

文章编号: 1003-9015(2016)03-0700-09

基于燃煤烟气污染物深度处理的电厂系统生命周期评价

张莉¹, 王俏丽², 潘淑萍³, 李素静², 李伟^{1,2}

(1. 浙江大学环境工程研究所, 浙江杭州 310058; 2. 浙江大学工业生态与环境研究所, 浙江杭州 310027; 3. 浙江省环境监测中心, 浙江杭州 310015)

摘要: 利用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法分析燃煤烟气污染物深度处理下的超超临界(ultra-super critical, USC)典型发电厂系统不同生产子过程的环境影响。建立清单时, 将污染物排放追溯到直接排放的子过程中, 而输入负数表示各烟气处理单元污染物的去除。分别应用 Eco-indicator 99 和 IPCC GWP 100a 方法评价系统的环境综合影响和气候变化影响。结果表明, 电厂对环境影响最大的为气候变化, 温室气体(greenhouse gas, GHG)排放因子为 $0.786 \text{ kg CO}_2\text{-eq}(\text{kWh})^{-1}$, 其中 99.9% 来自燃煤的直接排放。烟气处理单元的脱硝装置、除尘装置和脱硫装置分别减少电厂对环境 3.5%、83.0% 和 6.5% 的综合损害作用, 但对气候变化仅有少量的损害影响。敏感性分析表明厂用电和煤耗与评价结果基本呈正比关系, 且两者敏感性相当。烟气处理单元对 LCA 结果呈现负相关的影响, 一般处理下的 3 个烟气处理单元分别高出深度处理效率下的烟气处理单元 19.5%、3.7% 和 7.1% 的环境影响。案例电厂不仅在环境方面具有竞争性, 而且在经济成本方面也具有一定优势。

关键词: 燃煤电厂; 生命周期评价; 烟气; 深度处理; 温室气体

中图分类号: X 32; X 24

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1003-9015.2016.03.029

Life Cycle Assessment of Power Plants with Coal-Fire Flue Gas Advanced Treatments

ZHANG Li¹, WANG Qiao-li², PAN Shu-ping³, LI Su-jing², LI Wei^{1,2}

(1. Institute of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Industrial Ecology and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang Province Environmental Monitoring, Hangzhou 310015, China)

Abstract: A typical case of an ultra-super critical (USC) power plant with flue gas advanced treatments was studied by a life cycle assessment (LCA) method to analyze its environmental impact. Emission data were traced back to where the flue gas was directly released when setting up LCA inventory, and the input data of removed waste gas were set as negative. Eco-indicator 99 and IPCC GWP 100a were chosen to evaluate the environmental impact and greenhouse gas (GHG) emission. The results show that climate change is the dominant factor with the life cycle GHG emission factor of $0.786 \text{ kg CO}_2\text{-eq}(\text{kWh})^{-1}$. 99.9% of the damage on climate change comes from direct CO_2 emission in the burning unit. Denitration, dedusting and desulfurization devices can reduce environmental impact by 3.5%, 83.0% and 6.5%, respectively, and they have little damage on climate change. Sensitive analysis results indicate that auxiliary power and coal consumption are proportional to environmental impact with equivalent sensitivity. The removal efficiency has negative correlation to LCA results in flue gas treatment units. In addition, comparing to the advanced flue gas treatment technologies, the three general treatment units have higher environmental damage of 19.5%, 3.7% and 7.1%, respectively. This power plant shows competitiveness in both environmental and economic aspects.

Key words: coal-fired power plant; life cycle assessment; flue gas; advanced treatment; greenhouse gas

收稿日期: 2015-12-09; 修订日期: 2016-01-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (21476203)。

作者简介: 张莉(1977-), 女, 浙江温州人, 浙江大学博士生。通讯联系人: 李伟, E-mail: w_li@zju.edu.cn

1 前言

煤炭作为我国主要的一次能源，是我国社会经济发展的主要动力，尤其在电力行业中占主导地位^[1]。但煤炭的使用也带来了一系列的环境问题，CO₂^[2]、NO_x^[3]、SO₂、烟气等^[4]的排放严重影响着大气环境质量。目前燃煤发电技术的研究主要集中于超超临界(Ultra-Super Critical, USC)发电技术、循环流化床发电技术、煤气化发电技术、氧燃料燃烧技术^[5]等。其中，USC发电技术是目前投入运行最为先进的技术，全厂热效率可达45%以上^[6]。但其生产过程仍会产生大量污染物，因此污染物的处理成为了大气污染减排的关键。

为有效减少电厂大气污染物的排放，我国于2011年进一步更新了2003年提出的《火电厂大气污染物排放标准》^[7]。深度处理技术在一般的处理效率下进一步深化处理^[8]，然而，由于当前的电厂并没有对排放的CO₂进行捕集，深度处理技术虽然降低了其他污染物的直接排放，同时却增加了一定的能耗，因此深度处理技术会在一定程度上增加系统全生命的温室气体排放。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)技术^[9]通过对系统进行物质、能量的输入和输出汇编整理后作出综合的评价，能够更真实、更准确地反映系统对环境的影响，是目前应用最广泛的环境评价手段，也是电力行业环境评价应用最广泛的方法^[10]。

