

基于 DEA 的燃煤电厂循环经济评价研究^{*}

曾绍伦^{1,2} 任玉珑² 王伟³

(1. 四川理工学院经济管理学院, 四川 自贡 643000; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400030;
3. 四川理工学院政法学院, 四川 自贡 643000)

摘要 燃煤电厂是我国大部分地区的主要污染源, 燃煤电厂实施循环经济既是环境保护的需要, 也是节能减排的有效途径。在调查收集 10 个燃煤电厂生产数据的基础上, 构建了常规燃煤电厂的循环经济评价指标体系, 主要指标有: 资源产出、资源消耗、综合利用和废物排放。基于此建立了燃煤电厂循环经济评价的投入—产出指标。应用数据包络分析 (DEA) 方法的 C^2S 模型和 C^2GS^2 模型对燃煤电厂循环经济的规模有效性和技术有效性进行了评价。结果表明, 电厂 P02, P03 和 P07 的规模收益呈递增趋势, 即增加投入会增加一定的污染, 但可以使产出有较大效率的增加。进一步的分析表明, 电厂 P02 和 P03 的技术效率为 1, 其循环经济的实施在技术上是有效的 (但在规模上是无效的); P07 在技术上是无效的。通过其投入冗余和产出冗余, 计算出 P07 实施循环经济的目标值, 为循环经济改进提供了依据。

关键词 燃煤电厂; 循环经济评价; 数据包络分析

中图分类号 TK01; X37

文献标识码 A

文章编号 1002-2104(2009)03-0113-06

1978 至 2007 年的 30 年间, 中国电力工业得到迅速发展, 发电装机容量由 1978 年的 5 712 万 kw 增加到 2007 年的 71 329 万 kw, 年均增长速度为 8.9%。由于煤炭在一次能源结构中的主导地位, 决定了电力生产中以煤电为主的格局。2007 年, 火电机组的发电量占总发电量的 82.9%, 其中煤电占总发电量的 76%, 所消耗的煤炭占煤炭总产量的 34%^[1]。能源研究所 IPAC 模型研究组对中国电力部门未来发展的预测结果表明, 到 2020 年中国的电力装机容量将达到 9.61 亿 kw, 发电量达到 4.44 万亿 kwh; 到 2030 年中国的电力装机容量将继续增加到 12.4 亿 kw, 发电量增加到 5.95 万亿 kwh。燃煤电厂装机容量将在 6.0 亿 kw, 仍占 60%^[2]。燃煤电厂在生产过程中产生大量的温室气体以及二氧化硫、氮氧化物、粉尘、废水等多种污染物, 使燃煤电厂的发展与建设受到环境的严重制约。为此, 国内的燃煤电厂以清洁生产为基础, 废物循环利用为途径, 在技术创新和管理创新方面取得显著成效。为评价燃煤电厂的循环经济发展水平, 调查获得 10 个燃煤电厂的生产数据, 在综合分析循环经济评价方法^[3~26]的基础上, 应用数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 的方法, 对燃

煤电厂的规模有效性和技术有效性进行了评价。

1 DEA 模型

DEA 自 1978 年由 Charnes 和 Cooper 等人创建, 并由中国人民大学魏权龄教授等介绍到国内以来, 在运筹学、管理科学和经济学等领域取得了相当丰富的研究成果, 研究文献不断涌现。DEA 的应用主要是评价多个输入和多个输出的部门或单位间的相对有效性; 由于其相对客观, 得到了研究人员的普遍认同。近年来, 在循环经济评价方面也有很大的进展, 主要是评价循环经济的运行效率^[27, 28]和相对有效性^[29~31]。

DEA 模型有 C^2R 和 C^2GS^2 模型两种。其中 C^2R 模型对决策单元规模有效性和技术性同时进行评价, 即 C^2R 模型中的 DEA 有效的决策单元既是规模适当又是技术管理水平高的评价方法; C^2GS^2 模型用于专门评价决策单元技术有效性。对于循环经济评价, 首先使用 C^2R 模型评价其相对有效性; 若 DEA 有效 (规模、技术同时有效), 则循环经济发展相对有效; 若 DEA 无效, 采用 C^2GS^2 模型分析其技术有效性, 评价在发展循环经济过程中是否基于减量

