，见表 4。

##### 3.2.2. 碱及钢运输过程能耗及排放

WESP 所需材料钢、碱等运输方式主要考虑铁路运输和公路运输，铁路运输主要考虑内燃机车柴油能耗，公路运输主要考虑汽油的消耗[20]。根据本项目的运输特点，运输过程中 30%选用汽车，70%选用火车，运输距离约为 100 km，同时汽车的单位汽油消耗为 51 g/(t·km)，火车的单位柴油能耗为

Table 3. Emission inventory about ton of alkali

表 3. 吨碱污染物排放清单

项目	输入						输出				
	标准煤/kg	电能/kWh	水/kg	COD/kg	汞/kg	AOX/kg	烟尘/kg	CH <sub>2</sub> CHCl/kg	HCl/kg	Cl <sub>2</sub> /kg	CO <sub>2</sub> /kg
吨碱产生能耗及排放	3.30E+02	2.10E+03	4.60E+03	4.86E-01	2.86E-06	1.92E-08	3.43E-01	2.12E-08	5.83E-09	2.03E-09	3.15E+03

Table 4. Emission inventory about ton of steel

表 4. 吨钢污染物排放清单

项目	输入						输出				
	标煤/kg	电耗/kWh	水耗/kg	COD/kg	NH <sub>3</sub> /kg	挥发酚/kg	总氰化物/kg	悬浮物/kg	SO <sub>2</sub> /kg	烟尘/kg	CO <sub>2</sub> /kg
吨钢产生能耗及排放	5.90E+02	4.70E+02	3.40E+07	2.15E-03	2.31E-05	2.16E-05	1.85E-02	7.38E-04	1.20E+00	8.70E-01	5.55E+02

41 kg/(t·km) [21]。当汽车载重为 10 t 时，运输 2822.88 t 材料累计需 283 车次，运输总路程达 28,300 km，耗费汽油 14,400 kg。火车载重为 2000 t 时，运输 6586.72 t 材料时累计需 4 车次，运输总路程达 400 km，耗费汽油 32,800 kg。

目前国内内燃机污染物排放因子见表 5 [22]。

### 3.3. 清单汇总分析

WESP 运行阶段的污染物排放主要由其耗电间接引起。所以，综合 WESP 的生产过程、运输过程、运行过程，项目整个生命周期的能源消耗与污染物排放清单见表 6。

Table 5. Emission factor of pollution from internal combustion engine (unit: g/km)

表 5. 内燃机污染物排放因子 (单位:g/km)

排放物	内燃机	
	汽油机	柴油机
CO	8.6	0.5
NO <sub>x</sub>	2.8	0.5
HC	1	0.1
CO <sub>2</sub>	170	150

Table 6. Data inventory of WESP LCA

表 6. WESP 全生命周期数据清单

项目	原料生产	原料运输	WESP 运行	合计	
能耗	标煤/kg	3.38E+06	1.85E+04	/	3.39E+06
	电耗/(kW·h)	4.71E+05	/	5.28E+07	5.33E+07
	汽油/kg	/	1.44E+04	/	1.44E+04
	柴油/kg	/	3.28E+04	/	3.28E+04
	水/kg	1.17E+09	/	2.48E+06	1.17E+09
	碱/kg	/	/	1.65E+06	1.65E+06
	烟尘	3.76E+03	8.28E+01	2.06E+04	2.44E+04
	SO <sub>2</sub>	1.20E+04	/	1.19E+05	1.31E+05
	NO <sub>x</sub>	/	2.84E+03	1.27E+05	1.30E+05
	CO <sub>2</sub>	2.71E+07	1.47E+05	6.23E+07	8.96E+07
	COD	4.08E+03	/	6.34E+05	6.38E+05
	Hg	2.41E-02	/	1.68E+01	1.68E+01
	NH <sub>3</sub>	2.31E-02	/	/	2.31E-02
污染物排放/kg	CO	/	3.88E+03	/	3.88E+03
	HC	/	1.14E+03	/	1.14E+03
	挥发酚	2.16E-02	/	/	2.16E-02
	总氰化物	1.85E+01	/	/	1.85E+01
	悬浮物	7.38E-01	/	/	7.38E-01
	AOX	1.61E-04	/	/	1.61E-04
	CH <sub>2</sub> CHCl	1.78E-04	/	/	1.78E-04
	HCl	4.92E-05	/	/	4.92E-05
	CH <sub>4</sub>	/	/	2.82E+04	2.82E+04
	Cl <sub>2</sub>	1.71E-05	/	/	1.71E-05