现有研究中，学者大多着眼于电厂整体^[11,12]，这可以很好地把握系统整体对环境的影响。仅有少部分学者研究电厂不同阶段对环境的影响^[13]，虽然需要花费更多的精力，却能够全面掌握不同阶段具体的排放状况。本文选取了目前国内典型USC电厂的烟气深度处理技术为研究对象，应用LCA方法评价案例中各个操作单元的环境影响，并且在执行LCA过程中，把废弃物排放回归到真正的生产单元，来保证生产单元和环保单元对环境影响的真实性。重点分析系统在深度处理技术下对环境整体和温室气体排放的影响，辨别深度处理技术到底能否真正带来更好的环境效益。最后通过对影响因素的敏感性分析评价影响环境的关键因素，判定深度处理技术在全生命周期的角度下如何能更有效地改善电厂系统的环境影响。

2 研究目标和范围

2.1 研究目标

利用国内现有典型大型燃煤USC机组电厂实际运行的调查，结合燃煤烟气深度处理平均处理水平，确定深度处理选用低氮燃烧联合SCR脱硝技术、三室五电场除尘技术和强化石灰石-石膏法脱硫技术^[14]，NO_x、烟尘和SO₂处理后排放的最大浓度分别为37、17和60 mg·m⁻³，均低于《火电厂大气污染物排放标准》的限值，甚至已接近燃气锅炉的排放限值^[7](NO_x: 100 mg·m⁻³；烟尘: 5 mg·m⁻³；SO₂: 35 mg·m⁻³)。综合评价该系统对资源消耗、气候变化等环境类型的影响，重点评价对温室效应潜势的影响。并评价不同因素对LCA结果的敏感度，以此分析系统关键影响因素。

2.2 研究范围

选取某2×1000 MW超超临界燃煤发电机组，锅炉的额定功率为2×2912.8 t·h⁻¹。电厂生产及三废处理流程如图1所示，功能单位设定为1 kWh电力。红色虚线边框范围为研究系统边界，包括原材料的获取、运输、生产过程、废弃物处理或排放过程。本次LCA以工艺系统为评价重点，因此不包括产品——电力的使用以及电厂退役后的处置过程。将系统划分为电厂的建造阶段和运行阶段，其中运行阶段又可分为燃烧发电单元和烟气处理单元，而烟气处理单元又包括脱硝装置、除尘装置和脱硫装置，为方便LCA执行过程，将建造阶段、燃烧发电单元、脱硝装置、除尘装置和脱硫装置同样以子过程的形式同时研究，分别以蓝色虚线边框界定。

全厂产生的固废包括灰渣、石膏、失活催化剂等，灰渣去除应用灰渣分除系统收集，主要用于生产水泥、混凝土和制砖；吸收塔排出的石膏浆液经浓缩脱水后被综合利用生产石膏制品或做水泥缓凝剂^[15]；来自脱硝过程的催化剂送至拥有资质的公司进行再生。废水主要包括酸碱废水、脱硫废水、含煤污水和含油污水，分别处理后全部回收，用于煤场喷淋、厂区绿化、输煤系统用水、循环泵冷却等。一方面，电厂固废和废水均被再利用；另一方面，电厂固废和废水再利用数据收集有所缺失，且电厂深度处理尤其对废气的深度处理，因此确定系统边界不包括固废和废水的再利用过程。