收稿日期: 2009-03-26

作者简介: 曾绍伦, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为能源经济学、环境经济学及环境评价。

* 该文受国家自然科学基金 (90510016), 四川省哲学社会科学重点研究基地、四川省教育厅人文社会科学重点研究基地, 四川循环经济研究中心重点课题 (XHJJ06-05, XHJJ-0824) 的资助。

化、资源化和无害化的循环经济基本原则减少要素投入和控制污染产出。根据对 C^2R 模型和 C^2GS^2 模型的计算,可以调整生产要素投入或污染要素产出,使其达到技术有效;进一步地,可以达到 DEA 有效。由此,可以分别计算出达到技术有效和 DEA 有效的投入冗余或产出不足,以对循环经济进行改进。

另外,DEA 模型可分为产出导向与投入导向两种模型,基于循环经济减量化投入的基本原则,本文使用“投入导向”的 DEA 模型进行效率分析。

(1) C^2R 模型

$$\begin{cases} \min \left[\theta - \epsilon \left(\sum_j s_j^- + \sum_j s_j^+ \right) \right] = V_D \\ s. t. \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + s_j^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j - s_j^+ = Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; s_j^- \geq 0, s_j^+ \geq 0 \end{cases}$$

若线性规划的最优解 θ^* 、 λ^* 、 s^{*-} 、 s^{*+} , 则: $\theta^* = 1$ 且 $s^{*-} = s^{*+} = 0$, 决策单元为 DEA 有效; $\theta^* = 1$ 但 s^{*-} 或 $s^{*+} \neq 0$, 决策单元为 DEA 弱有效; $\theta^* < 1$, 决策单元 DEA 无效。

令 $k = \frac{1}{\theta^*} \sum_{j=1}^n \lambda_j$, 当 $k=1$ 时, 规模收益不变, 投入规模和污染物产生量都处于最适当的水平; $k>1$, 收益递减, 增加投入会使污染物产生量不断增大, 且产出增加的效率不高; $k<1$, 规模收益递增, 增加投入会增加一定的污染, 但可以使产出有较大效率的增加。

(2) C^2GS^2 模型

$$\begin{cases} \min \left[\theta - \epsilon \left(\sum_j s_j^- + \sum_j s_j^+ \right) \right] = V_D \\ s. t. \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + s_j^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j - s_j^+ = Y_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; s_j^- \geq 0, s_j^+ \geq 0 \end{cases}$$

C^2GS^2 模型实际上是在 C^2R 模型的约束条件中增加了 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$, 通过 C^2GS^2 模型计算, 可以分析出在 C^2R 模型计算中 DEA 无效的决策单元是否为技术有效, 即: 若 $\theta^* = 1$, 则决策单元为技术有效而规模无效; 若 $\theta^* < 1$, 则决策单元为技术和规模均无效。

2 燃煤电厂的循环经济评价指标体系

2.1 评价指标体系的构建

基于物质流分析的燃煤电厂循环经济评价指标体系是评价燃煤电厂经济活动效率和循环经济发展的重要指标。结合发改委等部颁发的《循环经济指标体系》, 从物质流分析方法出发, 同时考虑国内燃煤电厂生产实际和环境保护政策等因素, 构建出燃煤电厂循环经济评价指标体系, 见表 1。

2.2 投入—产出指标

目前, DEA 方法在许多领域都有应用, 但在循环经济评价研究中应用不多, 其关键是没有解决循环经济评价中污染物排放作为一种无效输出如何引入到模型中的问题。在评价效率时, 通常是输出越大越好, 但污染物排放却恰恰相反。在目前的技术水平下, 污染物的产生就如同生产中必须要投入生产要素才能生产出产品一样, 是不可避免的。污染物作为决策单元的输出, 从循环经济的角度, 它是一种不希望的输出, 应尽量减少这些输出。当进行循环经济评价时, C^2R 模型和 C^2GS^2 模型均不可用^[36~38]。因此, 只有将污染排放看作一种负的产出或者说一种投入, 才能使用 DEA 的相关模型进行计算和评价^[39]。

燃煤电厂循环经济评价中的投入指标和产出指标的选择上更多考虑的是指标的可操作性。结合已构建的循环经济评价指标体系, 投入指标和产出指标见表 2。

表 1 燃煤电厂循环经济评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for circular economy of coal-fired power plant

