

基于熵权法的广东省核电节能减排效果 综合评价研究

刘晓敏¹, 刘志辉², 石喆³

(1. 河北经贸大学 经济研究所, 石家庄 050061; 2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082;
3. 河北经贸大学 人事处, 石家庄 050061)

摘要: 以广东省为例分析发展核电以来节能减排的综合效益, 通过 1993-2010 年广东省统计数据, 应用熵权法, 从能源消耗强度、污染物排放、污染物治理与利用和经济效益四方面对广东省核电节能减排效果进行综合评价。结果表明, 1993-2010 年期间, 广东省核电节能减排综合效果呈上升趋势; 单位 GDP 煤炭和石油消耗总量、火电生产和 CO₂ 排放总量、单位 GDP 综合能耗呈下降趋势; 单位 GDP 核电和水电生产总量变化幅度不大, 但是核电和水电在电力供应中所占比例较小。

关键词: 核电; 节能减排; 熵权法; 评价

中图分类号: F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0031-05

Comprehensive Evaluation the Nuclear Power Energy Saving and Emission Reduction of Guangdong Province Based on the Entropy Method

LIU Xiaomin¹, LIU Zhihui², SHI Zhe³

(1. Institute of Economics Study, Hebei University of Economics & Business, Shijiazhuang 050061, China;
2. Nuclear and Radiation Safety Center of MEP, Beijing 100082, China;
3 Human Resources Department, Hebei University of Economics & Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Guangdong province is taken to analyze the comprehensive effect of energy saving and emission reduction since the development of nuclear power. According to the statistic data by Guangdong province from 1993 to 2010, Entropy method should be applied to make a comprehensive evaluation on energy saving and emission reduction effect in terms of four aspects, namely, energy consumption, pollutants emission, pollution control, and economic benefit. The result shows the comprehensive effect of energy saving and emission reduction presents the tendency of increasing in Guangdong province during 1993-2010. Meanwhile, total consumption of coal and petrol per unit of GDP, the total production of thermal power and total emission of CO₂, and comprehensive energy consumption present a tendency of decreasing. The total production of nuclear power and hydropower per unit of GDP varies within a small range, but nuclear power and hydropower account for a small percentage in the power supply.

Key words: nuclear power; energy saving and emission reduction; entropy method; evaluation

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 2016 年度河北省社会科学基金项目“京津冀农村能源消费结构优化问题研究”(HB16YJ048); 2014 年度国家软科学研究计划项目(2014GXQ4D176); 2015 年度河北省社会科学基金项目“京津冀服务业能源消费碳排放影响因素研究”(HB15YJ065)

作者简介: 刘晓敏(1975), 女, 河北蠡县人, 副研究员, 博士, 主要从事资源与环境经济、政策分析研究工作(e-mail) liuxiaominhuanhuan@163.com。

广东省缺少煤炭、气、油等能源资源, 受资源、运输和环境的制约, 单纯依靠发展煤电或者水电的道路变得越来越困难, 为了确保可持续发展广东省谋求以煤、水、油、气、核和可再生能源等构成的多元化的电源结构^[1]。广东省大亚湾核电站是中国首座引进先进技术、设备和资金建设的大型商用核电站, 核电站于 1994 年建成投入商业运行。广东大亚湾核电站每年发电量在 100 亿度以上, 三

成电力供应广东电网^[2]。本研究通过 1993 - 2010 年统计的广东省数据,应用熵权法,从能源消耗强度、污染物排放、污染物治理与利用和经济效益四方面对广东省核电节能减排效果进行综合评价。

1 评价指标

在节能减排及核电节能减排方面相关研究^[3-7]基础上,并根据指标数据可得性筛选出 4 类 18 个指标构成评价指标体系(表 1)。指标原始数据来源于 1993 - 2011 年的中国统计年鉴、中国电力年鉴、中国环境年鉴、中国能源统计年鉴和广东统计年鉴。

