

生物质直燃发电 CDM 项目可持续性的能值评价

罗玉和, 丁力行^{*}

(仲恺农业工程学院机电工程学院, 广州 510225)

摘 要: 生物质直燃 CDM (清洁发展机制) 项目的可持续发展评价需要对系统的经济、社会和环境效益等方面进行定量分析。该文应用能值理论, 对生物质直燃发电 CDM 项目进行了能值分析, 建立了能表明其功能特征的能值可持续性评价指标, 并以华中某地 25 MW 生物质直燃发电 CDM 项目为案例, 评价了系统的可持续发展性能。结果表明: 该 CDM 项目每年获得的 2.51×10^6 美元温室气体减排效益, 不仅可有效增大系统的能值产出率, 降低环境负荷, 使生物质直燃发电系统更具有竞争力; 还能使系统能值可持续指标提高到 6.45, 使之富有活力和发展潜力, 可维持较长时间内的可持续发展。

关键词: 生物质, 发电, 可持续发展, 清洁发展机制, 能值理论

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.039

中图分类号: TK6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0224-04

罗玉和, 丁力行. 生物质直燃发电 CDM 项目可持续性的能值评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 224—227.

Luo Yuhe, Ding Lixing. Sustainability evaluation on CDM project of biomass direct combustion power generation based on emergy theory[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 224—227. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在中国, 可作为能源利用的农作物秸秆生物质约为 7 亿 t 标准煤^[1]。直燃发电能达到减容化、资源化和无害化的目的, 是目前生物质大规模能源利用最成熟、最有效的方式, 在发达国家被列为生物质转换优选技术之一^[2]。由于初始投资较大、运行成本高, 中国生物质直燃发电起步较晚。但 2005 年以来, 随着《京都议定书》的正式生效, 大量的生物质直燃发电清洁发展机制 (clean development mechanism, CDM) 项目相继出现。如河北晋州、河南鹿邑、江苏宿迁、江苏句容、山东单县、山东高唐、江苏射阳、河北威县、河南新乡等生物质直燃发电项目先后在 CDM 执行理事会 (EB) 注册成功。还有更多的生物质直燃发电 CDM 项目已获得国家发改委批准, 发展十分迅速。

生物质直燃 CDM 项目的可持续发展需要维持系统的经济、社会和环境效益协调发展。能值理论以太阳能能值 (solar emergy) 为统一度量标准, 将产品形成过程中所有的自然资源、技术、社会服务等投入转化成同一标准的能值 (emergy)^[3-4], 进而得出的一系列反映系统生态经济效益和功能特征的能值评价指标, 评价系统的可持续发展性能。能值理论已广泛应用于农业、工业、城市以及区域^[5-9]等各生态经济系统的可持续评价。

本文以华中某地 25 MW 生物质直燃发电系统为研究

案例, 在分析其作为 CDM 项目, 获得温室气体 (greenhouse gas, GHG) 减排效益的基础上, 建立了生物质直燃发电能值可持续性评价指标, 从环境—经济价值角度, 对生物质直燃发电技术进行了分析评价。

1 清洁发展机制温室气体减排效益

1.1 清洁发展机制

CDM 是发达国家的政府和企业, 以资金和技术投入的方式, 帮助发展中国家实施具有减少 GHG 排放项目的一种合作机制^[10]。发达国家通过 CDM 项目产生的核准减排量 (CERs) 抵偿本国在《京都议定书》中规定的减排份额。CDM 既可以帮助发达国家实现减排温室气体的承诺, 又可带来额外经济效益, 提高项目投资回报率, 增强市场竞争能力, 是一种共赢的国际合作机制。

1.2 减排效益计算方法

生物质直燃发电 CDM 项目减排计算采用经批准的并网型生物质发电整合基准线方法学 (ACM0006)^[11]。项目主要通过由生物质可再生能源电力代替传统化石燃料电厂产生的电网电力, 从而达到 GHG 减排效果。项目在某年份 y 的核准减排量 (以 CO_2 计) 为

$$\text{CER}_{s_y} = \text{BE}_y - \text{PE}_y - L_y \quad (1)$$

式中: CER_{s_y} ——某年份 y 的核准减排量, t/a; BE_y ——基准线排放量, t/a; PE_y ——项目本身排放量, t/a; L_y ——由泄漏引起的排放, t/a。