资源产出指标 Resource output indicators		资源消耗指标 Resource consumption indicators			综合利用指标 Comprehensive utilization indicators		废物排放指标 Waste discharge indicators		
资源产出率	单位发电企业生产总产值	单位生产 总值煤耗	单位生产 总值能耗	单位生产 总值水耗	固体废物综 合利用率	水循环 利用率	单位生产 总值 固体废物排放	单位生产 总 值废水排 放	单位生产 总 值废气排 放

指标说明: 资源产出率 = 企业生产总产值 / 主要资源消耗量, 单位发电企业生产总产值 = 企业生产总产值 / 发电量, 单位生产总产值煤耗 = 标准煤消耗量 / 企业生产总产值, 单位生产总产值能耗 = 用电量 / 企业生产总产值, 单位生产总产值水耗 = 用水量 / 企业生产总产值, 固体废物综合利用量 / 固体废物产生量, 水循环利用率 = 循环用水量 / 用水总量, 单位生产总产值固体废物排放 = 固体废物最终排放量 / 企业生产总产值, 单位生产总产值废水排放 = 废水最终排放量 / 企业生产总产值, 单位生产总产值废气排放 = 废气最终排放量 / 企业生产总产值。

表 2 10 个燃煤电厂的投入产出情况
Tab.2 The input-output data of 10 coal-fired power plants

电厂 Plants	投入指标 Input indicators								产出指标 Output indicators			
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	Y1	Y2	Y3	Y4
P01	426.12	8.37	1.593	339.04	0.49	2.35	0.87	112.20	2.347	0.286	0.749	0.623
P02	624.58	7.76	1.153	216.78	2.30	4.28	2.45	115.13	1.601	0.123	0.845	0.524
P03	524.78	5.28	1.365	115.19	1.37	4.23	1.56	77.12	1.906	0.432	0.649	0.721
P04	321.10	2.02	2.107	57.76	1.50	1.07	0.35	34.21	3.114	0.631	0.750	0.598
P05	299.66	1.84	1.798	124.94	1.40	0.99	0.34	32.47	3.337	0.537	0.823	0.568
P06	257.15	1.99	1.738	58.97	1.47	1.02	0.33	26.25	3.889	0.768	0.750	0.711
P07	433.40	6.27	2.170	227.38	1.80	3.35	0.99	87.55	2.307	0.202	0.773	0.601
P08	389.66	5.21	1.879	113.08	0.57	2.91	1.77	65.65	2.566	0.196	0.685	0.437
P09	222.16	1.77	1.275	66.79	0.99	1.37	1.95	23.11	4.501	0.885	0.972	0.737
P10	198.98	6.86	2.230	337.56	2.11	2.89	2.17	105.23	5.026	0.323	0.889	0.662

注:(1)投入指标;X1,单位产值煤耗;X2,单位产值水耗;X3,单位产值能耗;X4,单位产值粉煤灰产生量;X5,单位产值烟尘排放量;X6,单位产值二氧化硫排量;X7,单位产值二氧化氮排放量;X8,单位产值废水排放量。(2)产出指标;Y1,资源产出率;Y2,粉煤灰利用率;Y3,循环水利用率;Y4,单位发电企业生产总值。

3 结果与讨论

3.1 样本数据选择

调研了 10 个燃煤电厂的生产运行情况和相关数据,并结合投入—产出指标体系进行计算 DEA 模型分析所需的数据,见表 2。

3.2 C²R 模型分析

对表 2 中的数据,采用 DEAP 软件进行计算 ($\epsilon = 10^{-5}$),结果见表 3。从 DEA C²R 模型评价的结果可以看出,除电厂 P02、P03、P07 外,其余电厂均相对有效,且规模收益均不变。电厂 P02、P03、P07 的规模收益均递增,即增加投入会增加一定的污染,但可以使产出有较大效率的增加。

3.3 C²GS² 模型分析

根据前文所述,对 DEA 无效的电厂(决策单元)进一步采用 C²GS² 模型进行评价,以分析其技术有效性(表 4)。结果表明,电厂 P02 和 P03 的技术效率为 1,其循环经济的实施在技术上是有效的(但在规模上是无效的);P07 在技术上是无效的,通过其投入冗余和产出冗余,可以计算出其目标值(表 5),以作为循环经济改进的依据。