2 评价模型

2.1 数据的标准化处理

评价指标体系中各项指标值的量纲不同,不能直接进行比较,评价指标体系数据需要进行标准化处理。设被评价对象为 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, 综合评价指标体系为 $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, 则 n 个指标对 m 个被评价对象的评价指标体系用指标矩阵 X 表示:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在指标特征矩阵 X 中,各元素是原始数据,利用极差变换公式对各指标值进行标准化处理。指标通常可以分为效益型、成本型、固定型以及区间型,本研究指标涉及效益型、成本型和固定型三类,指标标准化公式如下:

1) 对于效益型指标:

$$r_{ij} = \frac{(x_{ij} - \min(x_{ij}))}{(\max(x_{ij}) - \min(x_{ij}))} \quad (2)$$

2) 对于成本型指标:

$$r_{ij} = \frac{(\max(x_{ij}) - x_{ij})}{(\max(x_{ij}) - \min(x_{ij}))} \quad (3)$$

3) 对于固定型指标:

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - x_i|}{\max |x_{ij} - x_i|} \quad (4)$$

通过上述公式变换后, $0 \leq r_{ij} \leq 1$, 各类指标都

表 1 核电节能减排评价指标体系

Tab. 1 Indexes for evaluating the nuclear power energy saving and emission reduction

类指标 Classification index	操作化指标 Weight of classification index	指标类别 Index category	操作化权重系数 Weight of exercisable index
X ₁ 能源消耗强度、 效率与消费结构	X ₁₁ 单位 GDP 煤炭消耗总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.067 345
	X ₁₂ 单位 GDP 石油消耗总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.032 107
	X ₁₃ 单位 GDP 天然气消耗总量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	-	0.028 032
	X ₁₄ 单位 GDP 火电生产总量/(万 kWh·万元 ⁻¹)	-	0.042 907
	X ₁₅ 单位 GDP 核电生产总量/(万 kWh·万元 ⁻¹)	+	0.040 117
	X ₁₆ 单位 GDP 水电生产总量/(万 kWh·万元 ⁻¹)	+	0.123 637
X ₂ 污染物排放	X ₂₁ 单位 GDP 火力发电 CO ₂ 排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.042 907
	X ₂₂ 单位 GDP 火力发电氧化氮 NO _x 排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.042 905
	X ₂₃ 单位 GDP 工业二氧化硫排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.040 074
	X ₂₄ 单位 GDP 工业烟尘排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.040 647
	X ₂₅ 单位 GDP 工业粉尘排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.049 698
	X ₂₆ 单位 GDP 工业废气排放总量/(万标立方米·万元 ⁻¹)	-	0.037 014
	X ₂₇ 单位 GDP 工业废水排放总量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.029 343
	X ₂₈ 单位 GDP 工业固体废物排放量/(t·万元 ⁻¹)	-	0.023 698
X ₃ 污染物治理与利用	X ₃₁ 工业废水排放达标率/%	+	0.089 665
	X ₃₂ 工业固体废物综合利用率/%	+	0.117 221
X ₄ 经济效益	X ₄₁ 人均 GDP/(元·人 ⁻¹)	+	0.117 904
	X ₄₂ 单位 GDP 综合能耗/(t 标准煤·万元 ⁻¹)	-	0.034 784

注: 火电生产效率 = GDP/火电生产总量, 核电生产效率 = GDP/核电生产总量, 水电生产效率 = GDP/水电生产总量 “+”表明该指标是正向指标,“-”表明该指标是负向指标; 火力发电 CO₂ 排放系数 = 1.052 3 kg CO₂/kWh, 火力发电 NO_x 排放系数 = 6.9 g/kWh^[8]。

表2 广东省核电节能减排效果评价指标值

Tab. 2 The index value evaluation of nuclear power energy saving and emission reduction of Guangdong province