将原料生产、运输及 WESP 运行阶段的能耗均折算为标准煤可得三个阶段的生产能耗标煤分别为  $3.38\text{E}+06\text{ kg}$ 、 $8.75\text{E}+04\text{ kg}$ 、 $6.50\text{E}+06\text{ kg}$  [23]。可见,在整个生命周期中运行阶段的能源消耗最多,占 65.21%,其次是原料生产阶段占比 33.91%,原料运输阶段仅占 0.88%。同时,在原料运输阶段耗费了 100%的汽油、柴油,在原料生产阶段耗费了 99.79%的水,在 WESP 运行阶段耗费了 100%的碱。

WESP 项目全过程中污染物排放以气体排放物为主,其中以  $\text{CO}_2$  为主,其次为大气污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘等。同时, COD、CO、HC、 $\text{CH}_4$  等的排放量也是相当可观。其余污染物含量较少可忽略不计。

通过分析可以发现,气体排放物的来源 WESP 的运行阶段占大部分。 $\text{CO}_2$  排放来自于 WESP 运行阶段的占 69.57%,其次是原料生产阶段(30.26%)和运输阶段(0.17%); $\text{SO}_2$  来自 WESP 运行阶段的占 90.84%,其次是原料生产阶段占 9.16%; $\text{NO}_x$  来自 WESP 运行阶段的占 97.81%,其次是原料运输阶段占 2.19%;烟尘来自 WESP 运行阶段的占 84.27%,其次是原料生产阶段(15.39%)和原料运输阶段(0.34%)。同时, COD 来自 WESP 运行阶段的占 99.36%,其次来自于原料生产阶段占 0.64%。CO、HC 全部来自原料运输阶段, $\text{CH}_4$  则全部来自 WESP 运行阶段。

对比 WESP 装置深度净化和未经深度净化直接向外界排放两种情况,在制作、运输、运行阶段多排放了  $8.96\text{E}+07\text{ kg CO}_2$ 、 $1.30\text{E}+05\text{ kg NO}_x$ 、 $6.38\text{E}+05\text{ kg COD}$ 、 $3.88\text{E}+03\text{ kg CO}$ 、 $1.14\text{E}+03\text{ kg HC}$  和  $2.82\text{E}+04\text{ kg CH}_4$ 。

考虑 WESP 运行后,对于燃煤电厂大气污染物的削减,结合表 2 的污染物排放情况,按照电厂及 WESP 寿命 30 计算得到,经 WESP 装置深度净化后减少了  $5.17\text{E}+06\text{ kg}$  烟尘、 $3.34\text{E}+06\text{ kg SO}_2$ 、 $4.82\text{E}+06\text{ kg SO}_3$ 、 $3.91\text{E}+06\text{ kg CaSO}_4$  和  $6.27\text{E}+02\text{ kg}$  汞。

#### 4. 生命周期环境影响评估

在获得 WESP 全生命周期各主要环节的能源消耗和污染物排放清单的基础上,围绕温室气体排放、酸化、富营养化、光化学臭氧合成和粉尘 5 个方面进行全生命周期评价。影响评价就是对清单分析阶段得出的环境压力(环境干扰因子)进行评价的一个技术过程,主要流程依次为清单结果分析、影响潜值计算、数据标准化、加权评估,最后得到影响指数[8] [20] [24]。

清单分析的结果表达了 WESP 工艺过程中各种输入和输出的相对值大小,但数值大并不一定表示其对环境的影响大。因为不同的排放因子对生态系统和环境变化的贡献是不同的,所以在生命周期评价的过程中,需要将清单分析的结果转化为容易理解,能够反映环境影响潜值的指标。

根据评价方法,基于 AGP 模型(Assessment for Green Products)对我国产品进行全生命周期评价是比较通常的做法[25],得到的评价结果如表 7 所示。

各种环境影响潜值经加权后具有了可比性,也反映出其在整个环境影响中的比重。该厂 WESP 项目的环境负影响指数为  $4.55\text{E}+04\text{ kg}$ ,各环境影响类型对环境指数的贡献率见图 2。

通过图 2 可以看出,在 WESP 项目中对环境的主要影响因素为粉尘,其次为全球变暖、酸化、富营养化对环境的影响,光化学臭氧合成的影响微乎其微。地区性影响最大,全球性影响次之,区域性影响最弱。同时,结合表 6 再一次说明 WESP 装置运行阶段对环境的影响最大,占几乎富营养化的全部、粉尘、酸化的绝大部分、全球变暖的大部分。

WESP 装置全生命周期深度净化对大气污染物减排产生的环境正影响指数为  $8.52\text{E}+05\text{ kg}$ ,造成的环境负影响指数为  $4.55\text{E}+04\text{ kg}$ ,相比仅占其 5.34%。具体见表 8。

