

文章编号:0254-0096(2015)04-0994-10

基于层次分析法的生物质直燃发电生命周期评价

卜寿珍, 肖军, 沈来宏, 陈露露

(东南大学能源与环境能源转换及其过程测控教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 利用生命周期评价(LCA)和层次分析法(AHP),从全球性、区域性、局地性视角分析生物质直燃发电(BCP)系统的环境影响,获得表征环境影响、资源消耗以及二者综合影响的评价指标,并与燃煤发电系统进行比较分析。结果表明:全球性视角下环境负荷最大;光化学污染是最主要的环境影响类型;生物质发电和生长阶段是环境影响最主要的两个阶段;当发电效率由15%提高到35%时,综合环境影响指标下降57%;与带脱硫脱硝装置的超超临界燃煤发电机组(USC-DeS-DeN)相比,发电效率为25%的BCP全球变暖降低87.18%,资源消耗指标降低60.7%,综合影响指标降低13.27%。

关键词: 生命周期评价;层次分析法;生物质直燃发电;综合影响

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引言

生物质直接燃烧发电是生物质能源利用最成熟、广泛的方式,可显著减少CO₂排放,但在其全生命周期中仍有其他污染物如SO₂、NO_x等的排放。本文采用LCA法对生物质直燃发电系统进行环境影响评价,对提高发电系统性能、降低环境负荷具有重要意义。国内外许多学者采用LCA方法对生物质转化利用进行了环境影响分析^[1-7]。基于LCA法,针对生物质发电系统,文献[3,6]分析了种植过程对评价结果的影响;刘俊伟等^[4]评价了该系统在减排温室气体方面的优势;S. M. Shafie等^[5]则评价了该系统各阶段对全球变暖影响的大小。但因不同污染物排放导致环境类型不同,为了评价各类环境负荷带来的综合影响,研究者们采用不同的数学方法确定其重要性权重^[7-10]。文献[3,6]利用目标距离法研究了生物质直燃发电的环境影响;文献[7,8]分别用多目标决策分析法和AHP评价了生物质柴油的环境影响;顾吉青^[9]利用货币法分析评价了生物质制取高品位液体燃料的环境影响;李娜^[10]利用模糊数学理论分析城市生活垃圾处理的环境影响。

本文采用LCA和AHP结合的方法,对生物质直燃发电系统进行环境影响和资源消耗的综合评价,并

与超超临界燃煤发电进行比较,为进一步提高生物质直燃发电的环境性能和综合性能提供理论参考。

1 评价方法

1.1 生命周期评价

生命周期评价(LCA)是一种评价产品从原材料收集、运输,到产品生产、使用,直至最终废弃物处理的整个生命周期阶段内所产生的环境影响。ISO14040将生命周期评价分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4个过程^[11]。

通过LCA的排放清单可直观了解生物质转化系统各种污染物排放数量的大小。不同污染物对环境影响的种类不同,产生同一类环境影响的物质其危害程度也不会完全相同,因此为了综合分析污染物产生的环境影响,还需确定不同环境影响类型的相对作用大小或权重,从而获得归一化的环境影响指标。

1.2 层次分析法

层次分析法(AHP)是将复杂系统的有关因素分解成目标、准则和方案等层次,通过两两比较因素之间的相对重要性,给出相应的比例标度,构造判断矩阵,实现用一定标度把不同类因素的主观判断进行客观量化,从而得出不同要素或评价对象

收稿日期:2013-02-28

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划(2013CB228106;2010CB732206)

通信作者:肖军(1968—),女,博士、教授,主要从事生物质热化学转化利用方面的研究。jxiao@seu.edu.cn

的权重值,为复杂系统的决策和评价提供依据。

层次分析法包括以下主要步骤:

1)建立层次结构模型:根据问题的性质和所要达到的目标,将问题分成目标层、准则层、方案层等不同层次结构且所建立的层次关系中,上一层对下一层有支配关系。

2)建立成对比较判断矩阵:设某层有 n 个因素,基于文献[12,13]提出的方法将两两因素之间进行比较,两者的相对重要度取 1~9 比例标度,如表 1 所示。用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对第 j 个因素的比较结果,则构成如式(1)所示的判断矩阵。

表 1 判断矩阵标度

Table 1 Scale of judgment matrix

序号	重要性等级	a_{ij} 赋值
1	i, j 两元素同等重要	1
2	i 元素比 j 元素稍重要	3
3	i 元素比 j 元素明显重要	5
4	i 元素比 j 元素强烈重要	7
5	i 元素比 j 元素极端重要	9
6	i 元素比 j 元素不重要	1/3
7	i 元素比 j 元素明显不重要	1/5
8	i 元素比 j 元素强烈不重要	1/7
9	i 元素比 j 元素极端不重要	1/9

注: $a_{ij}=(2,4,6,8,1/2,1/4,1/6,1/8)$ 重要性等级介于 $a_{ij}=(1,3,5,7,9,1/3,1/5,1/7,1/9)$ 之间。