则 CDM 项目减排效益为

$$F_{\text{CDM}} = \text{CER}_{s_y} \times P_{\text{CERs}} \quad (2)$$

式中: F_{CDM} ——CDM 项目减排效益, 美元/a; P_{CERs} ——CERs 的合同价格, 美元/t。在占据全球碳交易 85% 以上的欧盟碳交易二级市场, CERs 的价格为每吨 CO_2 15~20 欧元/t, 2008 年新一轮最高时甚至高达 25 欧元/t。本

收稿日期: 2009-03-17 修订日期: 2009-06-14

作者简介: 罗玉和 (1981—), 男, 江西高安人, 主要研究方向为农业生物环境与能源工程。广州 仲恺农业工程学院机电工程学院, 510225。

Email: yuheluo@gmail.com

*通信作者: 丁力行 (1967—), 男, 湖南临湘人, 博士, 教授, 中国农业工程学会高级会员 (E041200409s), 主要从事人工环境与节能评价的研究。广州 仲恺农业工程学院机电工程学院, 510225。Email: lxding@vip.sina.com

CDM 项目的合同价格取 15 美元/t。

1.2.1 基准线排放

基准线排放的计算公式为

$$BE_y = EG_y \times EF_y \quad (3)$$

式中： EG_y ——该项目活动供电网的电量，kWh/a；

EF_y ——该区域电网的基准线排放因子，t/kWh。

本项目发电规模大于 15 MW，基准线排放因子 EF_y 应采用 ACM0002 方法学中的组合边际来计算电网的排放因子。即

$$EF_y = \omega_{OM} \times EF_{OM,y} + \omega_{BM} \times EF_{BM,y} \quad (4)$$

式中： $EF_{OM,y}$ ——电量边际排放因子，t/kWh； $EF_{BM,y}$ ——容量边际排放因子，t/kWh； ω_{OM} 、 ω_{BM} ——权重值。

对于生物质发电项目，式(4)中权重值为： $\omega_{OM}=0.75$ 和 $\omega_{BM}=0.25$ 。2008 年 12 月，国家发改委应对气候变化司充分考虑各种发电燃料（包括其加工运输过程）具有不同的潜在排放因子，通过统计近年来各区域电网的发电构成，研究确定了中国区域电网的基准线排放因子。其中，华中区域（包括河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆）电网的 $EF_{OM,y}$ 和 $EF_{BM,y}$ 分别为 1.278×10^{-3} t/kWh 和 0.6687×10^{-3} t/kWh^[12]。

1.2.2 项目本身排放

生物质能源利用过程中，CO₂ 的净排放量为零。因此，项目自身排放量的计算公式为

$$PE_y = PET_y + PEFF_y + PE_{EC,y} \quad (5)$$

$$PE_{EC,y} = N_y \times AVD_y \times EF_{km,CO_2,y} \quad (6)$$

式中： PET_y ——生物质运输过程排放，t/a； $PEFF_y$ ——项目本身所消耗的化石燃料排放，t/a； $PE_{EC,y}$ ——项目消耗电力所产生的 CO₂ 排放，t/a； N_y ——年份 y 中车辆运输生物质燃料的次数，1/a； AVD_y ——每次平均运输距离，km； $EF_{km,CO_2,y}$ ——车辆行驶 1 km 平均 CO₂ 排放因子，t/km。

项目本身所消耗的化石燃料主要包括冬天处理生物质水分或机组点火所用的各种燃料。 $PEFF_y$ 可通过统计所消耗的各种化石燃料乘以该燃料的排放因子来计算。

$PE_{EC,y}$ 主要用于生物质燃料的粉碎等预处理，可和机组其他辅助设备用电一起计入电厂自用电量。

1.2.3 泄露量

生物质发电项目中潜在的泄露量主要是由于本项目的化石燃料燃烧或生物质燃料没有采取其他利用方式（如沼气、生物燃油等）而用于本项目所引起的 GHG 排放的增加。生物质直燃发电 CDM 项目中，这些潜在的泄露已考虑在基准线排放和项目本身排放中，因此，可认为泄露为 0。