#### 5. 结论

通过对某电厂 WESP 项目的全生命周期评价研究,得出如下结论:



**Table 7. Environmental impact assessment result of WESP LCA (unit: kg)**  
**表 7. WESP 全过程环境影响评估结果 单位: kg**

项目	影响类型	参数类型	特征化因子	排放量	环境影响因子	环境影响潜值	基准值	标准化值/ 人当量	权重	加权评估/ 人当量	总环境影响 潜值/人当量
原料 生产	全球变暖	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	2.71E+07	1	2.71E+07	8700	3.11E+03	0.83	2.59E+03	4.40E+03
	酸化	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	1.20E+04	1	1.20E+04	35	3.43E+02	0.73	2.50E+02	
		NH <sub>3</sub>		2.31E-02	1.88						
	富营养化	COD	NO <sub>3</sub>	4.08E+03	0.23	9.38E+02	59	1.59E+01	0.73	1.16E+01	
		NH <sub>3</sub>		2.31E-02	3.64						
粉尘	烟尘	烟尘	3.76E+03	1	4.58E+04	18	2.54E+03	0.61	1.55E+03		
	SO <sub>2</sub>		1.20E+04	3.5							
原料 运输	全球变暖	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	1.47E+05	1	1.55E+05	8700	1.78E+01	0.83	1.48E+01	4.54E+02
	酸化	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	2.84E+03	0.7	1.99E+03	35	5.68E+01	0.73	4.15E+01	
		NO <sub>x</sub>	NO <sub>3</sub>	2.84E+03	1.35	3.83E+03	59	6.50E+01	0.73	4.74E+01	
	光化学臭氧合成	CO	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.88E+03	0.03	1.16E+02	0.64	1.82E+02	0.51	9.28E+01	
	粉尘	烟尘	烟尘	8.28E+01	1	7.61E+03	18	4.23E+02	0.61	2.58E+02	
NO <sub>x</sub>			2.84E+03	2.65							
WESP 运行	全球变暖	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	2.82E+04	25	6.30E+07	8700	7.24E+03	0.83	6.01E+03	4.06E+04
	酸化	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	1.27E+05	0.7	2.08E+05	35	5.94E+03	0.73	4.34E+03	
		SO <sub>2</sub>		1.19E+05	1						
	富营养化	COD	NO <sub>3</sub>	6.34E+05	0.23	3.17E+05	59	5.38E+03	0.73	3.93E+03	
		NO <sub>x</sub>		1.27E+05	1.35						
光化学臭氧合成	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.82E+04	0.007	1.97E+02	0.64	3.08E+02	0.51	1.57E+02		
WESP 深度 净化	粉尘	烟尘	烟尘	2.06E+04	1	7.74E+05	18	4.30E+04	0.61	2.62E+04	8.52E+05
		SO <sub>2</sub>		1.19E+05	3.5						
	NO <sub>x</sub>		1.27E+05	2.65							
	酸化	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	3.34E+06	1	5.08E+06	35	1.45E+05	0.73	1.06E+05	
		SO <sub>3</sub>		4.82E+06	0.36						
粉尘	SO <sub>2</sub>	烟尘	5.17E+06	1	2.20E+07	18	1.22E+06	0.61	7.46E+05		
		SO <sub>3</sub>	4.82E+06	1.07							

注：人当量表示标准人当量基准，采用 1990 年全球排放和人口来计算影响基准。

**Table 8. Income and expense comparison about environmental impact assessment of WESP project**  
**表 8. WESP 项目环境影响评价收支对比**

项目	WESP 全生命周期造成的环境负影响 指数(kg)	WESP 深度净化产生的环境正 影响指数(kg)	环境效益
粉尘	2.80E+04	7.46E+05	+7.18E+05
光化学臭氧合成	2.50E+02	/	-2.50E+02
富营养化	3.98E+03	/	-3.98E+03
酸化	4.63E+03	1.06E+05	+1.01E+05
全球变暖	8.60E+03	/	-8.60E+03
总环境影响指数	4.55E+04	8.52E+05	+8.06E+05