表 2 玉米秆成分分析表

Table 2 Approximate and ultimate analysis of cornstalk

工业分析/ad,%				元素分析/ad,%					热值/MJ·kg ⁻¹
W	FC	V	A	[C]	[H]	[O]	[N]	[S]	
9.4	16.8	70.7	3.2	39.24	4.92	42.4	0.81	0.12	15.09

2.2 系统边界

本文对生物质直燃发电生命周期评价的研究范围包括生物质生长、收集、运输以及燃烧发电。全系统评价模型的假设和简化如下:

1)不包括各阶段所用设备制造所造成的资源消耗和环境影响;

2)电厂运行阶段所消耗的电由本系统自发电提供,除此之外所耗电均来自燃煤发电;

3)各阶段所排放的污染物均是未进行脱硫脱硝处理的直接排放。各阶段考虑的资源消耗与污染物排放如图 1 所示。系统功能单位为 1 kWh 电量所造成的污染物排放量和资源消耗量。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)建立的判断矩阵,具有以下特点:

$$a_{ij} > 0; a_{ij} \times a_{ji} = 1; a_{ii} = 1$$

3)计算判断矩阵:根据建立的判断矩阵,计算其特征值和特征向量,特征向量即表示相对应比较因素的权重,最后对比较结果进行一致性检查。本文将 AHP 方法应用于 LCA 的环境评价中,建立层次结果模型,通过 9 标度法计算不同类型环境影响的相对重要度(即权重值),从而获得环境影响的综合性能指标。

2 生物质直燃发电生命周期评价

2.1 研究对象

本文以装机容量 2×15 MW 的生物质直燃发电(BCP)系统为研究对象,年发电时间 6000 h,根据目前生物质直燃发电的效率一般为 16%~18%^[3,4,6],本文发电效率设为 17%,选取玉米秆为生物质原料,成分分析见表 2。该系统采用 75 t/h 的循环流化床锅炉,年发电量 1.8×10⁵ MWh,秸秆消耗率为 1.4 kg/kWh^[14]。

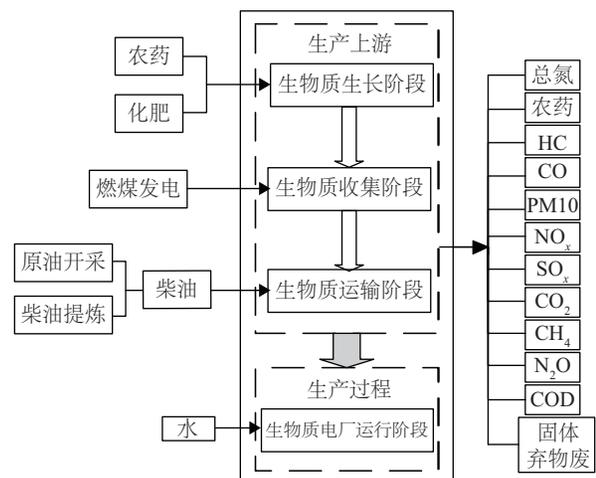


图 1 生物质直燃发电系统边界及其输入输出

Fig. 1 Boundary of BCP and the input/output

2.3 清单分析

2.3.1 生物质生长阶段

生长阶段的环境影响主要考虑:玉米秆生长光合作用对 CO₂的吸收固定,根据玉米秆的含碳量计算;施用化肥引起的水体总氮超标导致水体富营养化。生长阶段流失的农药易随雨水径流等引起水体污染^[15],农药平均施用量 1 kg/(t 玉米),流失率为 18%。因缺乏有效的农药生产数据且农药施用量远小于化肥施用量,只考虑化肥生产引起的间接排放^[16]。玉米所施用的纯 N、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)量分别为 0.0344、0.0114、0.03945 kg/m²,玉米产量为 1.2 kg/m²^[16],其中总氮流失率为 2.5%^[17]。

玉米秆生长阶段所引起的环境影响根据玉米、玉米秆和玉米芯的经济价值进行分配,玉米秆的折算因子 K_{cs} 计算为:

$$K_{cs} = \frac{M_{cs} \times P_{cs}}{M_{cs} \times P_{cs} + M_{cb} \times P_{cb} + P_{cg}} \quad (2)$$

式中, M_{cs} ——玉米秆与玉米的质量比,取 1.2:1; M_{cb} ——玉米芯与玉米的质量比,取 0.33:1; P_{cs} ——玉米秆价格,取 450 元/t; P_{cb} ——玉米芯价格,取 450 元/t; P_{cg} ——玉米价格,取 1650 元/t。

2.3.2 生物质收集阶段

收集阶段环境影响由铡切、打包等所耗电量引起,电力消耗为 14.31 kWh/(t 生物质)^[18],我国电力生产污染物排放见表 3,该阶段的清单排放见表 4。

表 3 发电过程污染物排放^[16](g/GJ)