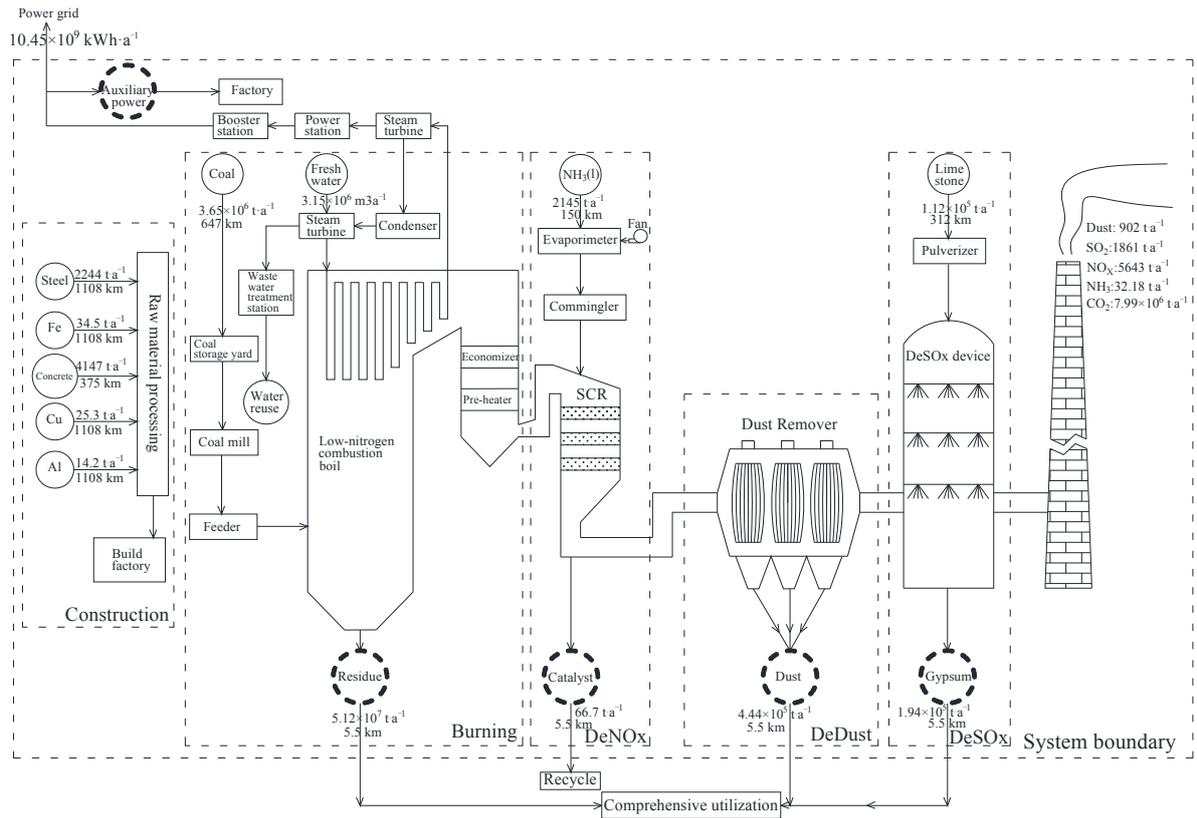


图1 电厂系统边界

Fig.1 System boundary of power plant

3 建立清单

3.1 清单来源

建设阶段的资源和能源的消耗数据较难获得,且建设所用为一次性投入,因此,一般在执行LCA时,认为系统建设以及所需设备的制造过程相对产品的生产阶段,其环境影响极小^[16]。本研究系统仅包括用量较大的几种原材料消耗及其运输过程的数据。原材料的运输参考中国统计年鉴的统计数据^[17],数据清单见表1。所用原材料基本通过铁路和公路运输。据年鉴,我国货运中铁路和公路运距比例约为4:1^[17],计算材料运距均以80%铁路和20%公路分配。

燃烧发电单元包括煤的运输与进料、锅炉燃烧、省煤器、废水处理与回用、煤渣的运输等。据统计,我国煤的平均运距为647 km^[17],同样以80%铁路和20%公路的分配计算。案例电厂平均每年消耗煤的量为393.2万吨。

以实际收到的燃料煤为基准,电厂实际用煤的特性如表2所示。根据生产实际,电厂每年消耗淡水量315万m³。产生煤渣量为5119万t·a⁻¹,

表1 电厂建造阶段数据清单

Raw material	Consumption / t ^[18]	Classification	Distance / km	Road / km	Railway / km
Al	255	Steel and nonferrous metals	1108	221.6	886.4
Cr	122				
Cu	454				
Mn	112				
Steel	40293				
Concrete	74257	Cement	375	75	300

表2 煤的特性分析

Elemental analysis			Proximate analysis		
Component	Symbol	Ratio / %	Component	Symbol	Ratio / %
C	C _{ar}	63.58	Air-drying basis water	M _{ad}	1.78
H	H _{ar}	4.05	Dry ash-free basis volatile	V _{daf}	32.54
O	O _{ar}	8.99	Ash	A _{ar}	13.16
N	N _{ar}	0.81	Total moisture	M _{t,ar}	8.5
S	S _{ar}	0.91	lower heating value	Q _{net,ar} / kJ·kg ⁻¹	24898
Ash	A _{ar}	13.16			

外运为公路运输 5.5 km。

根据电厂实际排放量及各个处理单元的处理效率，结合电厂环境影响报告和环境监测报告，确定燃烧阶段的实际排放，其中，烟尘为 47 万吨，SO₂ 为 7.23 万吨，NO_x 为 2.82 万吨。CO₂ 的排放量利用式(1)^[19] 计算可得为 798.8 万吨。

$$E = 3.67FQka \quad (1)$$

式中： E 表示 CO₂ 排放量； F 表示燃料消耗量； Q 表示燃料热值； k 表示燃料的碳排放因子，这里 $k = 0.0247 \text{ kg}\cdot\text{C}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ； a 表示碳氧化系数，这里 $a = 0.9$ 。

脱硝装置选用氨作为还原剂，脱硝效率 80%。除尘装置效率为 99.6%，脱硫装置除尘效率为 50%，合计除尘效率为 99.8%。脱硫装置效率为 97.4%。电厂三个燃煤烟气处理阶段的物质消耗数据清单如表 3 所示。其中，由于石灰石实际来源较为复杂，不确定性大，此处石灰石的运距综合实际调查数据和统计数据最终确定运距。

表 3 电厂烟气处理流程数据清单

Table 3 Inventory in flue gas treatment process of the power plant

Unit	Input / Output	Consumption / t	Data source	Distance / km	Road / km	Railway / km
DeNO _x	Liquid NH ₃	2145.0	Field survey	150.0	150.0	0
	Catalyst	66.7	Field survey	5.5	5.5	0
DeDust	Dust	444300.0	Field survey	5.5	5.5	0
DeSO _x	Limestone	112200.0	Statistical data ^[17]	303.0	60.6	242.4
	Gypsum	193600.0	Field survey	5.5	5.5	0