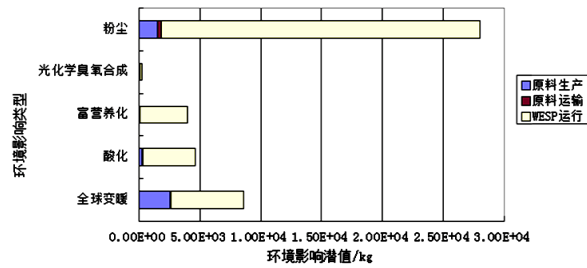


Figure 2. Type analysis on all environmental impact of WESP LCA

图 2. WESP 项目生命周期影响各环境影响类型分析

- 1) WESP 装置运行后的能源消耗和污染物排放均占主要部分，主要是 WESP 装置运行阶段大量的电力消耗。
- 2) WESP 项目原料生产阶段的能源消耗和污染物排放相对较高，运输阶段贡献最小。
- 3) WESP 全生命周期造成的环境负影响指数为  $4.55E+04$  kg，远低于其深度净化产生的由于对大气污染物消减而产生的环境正影响指数  $8.52E+05$  kg，对环境有明显的改善作用。
- 4) WESP 项目可大大减少地区性及区域性的环境影响，对全球性的环境影响增加有限。从环境效益上讲，燃煤电厂采用 WESP 装置深度净化是可行的。

## 基金项目

环保部 2015 年度污染减排技术政策专项(2015A009)；中国工程院清洁生产研究项目(HK2015100)。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈东 (2014) 治霾新途径: 能源结构调整与发展清洁能源. *生态经济*, **30**, 10-13.
- [2] 陈健鹏, 李佐军 (2013) 中国大气污染治理形势与存在问题及若干政策建议. *发展研究*, **10**, 4-14.
- [3] 刘鹤忠, 陶秋根 (2012) 湿式电除尘器在工程中的应用. *电力勘察设计*, **2**, 21-23.
- [4] Consoli, F., Allen, D., Bousted, I., et al. (1993) Guidelines for life-cycle assessment, a code of practice. STEAC, Pensacola.
- [5] 樊庆铤, 敖红光, 孟超 (2007) 生命周期评价. *环境科学与管理*, **32**, 177-180.
- [6] 赵志全, 王峰, 赵宁, 等 (2014) 生命周期评价在我国乙烯行业环境评估中的应用. *环境科学学报*, **34**, 3200-3206.
- [7] 谢小天, 孙荃, 张培栋, 等 (2015) 城市生活垃圾处理方式生命周期评价的比较研究. *环境污染与防治*, **37**, 106-110.
- [8] 谢明辉, 阮久莉, 白璐, 等 (2015) 太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价. *环境科学研究*, **28**, 291-296.
- [9] 彭小瑜, 吴喜慧, 吴发启, 等 (2015) 陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价. *农业环境科学学报*, **34**, 809-816.
- [10] 刘聚明, 王志伟 (2014) 内蒙地区燃煤电厂生命周期温室气体排放分析. *环境与发展*, **26**, 60-63.
- [11] 王红 (2012) 燃煤电厂烟气脱硫工艺生命周期评估. 硕士论文, 浙江大学, 杭州.
- [12] 梁增英, 马晓茜 (2009) 选择性催化还原烟气脱硝技术的生命周期评价. *中国电力工程学报*, **17**, 63-69.
- [13] 李彩亭, 曾光明, 杨霞, 邱慧 (2000) 燃煤烟气湿式除尘脱硫技术研究. *环境工程*, **4**, 32-34.
- [14] 华建平 (2014) 燃煤电厂湿式电除尘器应用情况介绍及建议. *中国环保产业*, **9**, 27-30.
- [15] 《氯碱工业污染物排放标准》(征求意见稿)编制说明.
- [16] 国务院 《节能减排“十二五”规划》.
- [17] 郁红 (2014) 烧碱能耗“十二五”指标如何达到? *化工管理*, **7**, 22-24.



- [18] 杨晓东, 张玲, 姜德旺, 刘锟 (2014) 钢铁工业废气及 PM2.5 排放特性与污染控制对策. 2014 京津冀钢铁工业清洁生产、环境保护交流会.
- [19] <http://www.chinaisa.org.cn/gxportal/login.jsp>
- [20] 邹志平, 马晓茜, 赵增力, 李海滨, 陈勇 (2004) 水力发电工程的生命周期分析. *水力发电*, **4**, 53-55.
- [21] 周新军 (2010) 交通运输业能耗现状及未来走势分析. *中外能源*, **7**, 9-18.
- [22] 欧阳斌, 凤振华, 李忠奎, 毕清华, 周艾燕 (2015) 交通运输能耗与碳排放测算评价方法及应用——以江苏省为例. *软科学*, **1**, 139-144.
- [23] 《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008).
- [24] 陈昱萌, 马晓茜, 吴婕, 陈新恩 (2013) 基于生命周期影响评价法的船舶垃圾处理工艺分析. *环境污染与防治*, **11**, 98-102.
- [25] 杨建新, 徐成, 王如松 (2002) 产品生命周期评价方法及应用. 气象出版社, 北京.