2 生物质直燃发电可持续性评价指标

2.1 能值分析评价步骤

工业经济系统的能值可持续性评价步骤一般为^[13]：

1) 确定研究系统的边界和内容，绘制能量和能值图；2) 收集所需的各种资料和数据；3) 编制能值分析表，计算系统的主要能量流、物质流、经济流；4) 建立能值可持

续性指标体系；5) 系统的发展评价与策略分析。

2.2 生物质直燃发电能值可持续性评价指标的建立

图 1 为生物质直燃发电系统的能值系统图。 R_i ($i=1, 2, 3$)——系统投入的本地可再生资源 i 的能值，sej/a； F ——从社会经济系统投入或反馈的货币能值（如场地、设备、原料、技术、劳动等投资与服务），sej/a； Y ——系统输出的能值，sej/a。2006 年《可再生能源法》明确规定生物质等可再生能源发电给予 0.25 元/kWh 的电价补贴，这部分收益 F_Y 和 GHG 减排效益 F_{CDM} ，可以减少生物质直燃发电系统的净社会能值($F-F_Y-F_{CDM}$)投入。

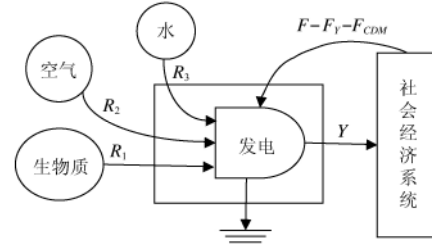


图 1 生物质直燃发电的能值系统图

Fig.1 Schematic description of emergy flow of biomass direct combustion power generation system

定义生物质直燃发电 CDM 项目能值评价指标如下：

1) 能值转换率 (Tr)：单位能量、物质或服务所含的太阳能值量，单位可为 sej/J、sej/kg 或 sej/\$ 等。不同的能量、物质或服务具有不同的 Tr ，它随着能量等级的提高而增加。一般而言，处于自然生态系统和社会经济系统较高层次的产品或生产过程具有较大的 Tr 。

图 1 所示生物质直燃发电系统输出电能的 Tr_Y 为

$$Tr_Y = Y/E_Y = (N + \sum R_i + F - F_Y - F_{CDM})/E_Y \quad (7)$$

式中： E_Y ——系统产出的电能，J； N ——系统投入的本地不可再生资源，生物质直燃发电过程中，此项投入可忽略不计。

2) 能值产出率：生产该产品总的能值投入与从社会输入的净货币能值的比值，可表示为

$$\varepsilon_{EYR} = (N + \sum R_i + F - F_Y - F_{CDM})/(F - F_Y - F_{CDM}) \quad (8)$$

ε_{EYR} 值越大，意味着在一定能值投入的情况下能值产出量越高，生产效率越高，相应的经济效益也将越高，它体现系统所具有的竞争力。

3) 环境负载率：不可再生资源能值与社会投入的净货币能值之和与可再生资源能值的比值，可表示为

$$\varepsilon_{ELR} = (N + F - F_Y - F_{CDM})/\sum R_i \quad (9)$$

ε_{ELR} 表征系统开发过程对环境造成压力的大小。外界大量的货币能值输入以及使用过多的不可再生资源，是引起环境系统恶化的主要原因。 ε_{ELR} 是系统的 1 个预警指标，系统的 ε_{ELR} 长期较高，将对环境造成不可逆转的功能退化或丧失的影响。

4) 能值可持续指标：能值产出率与环境负载率的比值，可表示为

$$\varepsilon_{ESI} = \varepsilon_{EYR}/\varepsilon_{ELR} \quad (10)$$

ε_{ESI} 较高，意味着在一定条件下，系统所产生的经济效益较高，同时环境负荷相对较小，显示出较好的可持

续发展性。

3 案例研究

3.1 研究对象

本文以华中某地新建的 25 MW 生物质直燃发电 CDM 项目为研究对象,该机组主要由振动炉排锅炉、锅炉给料系统、汽轮机发电系统和其他辅助设备组成。其中,锅炉及其燃料输送系统是 1 个极其重要的系统,其关键技术和设备由国外引进。发电机组为 1 台 25 MW 单级抽凝式汽轮发电机。发电系统参数如表 1 所示。

表 1 25 MW 生物质直燃发电主要技术参数
Table 1 Technical parameters of 25 MW biomass direct combustion power generation

参数	单位	数值
装机容量	MW	25
年运行时间	h	6 000
厂用电率	%	10
燃料		棉花秆
燃料热值	kJ/kg	15 667
年消耗量	t/a	1.35×10^5
运行成本	元/kWh	0.60
工程投资	元	3.8×10^8
设备使用年限	a	10

燃料为棉花秆,收集半径为 25 km。因其堆积密度小,运输采用载重质量为 2.5 t 的小型汽油货车,平均 CO₂ 排放因子 $EF_{km,CO_2,y}$ 为 0.4×10^{-3} t/km。