[HC]	[CO]	[PM ₁₀]	[NO _x]	[SO _x]	[CO ₂]	[CH ₄]	[N ₂ O]
12.93	134.6	65.45	775.32	467.67	263760.55	3.05	2.84

2.3.3 生物质运输阶段

运输阶段仅考虑运输过程中机动车的排放。假设生物质收集半径为 20 km,运输工具为 5 t 轻型货车,燃料为柴油,热值 42.64 MJ/kg,油耗 3.498 kg/(t 生物质)。根据 5 t 轻型货车的污染物排放系数^[16]计算运输阶段的环境排放,详见表 4。

2.3.4 生物质电厂运行阶段

该阶段所产生的环境影响主要由生物质燃烧引起。假设不完全燃烧产物只有 CO,在干烟气中占 0.05%,烟气中 O₂ 含量为 6%。CO₂、SO₂、CO 等的排放量根据质量守恒计算^[19],可得 SO₂ 为 8.4×10⁻⁴ m³/(kg 生物质),CO₂ 为 0.7298 m³/(kg 生物质),CO

表 4 生物质直燃发电全生命周期的清单分析(g/MWh)

Table 4 Inventory results of BCP(g/MWh)

输入输出物	生长阶段	收集阶段	运输阶段	发电阶段
总氮	165.23	0.20	0	0
农药	58.80	0	0	0
HC	7.0	0.94	25.02	0
CO	50.40	9.72	90.97	4475.61
PM ₁₀	51.80	4.73	3.41	206.36
NO _x	407.40	33.56	159.20	887.98
SO _x	320.60	33.74	19.56	3355.74
CO ₂	-1618505	19022.28	15373.86	2004382
CH ₄	2.80	0.22	1.23	0
N ₂ O	1.40	0.20	0.61	0
COD	39.20	2.66	0	0
固体废弃物	0	1.2	0	4410
生物质运输	—	—	4.89×10 ³	—
柴油耗量	—	—	—	—
水	—	—	—	3×10 ⁶
收集耗电/ kWh·MWh ⁻¹	—	20.034	—	—
生物质消耗率	—	—	—	1.4×10 ⁶

为 2.39×10⁻³ m³/(kg 生物质),干烟气容积为 4.76 m³/(kg 生物质)。发电阶段产生的固废灰渣是灰分和未燃尽碳,灰分的主要成分是 K、Na、Ca、Mg、Al 等金属氧化物,均是对土壤无危害的物质,可回收作为化肥使用,本文假设回收利用率为 90%,但文中并未将这部分回收量用于生长阶段。根据火力发电排放标准 PM₁₀ 的允许排放浓度取 30 mg/m³。过量空气系数取 1.4,燃烧温度 800~900 °C,NO_x 的排放量为 133.25 mg/m³^[20,21],结合干烟气容积可得 NO_x 的排放量为 6.34×10⁻⁷ kg/(kg 玉米秆),详见表 4。

2.4 环境影响评价

2.4.1 环境影响分类及标准化

根据 LCA 排放清单,本文考虑 6 种环境影响类型:全球变暖(GWP)、酸化(AP)、光化学污染(POF)、富营养化(EP)、健康危害(HTP)、固体废弃物(SW)。本文基于荷兰 CML2010 数据库^[22],确定各环境影响类型的基准参考物及污染物相应的当量因子,由式(3)计算获得污染物对不同环境影响类型的环境影响潜值 EP_{ij} 。

$$EP_{ij} = \sum Q_{ij} \times EF_{ij} \quad (3)$$

式中, EP_j ——第 j 种环境影响类型的环境影响潜值, g 参考物质/ kWh ; Q_{ij} ——第 j 种环境影响类型中 i 物质的排放量, g/kWh ; EF_{ij} ——第 j 种环境影响类型中 i 物质的当量因子, 见表 5^[22-24]。

表 5 污染物环境影响当量因子

GWP/ kg CO ₂ ·kg ⁻¹	污染物 因子	CO ₂ 1	CO 2	CH ₄ 25	N ₂ O 298
AP/ kg SO ₂ ·kg ⁻¹	污染物 因子	SO _x 1	NO _x 0.7	— —	— —
EP/ kg NO ₃ ⁻ ·kg ⁻¹	污染物 因子	N 4.42	NO _x 1.35	N ₂ O 2.7	COD 0.23
POF/ kg C ₂ H ₄ ·kg ⁻¹	污染物 因子	HC 0.398	CO 0.027	SO _x 0.048	CH ₄ 0.006
HTP/ kg C ₆ H ₄ Cl ₂ ·kg ⁻¹	污染物 因子	农药 18	PM ₁₀ 0.82	NO _x 1.2	SO _x 0.096
SW/ kg 固废·kg ⁻¹	污染物 因子	固废 1	— —	— —	— —
资源消耗/ kg Fe·kg ⁻¹	污染物 因子	生物质 0	燃油 1.35	水 0.00085	电 0.098