3.2 清单计算

根据电厂统计，发电厂的厂用电率为 5%，该电耗以抵消发电量的形式计算，即电厂的净发电容量为 1900 MW。以每年运行 5500 小时计算，每年净发电量为 1.045×10^{10} kWh。电厂的使用年限为 30 年^[20]，则服役年限内的净发电量为 3.135×10^{11} kWh。各个输入输出项的背景数据均来自于 Ecoinvent 数据库。清单如表 4 所示。

表 4 电厂基于功能单位的输入或输出数据清单

Table 4 Inventory of input/output data of the power plant based on functional units

Process	Item	Input / Output	Unit	Value	Process	Item	Input / Output	Unit	Value
Construction phase	Al	I	g·(kWh) ⁻¹	8.13×10^{-4}	Burning unit	Coal	I	g·(kWh) ⁻¹	376.30
	Cr	I	g·(kWh) ⁻¹	3.89×10^{-4}		Water	I	g·(kWh) ⁻¹	301.00
	Cu	I	g·(kWh) ⁻¹	1.45×10^{-3}		Railway	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	194.77
	Mn	I	g·(kWh) ⁻¹	3.57×10^{-4}		Road	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	75.64
	Steel	I	g·(kWh) ⁻¹	0.13		Dust	O	g·(kWh) ⁻¹	45.00
	Concrete	I	g·(kWh) ⁻¹	0.24		SO ₂	O	g·(kWh) ⁻¹	6.92
	Railway	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	0.19		NO _x	O	g·(kWh) ⁻¹	2.70
Road	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	0.047	CO ₂	O	g·(kWh) ⁻¹	764.00		
DeNO _x device	Liquid NH ₃	I	g·(kWh) ⁻¹	0.21	DeSO _x device	Limestone	I	g·(kWh) ⁻¹	10.70
	Road	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	0.03		Railway	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	2.60
	NO _x	O	g·(kWh) ⁻¹	-2.16		Road	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	0.65
DeDust device	NH ₃	O	g·(kWh) ⁻¹	0.0031	SO ₂	O	g·(kWh) ⁻¹	-6.74	
	Road	I	kg·km·(kWh) ⁻¹	0.23	Dust	O	g·(kWh) ⁻¹	-0.09	
DeDust device	Dust	O	g·(kWh) ⁻¹	-44.82					

Note: I: Input, O: Output

4 生命周期影响评价

4.1 影响评价

Eco-indicator 计算方法^[21]是目前被广泛应用的数据库之一，它可以评价致癌物(Ca)、有机物对呼吸系统的损害(RO)、无机物对呼吸系统的损害(RI)等 11 种环境影响类型，以及以下 3 种损害类型：人体健康(Human Health)包括气候变化(CC)、电离辐射(Ra)、臭氧层消耗(OL)、Ca、RO 以及 RI；生态质量(Ecosystem Quality)包括土地利用(LU)、酸化/富营养化(Ac/Eu)以及生态毒性(ET)；而资源损耗(Resources)则包括矿物质(Mi)和化石燃料(FF)的消耗。以上环境影响方面通过 Eco-indicator 计算方法进行特征化和标准化处理

后,以生态指数因子(Point)表示系统对环境的综合影响,单位为Pt,正数表示对该环境类型有负面影响,负数则表示对该环境类型有利^[22]。

图2所示为影响类型评价结果,图中数字表示在电厂生命周期中对11种影响类型的综合影响大小。电厂对11种影响类型都有一定的负面影响,其中对气候变化影响最大,化石燃料消耗影响次之,再次为无机物对呼吸系统的损害,而对其他类型的影响较小。燃烧发电单元是气候变化和化石燃料消耗的主要来源。值得关注的是,由于清单数据处理时,将排放回归到真正的排放子过程,并根据实际情况以负数的形式表示污染物的去除,从而在无机物对呼吸系统的损害方面,不同于过程内部表现出大增大减的情况。由此可知,本次执行LCA的清单处理手段能够更准确地体现生产实际。3个处理装置后共减少了燃烧发电单元产生RI的98.6%。通过不同处理单元减少RI的程度可知,燃烧发电单元对环境影响最大的是烟尘排放。