3.2 结果与分析

根据式 (1) ~ (6), 25 MW 生物质直燃发电 CDM 项目的 GHG 减排计算见表 2, $CER_{s,y}$ 为 16.75×10^4 t/a, 则获得的 GHG 减排效益为 2.51×10^6 美元/a。

表 2 25 MW 生物质直燃发电 GHG 减排量
Table 2 Greenhouse gas emission reduction of 25 MW biomass direct combustion power generation

基准线排放量 BE_y	项目本身排放量 PE_y	泄露引起的排放量 L_y	某年份 y 的核准减排量 $CER_{s,y}$
16.89	0.14	0	16.75

按照能值分析的基本步骤和方法,对 25 MW 生物质直燃发电系统进行能值分析,结果见表 3。

表 3 生物质直燃发电系统能值分析
Table 3 Emery analysis of biomass direct combustion power generation system

项 目	消耗定额	能值转换率 ^[7,13]	太阳能值/(sej·a ⁻¹)
系统输入			
棉花秆 R_1	2.12×10^{15} J/a	1.90×10^4 sej/J	4.02×10^{19}
冷却水 R_2	3.35×10^{14} J/a	1.90×10^4 sej/J	6.36×10^{18}
空气 R_3	5.31×10^8 m ³ /a	6.68×10^{10} sej/m ³	3.55×10^{19}
投资、运行、维护 F	1.88×10^7 \$/a	3.46×10^{12} sej/\$	6.51×10^{19}
系统输出			
电价补贴 F_Y	4.96×10^6 \$/a	3.46×10^{12} sej/\$	1.72×10^{19}
GHG 减排效益 F_{CDM}	2.51×10^6 \$/a	3.46×10^{12} sej/\$	8.69×10^{18}
电 Y (不考虑 F_{CDM})	4.86×10^{14} J/a	2.67×10^5 sej/J	1.30×10^{20}
电 Y (考虑 F_{CDM})	4.86×10^{14} J/a	2.49×10^5 sej/J	1.21×10^{20}

生物质直燃发电系统的能值可持续评价指标按式 (7) ~ (10) 计算。若不注册为 CDM 项目,则式 (7) ~ (10) 中的 GHG 减排效益 F_{CDM} 取 0, 计算结果如图 2 所示。

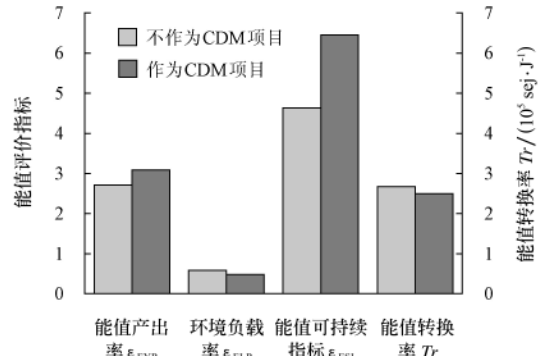


图 2 生物质直燃发电的可持续评价指标
Fig.2 Sustainability evaluation indexes of biomass direct combustion power generation

由图 2 可知,生物质直燃发电作为 CDM 项目,获得 GHG 减排效益后,可以有效改善各能值指标:提高系统的能值产出率 ϵ_{EYR} ,降低环境负载率 ϵ_{ELR} ,增加系统可持续性指标 ϵ_{ESI} ,输出电能的能值转换率 Tr 也所有降低,使生物质直燃发电更具有竞争力。

获得 GHG 减排效益后,生物质直燃发电 CDM 项目的 ϵ_{EYR} 为 3.09,与燃煤发电 ($\epsilon_{EYR}=4\sim8^{[14-15]}$) 相比,并没有优势。这主要因为,生物质直燃发电规模较小,投资运行成本比燃煤发电成本大得多,使得投入的货币能值 F 较大。

生物质直燃发电过程中投入的不可再生资源能值 N 对于系统的贡献可以忽略不计。并且,可再生能源发电补贴和 CDM 项目产生的 GHG 减排效益,减少了净社会能值 ($F-F_Y-F_{CDM}$) 的投入,因此其 ϵ_{ELR} 很低,属于低环境负荷系统。相对燃煤发电 ($\epsilon_{ELR}=5\sim15^{[14-15]}$) 这类高环境负荷系统,生物质直燃发电既节约了不可再生资源,又大大减少对环境压力。