为了便于不同环境影响类型之间的比较, 将不同的环境影响类型标准化, 本文以人均年环境影响为参考标准进行计算, 如式(4)。标准化环境影响潜值见表 6。

$$NEP_j = EP_j / RR_{90j} \quad (4)$$

式中, NEP_j ——第 j 种环境影响类型标准化后的环境影响潜值, 人·年/千瓦时; RR_j ——第 j 种环境影响类型的人均环境影响, 本文采用 1990 年的标准人均年环境影响潜值^[11, 24]。

表 6 生物质直燃发电系统的标准化环境影响潜值

环境影响类型	环境影响潜值/人·年每吉瓦时
GWP	48.88
POF	225.27
AP	41.76
EP	26.42
HTP	0.20
SW	17.57

2.4.2 层次结构模型

基于层次分析法, 对生物质直燃发电系统生命周期评价综合考虑了资源消耗和环境影响, 由此建

立了生物质直燃发电的评价指标和层次结果模型。如图 2 所示, 资源消耗和环境影响为一级指标层, 环境影响根据环境影响类型建立了二级指标层, 包括全球变暖、酸化、富营养化、光化学污染、健康危害以及固体废弃物。

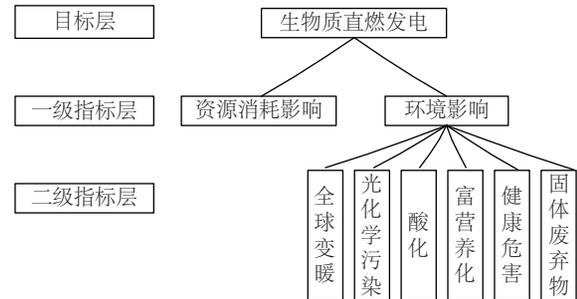


图 2 AHP 层次结构示意图

Fig. 2 The structure of analytic hierarchy process (AHP)

由于 6 种环境影响对不同区域范围产生的影响作用负荷不同, 因此本文分别从全球性、区域性、局地性和同等性角度, 确立各类环境影响的判断矩阵 $a(i, j)$ 和权重因子 $W(k, j)$, $k=1 \sim 4$ (分别对应全球性、区域性、局地性、同等性) 一级指标层中资源消耗和环境影响两者的重要性会因地而异, 故本文进行了 3 种情况下两者的权重计算, A 为资源消耗 > 环境影响; B 为资源消耗 = 环境影响; C 为资源消耗 < 环境影响。如表 7 所示。

表 7 一级指标层的权重计算

项目	资源消耗	环境影响	权重(W)
A 资源消耗	1	2	0.67
A 环境影响	1/2	1	0.33
汇总	1.5	3	1.00
B 资源消耗	1	1	0.50
B 环境影响	1	1	0.50
汇总	2	2	1.00
C 资源消耗	1	1/2	0.33
C 环境影响	2	1	0.67
汇总	3	1.5	1.00

二级指标层中 6 种环境影响类型之间的重要性, 根据所选视角的不同而有所区别, 本文分别从全球性、区域性、局地性出发, 根据文献[11, 13]确定了 6 种环境影响类型相互之间的重要性。

全球性视角: $GWP > AP > EP > POF > HTP > SW$

区域性视角: $AP, EP > POF, HTP > GWP > SW$

局地性视角:SW>HTP>POF>EP>AP>GWP

据此,各视角下建立二级指标层的判断矩阵,

同等性视角:6种环境影响类型的重要性相同

获得环境影响类型之间的权重,如表8所示。

表8 全球性、区域性、局地性的环境影响权重

Table 8 The weight of six impact categories for three perspectives

		GWP	AP	EP	POF	HTP	SW	权重
全球性(k=1)	GWP	1	2	3	4	5	6	0.381
	AP	1/2	1	2	3	4	5	0.252
	EP	1/3	1/2	1	2	3	4	0.160
	POF	1/4	1/3	1/2	1	2	3	0.101
	HTP	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0.064
	SW	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.042
	汇总	2.450	4.283	7.083	10.833	15.500	21.000	1.000
区域性(k=2)	GWP	1	1/6	1/6	1/4	1/4	2	0.049
	AP	5	1	1	3	3	6	0.320
	EP	5	1	1	3	3	6	0.320
	POF	3	1/3	1/3	1	1	4	0.132
	HTP	3	1/3	1/3	1	1	4	0.132
	SW	1/2	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0.046
	汇总	23.000	3.033	3.033	8.583	8.583	17.500	1.000
局地性(k=3)	GWP	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	0.042
	AP	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.064
	EP	3	2	1	1/2	1/3	1/4	0.100
	POF	4	3	2	1	0	1/3	0.160
	HTP	5	4	3	2	1	1/2	0.251
	SW	6	5	4	3	2	1	0.381
	汇总	21.000	15.500	10.833	7.083	3.831	2.450	1.000