4 结论及建议

我国环境保护的道路任重道远,燃煤电厂作为污染的

主要来源,在相当长的一段时间内,肩负着艰巨的节能减排任务。一方面我们要调整我国的能源结构,降低燃煤电厂以及其他火电厂在能源结构中的比重;另一方面,燃煤电厂的生产必须按照电力—经济—环境协调发展的基本要求,建设基于生态工业园区的循环经济模式,在园区内实现物质流的小循环,尽最大可能减少煤电生产对环境的

表 3 燃煤电厂循环经济 DEA 评价结果(C²R 模型)

Tab.3 Circular economy assessment result of coal-fired power plant by DEA (C²R model)

DMU	θ^*	DEA 有效性 DEA validity	规模收益 Returns to scale
P01	1.000	有效	不变
P02	0.961	无效	递增
P03	0.998	无效	递增
P04	1.000	有效	不变
P05	1.000	有效	不变
P06	1.000	有效	不变
P07	0.935	无效	递增
P08	1.000	有效	不变
P09	1.000	有效	不变
P10	1.000	有效	不变

表4 燃煤电厂循环经济 DEA 评价结果(C²GS²模型)Tab.4 Circular economy assessment result of coal-fired power plant by DEA (C²GS² model)

DMU	θ^{*}	技术效率 Technique efficiency	投入冗余 Input redundancy								产出冗余 Output redundancy			
			s ₁ ⁻	s ₂ ⁻	s ₃ ⁻	s ₄ ⁻	s ₅ ⁻	s ₆ ⁻	s ₇ ⁻	s ₈ ⁻	s ₁ ⁺	s ₂ ⁺	s ₃ ⁺	s ₄ ⁺
P02	1.000	有效	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
P03	1.000	有效	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
P07	0.746	无效	34.83	2.09	0.000	91.32	0.00	1.01	0.00	30.27	1.391	0.526	0.000	0.111

注:(1)投入冗余;s₁,单位产值煤耗;s₂,单位产值水耗;s₃,单位产值能耗;s₄,单位产值粉煤灰产生量;s₅,单位产值烟尘排放量;s₆,单位产值二氧化硫排放量;s₇,单位产值二氧化氮排放量;s₈,单位产值废水排放量。(2)产出冗余;s₁,资源产出率;s₂,粉煤灰利用率;s₃,循环水利用率;s₄,单位发电企业生产总值。

表5 燃煤电厂循环经济改进分析

Tab.5 Analysis of circular economy improvement for coal-fired power plant

电厂 P07 Plant	投入指标 Input indicators								产出指标 Output indicators			
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	Y1	Y2	Y3	Y4
实际值	433.40	6.27	2.170	227.38	1.80	3.35	0.99	87.55	2.307	0.202	0.773	0.601
目标值	288.57	2.59	1.619	78.35	1.34	1.49	0.74	35.06	3.698	0.728	0.773	0.712

注:(1)投入指标:X1,单位产值煤耗;X2,单位产值水耗;X3,单位产值能耗;X4,单位产值粉煤灰产生量;X5,单位产值烟尘排放量;X6,单位产值二氧化硫排放量;X7,单位产值二氧化氮排放量;X8,单位产值废水排放量。(2)产出指标:Y1,资源产出率;Y2,粉煤灰利用率;Y3,循环水利用率;Y4,单位发电企业生产总值。

影响,才能促进发电企业的可持续发展;同时必须加强对循环经济实施过程以及实施效果的评估。根据“减量化”、“资源化”、“无害化”这一循环经济的基本原则构建的燃煤电厂循环经济评价指标体系,可以应用于目前的燃煤发电企业实施循环经济的动态评价,也可用于煤电行业内不同发电企业之间的横向比较。基于DEA的循环经济评价从相对有效性的角度,评价燃煤电厂循环经济的实施,评价的结果可以为燃煤电厂进行循环经济改进提供依据。但DEA评价模型由于其自身的局限,在循环经济评价中需要不断完善,如对于不同阶段(时间序列数据)的循环经济评价,必须把技术进步作为一个重要的参数来改进DEA模型。另外,由于基于DEA模型的评价是一种相对评价,在循环经济实施、评价过程中,仍需要结合循环经济发展水平或循环经济度的评价,把相对评价和绝对评价结合起来,才能使燃煤电厂循环经济不断改进,才能使循环经济评价能够指导电力生产和对节能减排作出贡献。

(编辑:李琪)

参考文献(References)

[1]CEC. 2007年全国电力工业统计快报一览表[Z]. 中国电力企业联合会,2007. [CEC. National Electrical Industry Statistics of China 2007 [Z]. China Electricity Council, 2007.]