生物质直燃发电充分利用可再生资源, ϵ_{ESI} 较高,比燃煤发电 ($\epsilon_{ESI}=0.2\sim1^{[14-15]}$) 有显著的优势,显示出良好的可持续发展性。生物质直燃发电 CDM 项目不仅能获得额外 GHG 减排效益,而且使系统的 ϵ_{ESI} 提高到 6.45。表明该系统富有活力和发展潜力,可在较长时间内持续发展^[16]。

4 结 论

生物质直燃发电作为 CDM 项目,引入发达国家资金和关键技术,不仅可有效增大系统的能值产出率,降低环境负荷,使生物质直燃发电系统更具有竞争力,还能使系统能值可持续指标提高,使之富有活力和发展潜力,可维持较长时间内的可持续发展。

[参 考 文 献]

[1] 王久臣,戴林,田宜水,等. 中国生物质能产业发展现状

- 及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (9): 276—282.
- Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23 (9): 276—282. (in Chinese with English abstract)
- [2] McKendry P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 47—54.
- [3] Odum H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley, 1996.
- [4] Herendeen R A. Energy analysis and emergy analysis—a comparison[J]. Ecological Modelling, 2004, 178(1/2): 227—237.
- [5] Jiang Meiming, Chen Bin, Zhou Jjiangbo, et al. Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China[J]. Energy Policy, 2007, 35(9): 4704—4719.
- [6] Vassallo P, Paoli C, Fabiano M. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater[J]. Ecological Engineering, 2009, 35 (5): 687—694.
- [7] Cao Kai, Feng Xiao. The emergy analysis of multi-product systems[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2007, 85(5): 494—500.
- [8] 陆宏芳, 陈烈, 林永标, 等. 基于能值的顺德市农业系统生态经济动态[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 20—24.
- Lu Hongfang, Chen Lie, Lin Yongbiao, et al. Emergy based ecological economic dynamics of Shunde agriculture system [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21 (12): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张洁瑕, 郝晋珉, 段瑞娟, 等. 黄淮海平原农业生态系统演替及其可持续性的能值评估[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 102—108.
- Zhang Jiexia, Hao Jinmin, Duan Ruijuan, et al. Emergy assessment on succession and sustainability of the agro-ecosystem in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 102—108. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李玉娥, 董红敏, 万运帆, 等. 规模化养鸡场 CDM 项目减排及经济效益估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 194—198.
- Li Yu'e, Dong Hongmin, Wan Yunfan, et al. Emission reduction from Clean Development Mechanism projects on intensive livestock farms and its economic benefits[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 194—198. (in Chinese with English abstract)
- [11] United Nations Framework Convention on Climate Change. ACM0006: Consolidated methodology for electricity generation from biomass residues (Version 08) [EB/OL]. [2009-04-08] <http://cdm.unfccc.int/methodologies>.
- [12] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 关于确定 2008 中国区域电网基准线排放因子的公告[EB/OL]. (2008-12-30) <http://cdm.ccchina.gov.cn>.
- [13] Lan S F, Odum H T, Liu X M. Energy flow and emergy analysis of the agroecosystems of China[J]. Ecologic Science, 1998, 17(1): 33—39.
- [14] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 321—334.
- [15] 王灵梅, 倪维斗, 李政, 等. 基于能值的不同煤基发电系统的可持续性评价[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (13): 98—102.
- Wang Lingmei, Ni Weidou, Li Zheng, et al. Sustainability evaluation of coal generation electricity system based on emergy account[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (13): 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [16] Ulgiati S, Brown M T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: The case of electricity production[J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10 (4): 335—348.

Sustainability evaluation on CDM project of biomass direct combustion power generation based on emergy theory

Luo Yuhe, Ding Lixing*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: The sustainability evaluation on the clean development mechanism (CDM) project of biomass direct combustion power generation required quantitative analysis from the aspects such as economic, social and environmental benefits. The emergy analysis of the CDM project was conducted and its emergy sustainability evaluation indexes were established with the emergy theory. As the case of 25 MW biomass direct combustion power generation CDM project in Central China, the system's sustainable performance was evaluated. The results showed that the CDM project could bring the benefit of 2.51 million US dollars annually for greenhouse gas (GHG) emission reduction. Because the benefit effectively increased the emergy yield ratio and reduced the environmental load of the power generation system, the system had not only been higher competitiveness, the emergy sustainability indexes of the system could be increased to 6.45 which can cause the system to be in the potential and sustainable development process for a long time.

Key words: biomass, power generation, sustainable development, clean development mechanism (CDM), emergy theory