综合环境影响指标计算式为:

$$End_k = \sum NEP_j \times W_{k,j} \quad (5)$$

式中, End_k —— k 视角下综合环境影响潜值,人·年每吉瓦时; NEP_j ——标准化后的第 j 种环境影响类型的环境影响值,人·年/吉瓦时; $W_{k,j}$ —— k 视角下第 j 种环境影响类型的权重,见表8。

3 结果讨论

3.1 不同视角下生物质发电环境影响

由图3可见,不同视角下的总环境负荷有所不同,其中全球性的环境负荷最大,局地性最小。生物质直燃发电同一种环境影响类型造成的环境影响份额有明显差异,但各视角下,最主要的环境影响类型均为POF,占40%以上,最轻微的均为HTP。AP、EP以及GWP在各视角下也占有较大比重,但随所选视角的不同而有所差异。全球性视角

中GWP、AP比重较大,分别达32.74%和18.49%;区域性视角中则是AP和EP,分别达24.39%和15.43%;局地性视角中,SW的影响份额明显增加。

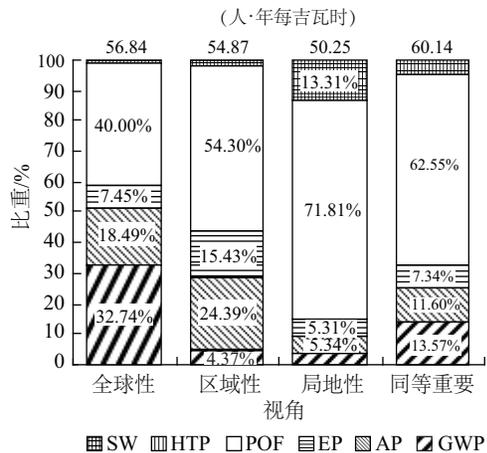


图3 不同视角下环境影响类型所占比例
Fig. 3 Contributions of different environmental impact categories for four perspectives

此外,将全球性、区域性、局地性 3 个视角和同等性视角相比,无论是同一种环境影响类型所占份额,还是综合环境影响指标,均存在差异,由此可见,权重的差异可反映出污染物排放在不同视角下带来的各种环境影响差异。

由图 4 环境影响类型各阶段分布可见,发电阶段和生长阶段对环境影响较大。AP、POF 以及 SW 主要来自发电阶段;EP 和 HTP 主要来自生长阶段,其次是发电阶段。结合表 4 可见,发电阶段排放的 CO_x、NO_x 和 SO_x 对 POF 和 AP 影响较大,其中 POF 中 44.53% 来自 SO_x、33.41% 来自 CO; AP 中 70.33% 来自 SO_x、13.03% 来自 NO_x,故仍有必要对生物质发电阶段进行 SO_x 和 NO_x 排放控制。对于生物质生长阶段,由于使用农药和化肥,而其流失以及化肥生产的间接排放会引起 EP 和 HTP,EP 中 35.66% 来自于 N 的流失,15.33% 来自化肥生产的间接排放;HTP 中 30.94% 来自农药的流失,17.47% 来自化肥生产的间接排放,因此生物质种植阶段减少农药和化肥的流失对生物质秸秆发电的环境性能也具有积极意义。另外,因玉米秆生长过程吸收固定大量 CO₂,使生物质直燃发电全生命周期中 GWP 的影响显著降低。

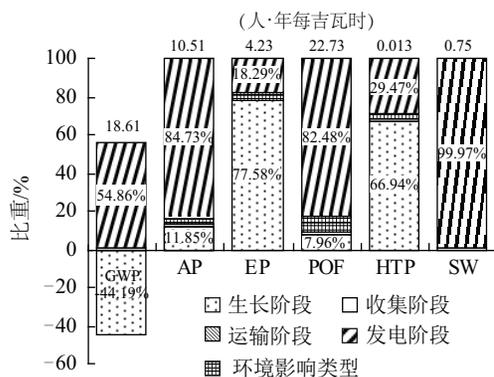


图4 不同环境影响类型在各阶段的分布

Fig. 4 Contributions of different process to environmental impact categories

3.2 发电效率对环境负荷的影响

目前生物质直燃发电的效率一般在 15%~25% 之间,为了对比不同发电效率下环境影响。本文从全球性视角($k=1$)及资源消耗>环境影响(A)出发,以 15% 为基准,比较了综合环境影响指标随发电效率的变化情况。各发电效率相比 15% 的综合环境影响下降率为:

$$\Delta X_{1,\eta} = \frac{(End_{1,15\%} - End_{1,\eta})/End_{1,15\%}}{\eta - 15} \quad (6)$$

式中, $\Delta X_{1,\eta}$ ——相比 15%,发电效率为 η 时的综合环境影响下降率,%; $End_{1,15\%}$ ——发电效率为 15% 时的综合环境影响负荷,人·年/吉瓦时; $End_{1,\eta}$ ——发电效率为 η 时的综合环境影响负荷,人·年/吉瓦时; η ——发电效率。