[2]IEA. 世界能源展望 2006 [R]. 国际能源署,2006. [IEA. World Energy Outlook 2006 [R]. International Energy Agency, 2006.]

[3]史宝娟,赵国杰. 城市循环经济系统评价指标体系与评价模型的构建研究[J]. 现代财经,2007,27(5):3~6. [Shi Baojuan, Zhao

Guojie. Study on Construction of Target System and Evaluation Mode for City Cycle Economy System [J]. Modern Finance & Economics, 2007, 27(5):3~6.]

[4]贾士靖,刘银仓,王丽丽. 我国农业循环经济发展水平模糊综合评价[J]. 农机化研究,2008,(10):1~4. [Jia Shijing, Liu Yincang, Wang Lili. The Fuzzy Comprehensive Evaluation for the Level of Agricultural Recycling Economy in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, (10):1~4.]

[5]王雅丽,刘洋. 基于循环经济的区域REE系统模糊多级综合评价研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(19):8370~8372. [Wang Yali, Liu Yang. Research on Fuzzy multi-level Comprehensive Evaluation of Rational REE System in the View of the Circular Economy [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(19):8370~8372.]

[6]江涛,张天柱. 煤炭行业循环经济发展模式与指标体系研究[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(6):87~90. [Jiang Tao, Zhang Tianzhu. Research on Coal Industry Circular Economy Development Model and Index System [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(6):87~90.]

[7]王晶,程茜,乞建勋. 循环经济企业绩效模糊综合评价[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2008,(1):41~46. [Wang Jing, Cheng Qian, Qi Jianxun. The Fuzzy Integrative Evaluation on the Corporation Performance of Circular Economy [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2008, (1):41~46.]

[8]欧阳春花. 循环经济视角下的企业自主创新能力评价指标研究[J]. 科学管理研究,2008,26(4):21~24. [Ouyang Chunhua. The Research of Evaluation Index System for Enterprise Independent Innovation Ability Based on Cycle Economics [J]. Scientific Management Research,