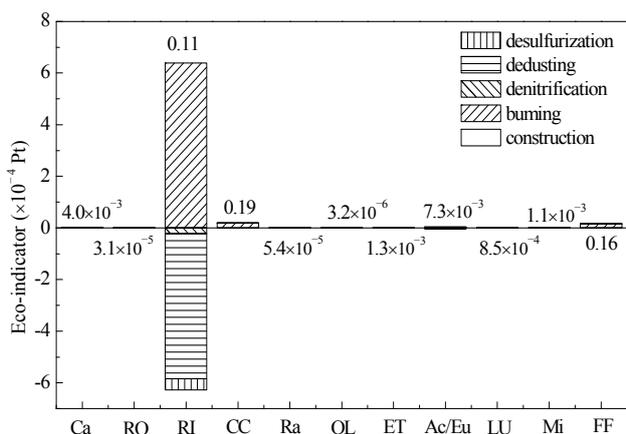


图2 电厂环境影响类型

Fig.2 Environmental impact of the power plant

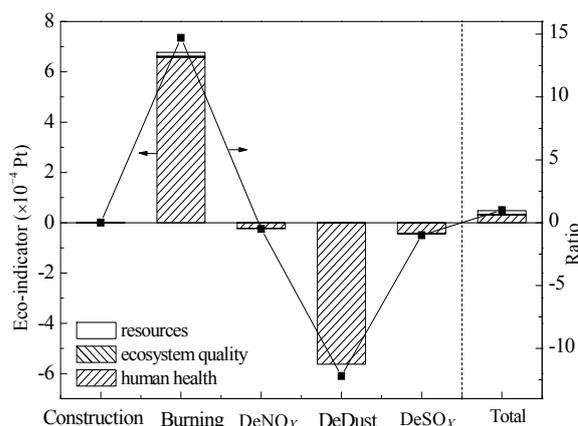


图3 电厂不同阶段损害类型影响

Fig.3 Damage categories of different phases

电厂不同阶段对环境损害类型的影响如图3所示,电厂对3种损害类型都有负面影响,对人体健康损害最大,其次为资源消耗。在电厂生命周期的不同阶段,建造阶段对环境的综合影响为 1.7×10^{-7} Pt,仅占整个系统的0.004。与设定LCA目标和边界时的判断一致,因此本次对建造阶段的处理是合理的。运行阶段对环境的综合影响为 4.8×10^{-5} Pt。其中,燃烧发电单元几乎占据了整个系统所有的不利影响,综合影响为 6.8×10^{-4} Pt,占比为14.7。而烟气处理单元的3个装置均减少了系统对环境整体的损害作用,综合影响为 -6.4×10^{-4} Pt,占比为-13.7。脱硝装置、除尘装置和脱硫装置分别减少了3.5%、83.0%和6.5%。

综合电力系统的影响,电厂的动力来源即是煤的燃烧,但目前鲜有电厂配备CO₂捕集设备,煤燃烧排放的CO₂将完全释放进入大气,导致电厂对环境最大的损害是对气候变化的影响。煤是能源利用中对气候变化影响最大的能源^[23],即使目前工业应用中最先进的USC机组,排放的CO₂依旧十分可观。在未来的节能减排工作中,能源结构的调整必将成为重中之重。案例电厂系统燃煤的直接排放对环境损害最大的是烟尘的排放,其次是SO₂的排放,NO_x和CO₂的排放紧随其后。

4.2 温室效应潜值评价

IPCC GWP 100a 计算方法是研究温室效应潜值最常用的方法,不同的温室气体以相应的转化因子归一为CO₂,以二氧化碳当量(kg CO₂-eq·(kWh)⁻¹)的形式表示。表5汇总了各个子过程对气候变化的影响。整个电厂生命周期二氧化碳排放因子为 $0.786 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot (\text{kWh})^{-1}$,我国燃煤电厂的平均二氧化碳排放因子为 $1.084 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ^[2]。USC

技术提高了燃煤利用效率而有效控制了温室气体的排放。将近99.9%的温室气体排放来自于燃烧发电单

表5 电厂不同子过程对气候变化的影响

Table 5 Impact on climate change of different sub-processes

Total	Operation phase				
	Construction phase	Burning unit	Flue gas treatment unit		
			DeNO _x device	DeDust device	DeSO _x device
0.786	2.91×10^{-4}	0.785	4.45×10^{-4}	3.80×10^{-5}	2.66×10^{-4}

Unit: kg CO₂-eq·(kWh)⁻¹

元，即煤燃烧的直接二氧化碳排放。烟气处理单元虽然去除了大量有害气体，但并不能在气候变化方面起到改善的作用，反而有所损害。但由于设备用电以厂用电的形式减少电厂电力输出总额，而没有在各阶段分配相应的电力消耗，因此 3 个处理单元表现出对气候变化的影响极小，烟气处理单元对气候变化的总排放因子为 $7.49 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ，仅占电厂总排放的 0.1%。

4.3 敏感性分析

LCA 结果会随着清单数据的改变而改变。本研究系统中，针对厂用电(AP)、煤耗(CCO)、脱硝效率(DN)、除尘效率(DD)和脱硫效率(DS)进行敏感性分析。在厂用电为 5% 的基础上上下浮动取值 7% 和 3%，计算清单并获得影响评价结果。煤耗则在原来用煤量的基础上增减 10% 取值计算。又因本系统对燃煤烟气污染物进行深度处理，深度处理在减少废弃物的同时，所消耗的物质和能量也在增加。因此，选择脱硝效率和脱硫效率分别为 50% 和 90%，选择除尘效率为 99.0% 且脱硫阶段的除尘效率不变进行清单数据计算，获得一般处理技术下的环境影响评价结果和气候变化影响评价结果，以此评价处理效率对结果的敏感性。因单一变量变化引起的其他因子的改变相应改变，评价清单见表 6。敏感性分析结果如图 4 所示。