如图 5 所示,当发电效率由 15% 提高到 35% 时,综合环境影响指标由 64.55 人·年每吉瓦时下降到 27.69 人·年每吉瓦时,下降了约 57%,相当于发电效率平均每提高 1%,综合环境影响指标可降低 2.85%。在发电效率较低时,提升发电效率,可明显降低污染物的排放,改善环境影响,但随发电效率的提高,综合环境影响指标下降率减少,当发电效率由 20% 提高到 35% 时,下降率由 5.00% 减少至 2.85%,因此,生物质直燃发电效率较低时,提高系统效率,不仅有利于降低能耗,而且有利于改善环境性能。

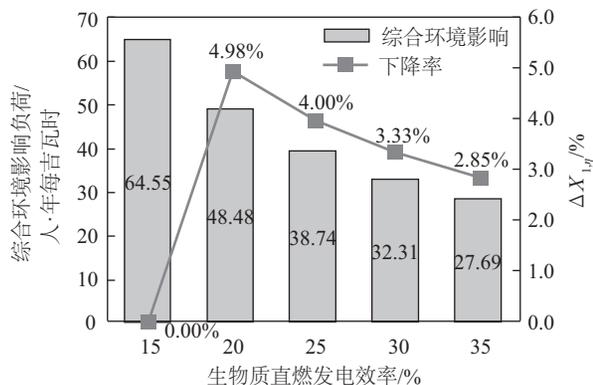


图5 生物质直燃发电综合环境影响指标比较

Fig. 5 Comparison of integrated environmental impact index

3.3 与燃煤发电机组的比较

为了比较生物质可再生能源发电与化石能源发电的综合影响,将生物质直燃发电和目前先进的超超临界(USC)燃煤发电机组进行比较,燃煤发电排放数据来源于文献[24],煤种为含硫量为 0.877% 贫煤。全系统评价模型的假设和简化如下:

- 1) 不包括各阶段所用设备制造所造成的资源消耗和环境影响;
- 2) 电厂运行阶段所消耗的电由本系统自发电提供,除此之外所耗电均来自燃煤发电;
- 3) 煤粉燃烧后产生的烟气经静电除尘器、脱硝

装置(DeN)、脱硫装置(DeS)处理后排入大气;

4)煤矸石、灰渣、脱硫石膏的回收利用率分别为 30%^[25]、60%^[26]、90%^[27]。发电系统的主要参数参见表 9。

表 9 燃煤发电机组参数

Table 9 Parameters of coal-fired power generation units

	超超临界+脱硫脱硝	超超临界
	(USC-DeS-DeN)	(USC)
机组容量/MW	1000	1000
发电效率/%	42	42
煤消耗率/kgce·kWh ⁻¹	0.293	0.293
厂用电率/%	4.8	3
脱硫效率/%	石灰石脱硫 96	—
脱硝效率/%	氨法脱硝 85	—

本文从全球性视角及资源消耗>环境影响(A)出发,对比两个系统的环境影响和资源消耗影响,差异率 ΔE 计算公式为:

$$\Delta E = \frac{\text{燃煤发电} - \text{生物质发电}}{(\text{燃煤发电} + \text{生物质发电})/2} \quad (7)$$

计算结果详见表 10。由表 10 可见,相比于无

脱硫脱硝燃煤发电,生物质直燃发电各环境影响类型指标均下降,主要原因是生物质含 N、S 量低,固体废弃物灰渣 90%可作为化肥回收利用,而燃煤发电中煤矸石和灰渣的回收利用率仅 30%和 60%;另一方面,生物质生长阶段吸收 CO₂,具有固碳功能,使得全生命周期的 CO₂排放显著下降,因此温室效应负荷明显改善,降低约 60%。对燃煤发电系统进行脱硫脱硝处理后,USC-DeS-DeN 全生命周期的 POF、AP、EP 以及 HTP 的环境影响指标均低于生物质直燃发电系统。虽生物质直燃发电含 N、S 量低,但若对污染物不进行处理直接排放,相比先进的 USC-DeS-DeN 在环境方面并不具备优势。另外,对比各发电系统的综合环境影响指标,当 BCP 系统发电效率仅 17%时,其综合环境影响指标甚至高于 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统,而当 BCP 系统提高到 25%时,综合环境影响将低于 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统。综上所述,采取措施减少 NO_x、SO_x 排放及提高生物质直燃发电效率是降低生物质利用过程环境负荷的有效手段。