- 2008,26(4):21~24.]
- [9]徐青. 基于循环经济的经济增长评价问题研究[D]. 南京:河海大学, 2006. [Xu Qing. A Research on the problem of economic growth evaluation based on recycling economy [D]. Nanning: Hohai University, 2006.]
- [10]孙建卫,黄贤金,马其芳. 基于灰色关联分析的区域农业循环经济发展评价——以南京市为例[J]. 江西农业大学报,2007,29(3):508~512. [Sun Jianwei, Huang Xianjin, Ma Qifang. Evaluation of the Development of Regional Agricultural Recycling Economy by Gray Relational Analysis: A Case Study of Nanjing City [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(3): 508~512.]
- [11]章波,黄贤金. 循环经济发展指标体系研究及实证评价[J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(3):22~25. [Zhang Bo, Huang Xianjin. Research on Circular Economy Development Indicator System and Demonstrable Assessment [J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 15(3): 22~25.]
- [12]贺丹. 区域循环经济发展的评价体系构建与政策研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006. [He Dan. Evaluation System Build and Policy Study on Regional Circular Economy Development [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.]
- [13]吴开亚. 巢湖流域农业循环经济发展的综合评价[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(1):94~98. [Wu Kaiya. Comprehensive Evaluation on the Development of Agricultural Circular Economy in Chaohu Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(1): 94~98.]
- [14]冯艳飞,贺丹. 基于熵值法的区域循环经济发展综合评价[J]. 环境科学与管理,2006,31(6):177~179. [Feng Yanfei, He Dan. The Synthetic Evaluation of Regional Recycling Economy Development Base on Entropy Method [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(6): 177~179.]
- [15]马其芳,黄贤金,彭补拙等. 区域农业循环经济发展评价及其实证研究[J]. 自然资源学报,2005,20(6):891~899. [Ma Qifang, Huang Xianjin, Peng Buzhuo, et al. A Positive Study of the Evaluation on the Development of Regional Agricultural Recycling Economy [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(6): 891~899.]
- [16]晏永刚. 重庆市循环经济测度指标体系与评价方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2007. [Yan Yonggang. Study on Measurement Indicator System and Evaluation Method of Circular Economy in Chongqing Municipality [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.]
- [17]黄海峰,李慧颖,刘娜. 北京发展循环经济的分析与评价[J]. 北京工业大学学报,2007,33(9):979~984. [Huang Haifeng, Liu Huiying, Liu Na. Analysis and Evaluation of Circular Economy Development in Beijing [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(9): 979~984.]
- [18]陈德华,周敏倩. 城市循环经济发展指标体系及综合评价研究——以南京市为例[J]. 价值工程,2007,(9):21~25. [Chen Dehua, Zhou Minqian. A Research on the Index System and Comprehensive Evaluation of Circular Economy Development: Take Nanjing City as an Example [J]. Value Engineering, 2007, (9): 21~25.]
- [19]刘浩,宋阳. 循环经济发展能值评价及实证研究[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(1):79~83. [Liu Hao, Song Yang. Energy Evaluation on the Development of Circular Economy and Empirical Study [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(1): 79~83.]
- [20]史宝娟,赵国杰. 基于能值理论的循环经济系统评价方法初探[J]. 生态经济,2006,(4):87~89. [Shi Baojuan, Zhao Guojie. On the Method of Circular Economical System Based on Energy Theory [J]. Ecological Economy, 2006, (4): 87~89.]
- [21]刘浩,王青,宋阳等. 基于能值分析的区域循环经济研究——以辽宁省为例[J]. 资源科学,2008,30(2):192~198. [Liu Hao, Wang Qing, Song Yang, et al. Evaluating Regional Circular Economy Based on Energy Theory: A Case Study in Liaoning Province [J]. Resources Science, 2008, 30(2): 192~198.]
- [22]卢远,王娟,陆赛. 区域农业循环经济能值评价的实证研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(2):482~487. [Lu Yuan, Wang Juan, Lu Sai. Empirical Research on Energy Evaluation of Regional Agricultural Recycling Economy [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(2): 482~487.]
- [23]向来生,郭亚军,孙磊等. 循环经济评价指标体系分析[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(2):76~78. [Xiang Laisheng, Guo Yajun, Sun Lei, et al. Analysis of Assessment System of Circular Economy [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(2): 76~78.]
- [24]熊国强,潘泉,张洪才. 西部地区循环经济发展综合评价[J]. 科学管理研究,2008,26(3):53~56. [Xiong Guoqiang, Pan Quan, Zhang Hongcai. Study on Comprehensive Evaluation of Circular Economy Development in West China [J]. Scientific Management Research, 2008, 26(3): 53~56.]
- [25]冯华,宋振湖. 山东省农业循环经济发展评价[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(4):94~98. [Feng Hua, Song Zhenhu. Evaluation on Development of the Agriculture Circular Economy in Shandong Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(4): 94~98.]
- [26]白露,白永秀,薛耀文等. 中国省区循环经济预评估及区域差异研究[J]. 地理科学,2007,27(2):149~155. [Bai Lu, Bai Yongxiu, Xue Yaowen, et al. Circular Economy Beforehand Evaluation of Provinces and Regional Diversity [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(2): 149~155.]
- [27]王波. 基于 DEA 的城市循环经济运行效率分析[J]. 生态经济,2007,(S1):57~59. [Wang Bo. Research on Urban Circular Economy Operation Efficiency Based on DEA [J]. Ecological Economy, 2007, (s1): 57~59.]
- [28]黎雪林. 我国循环经济的系统分析、评价与管理研究[D]. 广州:暨南大学,2007. [Li Xuelin. Research on System Analysis, Evaluation and Management of Circular Economy of China. Guangzhou: Jinan University, 2007.]
- [29]王棵,于苏俊. 基于 DEA 的农业循环经济相对有效性评价——以四川省为例[J]. 安徽农业科学,2008,36(13):5633~5635.