表 6 敏感性分析清单汇总表

Table 6 Inventory of sensitive analysis

Process	Item	Unit	Original value	AP = %	AP = 3%	CCO +10%	CCO -10%	DN = 50%	DD = 99.0%	DS = 90%	
Construction phase	Al	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	8.13×10^{-4}	8.31×10^{-4}	7.97×10^{-4}	8.13×10^{-4}					
	Cr	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	3.89×10^{-4}	3.98×10^{-4}	3.81×10^{-4}	3.89×10^{-4}					
	Cu	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	1.45×10^{-3}	1.48×10^{-3}	1.42×10^{-3}	1.45×10^{-3}					
	Mn	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	3.57×10^{-4}	3.65×10^{-4}	3.50×10^{-4}	3.57×10^{-4}					
	Steel	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	
	Concrete	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	
	Railway	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
	Road	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.047	0.048	0.046	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	
	Coal	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	376.30	384.40	368.54	413.93	338.67	376.30	376.30	376.30	
	Water	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	301.00	307.50	294.79	301.00	301.00	301.00	301.00	301.00	
Burning unit	Railway	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	194.77	198.96	190.76	214.25	175.30	194.77	194.77	194.77	
	Road	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	75.64	77.27	74.08	83.20	68.08	75.64	75.64	75.64	
	Dust	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	45.00	45.97	44.07	49.50	40.50	45.00	45.00	45.00	
	SO ₂	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	6.92	7.07	6.78	7.62	6.23	6.92	6.92	6.92	
	NO _x	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	2.70	2.76	2.64	2.97	2.43	2.70	2.70	2.70	
	CO ₂	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	764.00	780.43	748.25	840.40	687.60	764.00	764.00	764.00	
	Liquid NH ₃	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21	0.14	0.21	0.21	
	DeNO _x device	Road	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.03	0.03	0.029	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
		NO _x	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	-2.16	-2.21	-2.12	-2.38	-1.94	-1.35	-2.16	-2.16
		NH ₃	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.0031	0.0032	0.0030	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
DeDust device	Road	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	
	Dust	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	-44.82	-45.78	-43.90	-49.30	-40.34	-44.82	-44.55	-44.82	
DeSO _x device	Limestone	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	10.70	10.93	10.47	11.78	9.64	10.70	10.70	9.90	
	Railway	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	2.60	2.65	2.55	2.86	2.34	2.60	2.60	2.40	
	Road	$\text{kg} \cdot \text{km} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	0.65	0.66	0.64	0.72	0.59	0.65	0.65	0.60	
	SO ₂	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	-6.74	-6.89	-6.604	-7.42	-6.07	-6.74	-6.74	-6.23	
	Dust	$\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$	-0.09	-0.09	-0.088	-0.099	-0.081	-0.09	-0.225	-0.09	

厂用电直接影响电厂净电量输出，从而改变单位发电量下能量和物质输入输出的量。当厂用电提高 2% 时，电厂对环境总的损害和对气候变化的损害分别提高 2.3% 和 2.2%；当厂用电减少 2% 时，电厂对环境总的损害和对气候变化的损害分别减少 2.2% 和 2.0%。当煤耗增加 10% 时，电厂对环境总的损害和对气候变化的损害均提高 10.0%；当煤耗减少 10% 时，电厂对环境总的损害和对气候变化的损害分别减少 11.2% 和 10.0%。