表 10 生物质直燃发电与燃煤发电比较

Table 10 Comparison of BCP and coal-fired power generation

类型	17%BCP/ 人·年每 吉瓦时	25%BCP/ 人·年每 吉瓦时	USC-DeS-DeN/ 人·年每 吉瓦时	USC/ 人·年每 吉瓦时	差异率 ΔE				
					USC-DeS-DeN 与 17%BCP/%	USC 与 17% BCP/%	USC-DeS-DeN 与 25%BCP/%	USC 与 25% BCP/%	
环境 影响 类型 指 标	GWP	18.61	12.63	32.15	31.58	53.35	51.68	87.18	85.73
	AP	10.50	7.16	0.94	51.36	-167.16	132.05	-153.58	151.06
	EP	4.23	2.89	0.70	23.70	-143.20	139.42	-122.01	156.53
	POF	22.72	15.495	2.09	52.23	-166.32	78.71	-152.47	108.46
	HTP	0.013	0.009	0.001	0.063	-171.01	132.45	-158.76	151.46
	SW	0.750	0.509	5.230	5.070	149.83	148.45	164.52	163.51
综合环境 影响指标	56.837	38.742	41.122	163.996	-32.08	97.05	5.96	123.56	
资源消耗 指标	2.261	2.153	4.030	3.720	56.24	48.79	60.71	53.36	
综合影响 指标	20.450	14.350	16.390	57.140	-22.04	94.57	13.27	119.71	

资源消耗方面,与燃煤发电相比,生物质直燃发电的资源消耗指标也是下降的,比较各发电系统,其中资源消耗指标最大的是 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统,然后依次是 USC、17%BCP、25%BCP。一方面生物质直燃发电系统的原材料是可再生的生

物质,减少了煤等不可再生资源的使用,另一方面无脱硫脱硝处理,节约了石灰石的使用。从综合影响指标来看,25%BCP 发电系统综合性能最佳,其次是 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统。主要是由于 USC 燃煤发电虽然进行了脱硫脱硝处理,增加了资源消

耗,但因一方面资源消耗在综合影响指标中所占份额比较小,其中燃煤电站不超过 17%,生物质电站不超过 10%;另一方面进行脱硫脱硝可明显降低环境影响,可见,系统采用脱硫脱硝装置可有效降低综合影响指标。

表 11 不同发电类型的综合影响指标

Table 11 Integrated impact index for different power generations

类型	17%BCP	25%BCP	USC-DeS-DeN	USC
A	20.45	14.35	16.39	57.14
B	29.55	20.45	22.58	83.86
C	38.65	26.55	28.76	110.58

由 2.4.2 节可知,一级指标层中资源消耗和环境影响之间的权重计算存在 3 种情况。由表 11 可见,随着环境影响权重的不断增大,综合影响指标逐渐上升,再次说明相比于环境影响,资源消耗对综合影响指标的作用比较小。由表 11 亦可发现 3 种情况下的综合影响指标大小排列均为:25%BCP<USC-DeS-DeN<17%BCP<USC。可见,资源消耗和环境影响之间的权重分配对生物质直燃发电和燃煤发电的综合影响指标造成的影响很小,不会影响两种发电方式综合影响指标的比较。

4 结 论

本文运用 LCA 和 AHP 结合的方法对生物质直燃发电系统进行环境影响、资源消耗的综合评价,结果显示光化学污染是最主要的环境影响类型,发电和生长阶段是环境影响最主要的两个阶段。从全球性、区域性以及局地性 3 个视角分析系统综合环境影响指标以及不同环境影响类型所占份额,权重的差异反映出污染物排放在不同视角下导致的各种环境影响的差异。与燃煤发电相比,生物质直燃发电在减排温室气体和降低资源消耗方面具有比较明显的优势,而生物质发电效率达到 25%以上时综合影响指标方可优于 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统。25%BCP 发电系统综合影响指标比 USC-DeS-DeN 燃煤发电系统降低 13.27%。另外,结果表明提高生物质直燃发电效率对降低能耗和改善环境性能均有积极意义。通过分析资源消耗和环境影响的权重对综合影响指标的作用可见二者权重的差异对生物质直燃发电和燃煤发电的综合影响指标的大小排序并没有影响,3 种权重分配情况下均为:25%BCP<USC-DeS-DeN<17%BCP<USC。

[参考文献]

- [1] Varanda Martins G, Pinto G, Martins F. Life cycle analysis of biodiesel production [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(5): 1087—1094.
- [2] 江宏玲. 生物质制取高品位液体燃料的技术经济分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [2] Jiang Hongling. Technical and economic study on high-grade liquid fuels from biomass [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [3] 林琳, 赵黛青, 魏国平, 等. 生物质直燃发电系统的生命周期评价[J]. *水利电力机械*, 2006, 28(12): 19—23.
- [3] Lin Lin, Zhao Daiqing, Wei Guoping, et al. Life cycle assessment of biomass direct combustion power generation system [J]. *Water Conservancy & Electric Power Machinery*, 2006, 28(12): 19—23.
- [4] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. *可再生能源*, 2009, 27(5): 102—106.
- [4] Liu Junwei, Tian Binghui, Zhang Peidong, et al. Life cycle assessment on straw directly combustion for power generation system [J]. *Renewable Energy*, 2009, 27(5): 102—106.
- [5] Shafie S M, Mahlia T M I, Masjuki H H, et al. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation from rice husk in Malaysia [J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 499—504.
- [6] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 752—759.
- [6] Wang Wei, Zhao Daiqing, Yang Haolin, et al. Life cycle analysis on biomass gasification & power generation system and inquiry to assessment method [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, 26(6): 752—759.
- [7] Myllyviita Tanja, Holma Anne, Antikainen Riina, et al. Assessing environmental impacts of biomass production chains-application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29-30(7): 238—245.
- [8] Narayanan D, Zhang Y, Mannan M S. Engineering for sustainable development (ESD) in bio-diesel production [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(5): 349—359.
- [9] 顾吉青. 生物质制取高品质液体燃料的生命周期评价[D]. 南京: 东南大学, 2010.