- [Wang Ke, Yu Sujun. Relative Efficiency Evaluation of Agricultural Circular Economy Based on DEA [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(13): 5633~5635.]
- [30] 王宁沈, 易荣华, 王伟. 基于 DEA 的循环经济相对有效性研究——以华东地区五省一市为例[J]. 科技管理研究, 2007, (8): 93~94, 100. [Wang Ningshen, Yi Ronghua, Wang Wei. Research on Relative Efficiency of Recycling Economic Based on DEA [J]. Science and Technology Management Research, 2007, (8): 93~94, 100.]
- [31] 梁广华, 李冠峰. 循环经济模式下区域经济发展的 DEA 评价[J]. 河南农业大学学报, 2007, 41(5): 569~573. [Liang Guanghua, Li Guanpeng. DEA Evaluation on Regional Economy Development Under the Mode of Circular economy [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2007, 41(5): 569~573.]
- [32] 黄和平, 毕军. 基于物质流分析的区域循环经济评价——以常州市武进区为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 20~27. [Huang Heping, Bi Jun. Evaluating Regional Circular Economy Based on MFA: A Case Study in Wujin District of Changzhou City [J]. Resources Science, 2006, 28(6): 20~27.]
- [33] 石磊, 张天柱. 贵阳市循环经济发展度量的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(5): 63~66. [Shi Lei, Zhang Tianzhu. Circular Economy Indicators to Evaluate Regional Development: Take Guiyang as an Example [J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 15(5): 63~66.]
- [34] 杨顺顺, 栾胜基, 王颖. 基于负产品投入产出分析的循环经济定量评价及实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(6): 77~82. [Yang Shunshun, Luan Shengji, Wang Ying. The Quantitative Evaluation and Case Study for Circular Economy Based on Input-output Analysis Connected by Side Products [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(6): 77~82.]
- [35] 张杰, 沈继红, 张仁忠. 城市循环经济发展水平动态评价研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007, 32(1): 79~83. [Zhang Jie, Shen Jihong, Zhang Renzhong. The Study on the Development Level of the City's Circular Economy [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2007, 32(1): 79~83.]
- [36] Seiford LM, Zhu J. Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(1): 16~20.
- [37] Scheel H. Undesirable Outputs in Efficiency Valuations [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 132(2): 400~410.
- [38] Vencheh AH, Matinb RK, Kajani MT. Undesirable Factors in Efficiency Measurement [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 163(2): 547~552.
- [39] 宋新山, 汪永辉, 路献品. 数据包络分析(DEA)模型在清洁生产评价中的应用[J]. 四川环境, 2003, 22(5): 58~62. [Song Xinshan, Wang Yonghui, Lu Xianpin. Application on Cleaner Production Assessment of Data Envelopment Analysis Model [J]. Sichuan Environment, 2003, 22(5): 58~62.]

Assessment of Circular Economy for Coal-fired Power Plant Based on Data Envelopment Analysis

ZENG Shao-tun^{1,2} REN Yu-tong² WANG Wei³

(1. School of Economics and Management, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong Sichuan 643000, China;

2. College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. School of Politics and Law, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong Sichuan 643000, China)

Abstract Coal-fired power plants are the main pollution source in most parts of China. The implementation of circular economy in coal-fired power plants is necessary for environmental protection and also an effective way of energy-saving and emission reduction. With the survey data of 10 coal-fired power plants' production, we set up an evaluation index system of circular economy for conventional coal-fired power plants. The index system includes the resource output indicator, the resource consumption indicator, the resource utilization indicator and the waste discharge indicator. Based on this, the input-output indicators for circular economy assessment are put forward. The C^2S model and C^2GS^2 model of data envelopment analysis (DEA) are applied to evaluate the scale efficiency and technical efficiency of the circular economy of coal-fired power plants respectively. The result shows that the returns to scale of coal-fired plants P02, P03 and P07 show an increasing tendency. That's to say, to increase the input will increase a certain pollutant, but the output will increase with a larger efficiency. Further analysis shows that the technical efficiency of plants P02 and P03 is 1, which indicates that their implementation of circular economy is technically effective while ineffective in the scale. Plant P07 is ineffective in both scale and technique. With the input-output redundancy, we can calculate the projected value of plant P02, P03 and P07. In this way, we provide a method for the improvement of circular economy.

Key words coal-fired power plant; circular economy assessment; data envelopment analysis