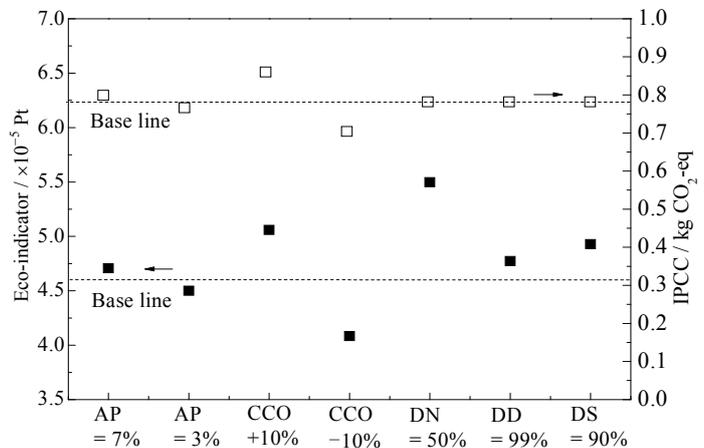


图 4 敏感性分析结果比较

Fig.4 Comparison of sensitivity analysis results

当电厂的脱硝效率仅为 50% 时, NO_x 的排放量增加, 虽然低效率的设备减少了部分物质能量的输入, 但并不足以抵消 NO_x 排放增加引起的环境损害, 对环境总的损害程度提高了 19.5%。此时, 脱硝装置减少燃烧过程产生的环境损害为 2.2%, 相比脱硝效率为 80% 的系统中, 脱硝装置减少燃烧过程产生的环境损害下降了 1.3%。另一方面, 对温室效应潜值却几乎没有影响。深度脱硝技术由增加催化剂层来实现, 几乎不会引起厂用电等其他敏感因素的变化。除尘效率仅为 99.0% 时, 电厂对环境总的损害程度提高了 3.7%。深度除尘应用三室五电场技术, 必然引起用电量的增加, 但是相比全电厂的用电量, 并不会对厂用电率造成明显变化。从温室效应潜值的角度, 除尘阶段本身对其影响占比极小, 在敏感性评价时也没有对除尘效率的变化而表现出明显的变化。因此, 除尘效率是电厂环境影响大小的关键因素。脱硫效率仅为 90% 时, 电厂对环境总的损害程度提高了 7.1%。此时, 脱硫装置减少燃烧过程产生的环境损害为 6.1%, 相比脱硫效率为 97.4% 的系统中, 脱硫装置减少燃烧发电单元产生的环境损害下降了 0.4%。而另一方面对温室效应潜值也表现出几乎没有变化。同时, 设备的耗电量增加对厂用电的影响可忽略。

当脱硝、除尘、脱硫装置的处理效率仅为 50%、90% 和 99.0% 时, 代表了燃煤电厂烟气处理设施的处理水平, 而本案例中 3 个单元的处理效率分别为 80%、99.8% 和 97.4%, 代表了烟气深度处理水平。比较而言, 深度处理可以降低燃烧发电流程产生的 93.2% 的环境损害, 而一般处理只能降低 90.9% 的环境损害。烟气深度处理技术能够明显减少电厂对环境的损害而几乎不引起温室效应潜值的变化。因此在改善环境综合影响同时可以有效控制对气候变化的影响。

4.4 成本分析

生命周期评价方法主要关注于产品或者系统对环境的影响, 而不涉及成本经济性的研究, 因此本研究仅采用估算的方法大致判断案例系统的经济性。根据案例电厂的调查, 案例系统本身发电成本为 $0.221 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 。当厂用电浮动时, 若仅考虑用量变化较大的煤和水的变化, 以市场平均价格计算, 相比厂用电为 5% 的案例时, 厂用电为 7% 和 3% 时分别将增加 $0.0037 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 和 $-0.0035 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$, 分别浮动 1.7% 和 -1.6%。

煤耗量的增减对经济成本的增减具有较为直观的表现, 煤耗的增加不仅增加了本身原料煤的成本, 还会引起运输成本的增加, 烟气污染物排放的增加等。且已有研究表明, USC 机组相比其它清洁燃煤技术具有更低的运行成本^[13]。

综合 3 个烟气处理装置的作用, 深度处理相对于一般处理引起了液氨用量、运输量、石灰石用量等的增加, 以及 NO_x 、烟尘和 SO_2 排放量的减少。根据市场平均价格计算物质能量的消耗增加了 $0.0013 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 的经济成本, 而利用污染物排放的当量值折算及排污费征收标准, 减少的污染物排放可以减少 $0.0015 \text{ 元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 的经济成本。由此可见, 深度处理在经济成本上并不会引起负担, 反而能够节约少量的成本, 当然, 真正减少成本的实现还需要依靠政策上对污染物排放征收政策的切实实施。对成本的精确计算还需要更多的数据和更多后续的研究。

5 结 论

案例选用 USC 机组, 标准煤耗为 $268.7 \text{ g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$, 我国 2012 年平均发电煤耗率为 $308.5 \text{ g} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ^[24], 案例的能源利用率处于全国先进水平。案例系统的生命周期温室气体排放因子为 $0.786 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot (\text{kWh})^{-1}$, 我国燃煤发电平均水平为 $1.084 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ^[2], 则在 GHG 控制上也处于全国先进水平。因此, 案例在实现更高的能源效率的同时, 减少了烟气污染物的排放, 控制了 GHG 的排放。对该系统进行生命周期评价, 得出以下结论:

(1) 电厂对不同环境影响类型都有一定的负面影响, 其中燃烧发电单元对环境的影响最大, 主要来自燃煤烟气污染物的排放, 尤其是烟尘的大量排放。而经过脱硝、除尘和脱硫 3 个烟气处理装置后, 电厂对环境的负面影响分别降低了 3.5%、83.0% 和 6.5%。

(2) 煤的燃烧产生大量 CO_2 , 燃烧发电流程是引起气候变化损害最主要的因素。烟气处理流程在去除

燃煤烟气污染物的同时也消耗其他物质和能量, 但因此引起对气候变化的影响极小。

(3) 厂用电和煤耗与评价结果基本呈正比关系, 且两者的敏感性相当。烟气处理流程对 LCA 结果呈现负相关的影响, 一般处理效率下脱硝装置、除尘装置和脱硫装置对环境总的损害分别提高了 19.5%, 3.7% 和 7.1%。而用电量的变化几乎不引起厂用电率的变化, 烟气处理效率对气候变化的敏感性不高。由此表明, 案例电厂系统在提高了燃煤效率, 减少了烟气污染物排放的同时, 很好的控制了 GHG 的排放。同时, 根据对电厂深度处理系统和一般处理系统经济成本的估算可知, 案例电厂不仅在环境方面具有竞争性, 而且在经济成本方面也具有一定的优势。

参考文献:

- [1] Chen G Q, Yang Q, Zhao Y H, *et al.* Nonrenewable energy cost and greenhouse gas emissions of a 1.5 MW solar power tower plant in China [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011, 15(4): 1961-1967.
- [2] ZHANG Li (张莉), WANG Qiao-li (王俏丽), LI Wei (李伟), *et al.* Scenario analysis on power sector greenhouse gas emission (电力行业温室气体排放情景分析) [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)** (浙江大学学报(工学版)), 2015, 49(12): 2244-2251.
- [3] Shi Y, Xia Y F, Lu B H, *et al.* Emission inventory and trends of NO_x for China, 2000-2020 [J]. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)**, 2014, 15(6): 454-464.
- [4] DI Xiang-hua (狄向华), NIE Zuo-ren (聂祚仁), ZUO Tie-yong (左铁镛). Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China (中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单) [J]. **China Environmental Science** (中国环境科学), 2005, 25(5): 632-635.
- [5] Shah M, Degenstein N, Zanfir M, *et al.* Near zero emissions oxy-combustion CO₂ purification technology [C]// 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Amsterdam: Energy Procedia, 2011, 4: 988-995.
- [6] Metz B, Davidson O, Coninck H, *et al.* IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [7] China: Ministry of Environmental Protection (中国: 环境保护部). Emission standard of air pollutants for thermal power plants (火电厂大气污染物排放标准): GB 13223-2011[S]. 2011.
- [8] WANG Jian-zhong (王建中), FENG Zhao-lin (冯肇霖). Introduction of coal-fired boiler flue gas advanced treatment technology (燃煤锅炉烟气深度处理技术介绍) [C]// Conference of power plant waste purification and energy saving technology 2012 (2012 火电厂污染物净化与节能技术研讨会). Wuxi (无锡): Chinese Society of Power Engineering (中国动力工程学会), 2012: 124-132.
- [9] ISO. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework: ISO 14040: 2006 [S]. Switzerland: The International Organization for Standardization, 2006.
- [10] Kim S, Dale B E. Life cycle inventory information of the united states electricity system [J]. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2005, 10(4): 294-304.
- [11] Odeh N A, Cockerill T T. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage [J]. **Energy Policy**, 2008, 36(1): 367-380.
- [12] Koornneef J, Keulen T, Faaij A, *et al.* Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂ [J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2008, 2(4): 448-467.
- [13] ZHOU Liang-liang (周亮亮). Assessment on whole life cycle of clean coal-fired power generation technology (清洁燃煤发电技术全生命周期评价) [D]. Chongqing (重庆): Chongqing University (重庆大学), 2011.
- [14] ZHU Jie (祝杰), WU Zhen-yuan (吴振元), YE Shi-chao (叶世超), *et al.* Modelling of wet limestone-gypsum flue gas desulfurization system in spray tower (石灰石-石膏湿法喷淋脱硫模型研究) [J]. **Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities** (高校化学工程学报), 2015(1): 220-225.
- [15] GUAN Xue-mao (管学茂), ZHANG Wen-yan (张文艳), YUAN Yun-fa (袁运法). Thermal treatment and study of flue gas desulphurization gypsum as retarder in cement (烟气脱硫石膏做水泥缓凝剂的研究) [J]. **Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)** (河南理工大学学报(自然科学版)), 2010, 29(2): 249-253.
- [16] Clauzade C, Osset P, Hugrel C, *et al.* Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres [J]. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2010, 15(9): 883-892.
- [17] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China (中国统计局), National statistics yearbook 2014 (国家统计局年鉴 2014 [R/OL]), (2014-09) [2015-10-16] <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexch.htm>
- [18] White S W, Kulcinski G L. Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants [J]. **Fusion Engineering and Design**, 2000, 48(248): 473-481.
- [19] Di X H, Nie Z R, Yuan B R, *et al.* Life cycle inventory for electricity generation in china [J]. **International Journal of Life Cycle**

- Assessment**, 2007, 12(4): 217-224.
- [20] LIU Zhao (刘朝), ZHOU Liang-liang (周亮亮), JIE Hui (解辉), *et al.* Assessment on life cycle of water-cooled and air-cooled ultra-super critical power generation technology (1000 MW 超超临界水冷和空冷机组生命周期评价) [J]. **Journal of Engineering Thermophysics** (工程热物理学报), 2012, 33(5): 748-752.
- [21] Yami T L, Du J, Brunson L R, *et al.* Life cycle assessment of adsorbents for fluoride removal from drinking water in East Africa [J]. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2015, 20(9): 1277-1286.
- [22] Li W, Wang Q L, Jin J J, *et al.* A life cycle assessment case study of ground rubber production from scrap tires [J]. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2014, 19(11): 1833-1842.
- [23] IPCC. Renewable energy sources and climate change mitigation. special report of the intergovernmental panel on climate change [R]. USA, 2012.
- [24] YANG Yong-ping (杨勇平), YANG Zhi-ping (杨志平), XU Gang (徐钢), *et al.* Situation and prospect of energy consumption for China's thermal power generation (中国火力发电能耗状况及展望) [J]. **Proceedings of the CSEE** (中国电机工程学报), 2013, 33(23): 1-11.