- [9] Gu Jiqing. Study on comprehensive evaluation of biomass into high grade liquid fuels based on life cycle assessment[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [10] 李 娜. 基于模糊数学理论的城市生活垃圾处理生命周期评价[D]. 四川: 西南交通大学, 2007.
- [10] Li Na. The life cycle assessment on municipal solid waste treatment based on fuzzy [D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [11] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [12] 杜 栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] Hermann B G, Kroeze C, Jawjit W. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(18): 1787—1796.
- [14] 王爱军, 张 燕, 张小桃, 等. 生物质直燃和混燃发电环境效益分析[J]. 可再生能源, 2011, 29(3): 137—140.
- [14] Wang Aijun, Zhang Yan, Zhang Xiaotao. Analysis on environmental benefit of biomass combustion and cocombustion for power generation [J]. Renewable Energy, 2011, 29(3): 137—140.
- [15] 瞿婷婷. 生物质热解生物质转化为高品位液体燃料的生命周期评价[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [15] Qu Tingting. Life cycle assessment of high quality liquid fuels from biomass via fast pyrolysis and upgrading[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [16] 胡志远. 车用生物柴油生命周期评价及多目标优化[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [16] Hu Zhiyuan. Life cycle assessment and multi-objective optimization of biodiesel [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [17] 张怀志. 黄浦江上游水源保护区农田氮磷流失特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [18] 李 宁. 河南省生物质(秸秆、林业废弃物)发电现状、存在问题及对策研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [18] Li Ning. Present situation and existing problems and countermeasures of biomass power generation on straw and forestry waste in hennan province [D]. Zhenzhou: Agricultural University of Henan, 2009.
- [19] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1986.
- [20] 张 磊. 农作物秸秆与煤流化床混烧的NO_x生产和排放研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [20] Zhang Lei. The formation and emission mechanism of NO_x in agriculture straws & coal co-firing fluidized-bed combustor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [21] 黄亚军. 简论废气氮氧化物(NO_x)浓度单位 ppm 与 mg/m³ 的换算系数关系[J]. 四川环境, 2010, (1): 24—25.
- [21] Huang Yajun. Brief discussion on conversion coefficient between the concentration units ppm and mg/m³ of nitrogen oxides (NO_x) [J]. Sichuan Environment, 2010, (1): 24—25.
- [22] Leiden University. Institute of Environmental science (CML) 2012 [EB/OL]. <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/>, 2012-09-24.
- [23] Huang Chienchung, Ma Hwongwen. A multidimensional environmental evaluation of packaging materials [J]. Science of the Total Environment, 2004, 324(1): 161—172.
- [24] 武民军. 燃煤发电的生命周期评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [24] Wu Minjun. The life cycle assessment of coal-fired power generation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [25] 石 磊, 牛冬杰, 金 龙, 等. 煤矸石的综合利用[J]. 煤化工, 2005, 33(4): 15—18.
- [25] Shi Lei, Niu Dongjie, Jin Long, et al. Comprehensive utilization of coal shale [J]. Coal Chemical Industry, 2005, 33(4): 15—18.
- [26] 周宛谕. 灰渣资源化综合利用试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [26] Zhou Wanyu. Experimental study on resource utilization of ash [D]. Hangzhou: University of Zhejiang, 2010.
- [27] 毛树标. 烟气脱硫石膏综合利用分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [27] Mao Shubiao. Comprehensive utilization of FGD gypsum [D]. Hangzhou: University of Zhejiang, 2005.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOMASS COMBUSTION POWER GENERATION BASED ON ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Bu Shouzhen, Xiao Jun, Shen Laihong, Chen Lulu

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The environmental impact of biomass combustion power generation (BCP) was evaluated from three perspectives (global, regional and local) based on LCA and AHP. The integrated performance evaluation of the environmental impact and resource consumption of BCP was carried out and compared with that of coal-fired power units. The results show that the environmental load is the largest from the global perspective, and the most significant environmental impact category is photochemical ozone formation. In addition, the growth process and the power generation process contribute more to the environmental impact burden. The integrated environmental impact indicator decreases by 57% with the increase of power generation efficiency from 15% to 35%. Compared to ultra-supercritical coal-fired generation with DeN and DeS, the global warming, resource consumption and integrated index of BCP with efficiency of 25% are decreased by 87.18%, 60.71% and 13.27%, respectively.

Keywords: life cycle assessment; analytic hierarchy process; biomass combustion power generation; integrated impact