类指标	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
X_{11}	0.907 832	0.821 167	0.918 108	0.779 09	0.690 451	0.642 369	0.624 268	0.609 59	0.571 484
X_{12}	0.354 59	0.256 11	0.227 985	0.197 446	0.189 834	0.173 936	0.185 953	0.202 48	0.182 483
X_{13}	0	0	1.895 305	1.395 89	2.966 3	2.778 086	2.020 247	1.479 99	0
X_{14}	0.144 734	0.124 837	0.108 389	0.101 234	0.096 133	0.095 402	0.104 837	0.108 603	0.102 481
X_{15}	0	0.028 918	0.019 745	0.018 582	0.016 958	0.016 338	0.016 659	0.015 215	0.014 088
X_{16}	0.032 853	0.027 961	0.024 36	0.019 567	0.021 404	0.019 304	0.013 063	0.016 117	0.017 913
X_{21}	1.523 034	1.313 663	1.140 579	1.065 288	1.011 605	1.003 915	1.103 196	1.142 832	1.078 41
X_{22}	0.009 987	0.008 614	0.007 479	0.006 985	0.006 633	0.006 583	0.007 234	0.007 494	0.007 071
X_{23}	0.015 751	0.013 71	0.009 941	0.008 049	0.006 511	0.008 121	0.007 908	0.009 124	0.008 777
X_{24}	0.007 532	0.006 734	0.003 867	0.003 059	0.002 123	0.004 088	0.003 96	0.002 737	0.001 713
X_{25}	0.016 48	0.013 334	0.011 924	0.006 782	0.004 352	0.011 645	0.011 155	0.006 002	0.003 368
X_{26}	1.810 374	1.533 052	1.203 333	0.939 541	0.717 38	0.801 099	0.846 495	0.861 706	0.888 078
X_{27}	43.333 02	31.017 37	23.832 34	18.124 17	13.466 32	14.867 43	13.568 03	11.804 21	10.594 95
X_{28}	0.005 891	0.002 83	0.002 044	0.001 841	0.001 914	0.015 279	0.006 852	0.001 242	0.003 099
X_{31}	50.980 953	54.686 728	56.336 008	57.732 282	57.384 305	57.021 157	61.006 235	77.393 363	84.102 755
X_{32}	52.203 6	54.186 521	54.470 99	50.739 645	57.965 861	55.304 74	54.555 141	67.532 468	71.859 296
X_{41}	4 900.480 1	6 337.271 7	7 836.197 2	9 365.719 2	10 374.918	11 085.879	11 642.2	12 537.279	13 680.007
X_{42}	1.803 001 3	1.504 876 7	1.364 805 3	1.188 193 5	1.087 142 2	1.057 693 3	1.031 980 2	0.977 828 1	0.955 980 1
类指标	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
X_{11}	0.492 43	0.499 223	0.465 952	0.436 797	0.411 768	0.391 163	0.361 391	0.345 646	0.347 38
X_{12}	0.145 301	0.132 231	0.126 764	0.105 88	0.105 526	0.092 523	0.082 785	0.093 951	0.096 827
X_{13}	0	0.795 222	0.858 75	1.103 852	5.438 593	14.378 32	14.561 08	28.584 77	13.378 81
X_{14}	0.091 155	0.090 476	0.089 792	0.076 475	0.071 574	0.067 879	0.057 261	0.054 277	0.054 069
X_{15}	0.015 462	0.018 258	0.015 098	0.013 51	0.011 735	0.009 504	0.008 506	0.008 054	0.007 189
X_{16}	0.012 526	0.010 816	0.007 482	0.005 738	0.009 553	0.007 301	0.006 957	0.004 99	0.007 582
X_{21}	0.959 221	0.952 079	0.944 88	0.804 744	0.753 176	0.714 293	0.602 553	0.571 158	0.568 963
X_{22}	0.006 29	0.006 243	0.006 196	0.005 277	0.004 939	0.004 684	0.003 951	0.003 745	0.003 731
X_{23}	0.007 051	0.006 654	0.005 979	0.005 648	0.004 69	0.003 701	0.002 981	0.002 566	0.002 149
X_{24}	0.001 328	0.001 384	0.001 336	0.001 201	0.001 023	0.000 859	0.000 766	0.000 628	0.000 55
X_{25}	0.002 477	0.002 767	0.002 089	0.001 423	0.001 046	0.000 721	0.000 546	0.000 266	0.000 226
X_{26}	0.783 489	0.698 975	0.664 895	0.596 124	0	0.533 058	0.557 387	0.574 481	0.523 59
X_{27}	10.756 29	9.395 42	8.732 113	10.265 74	8.827 859	7.751 862	5.797 094	4.782 973	4.064 737
X_{28}	0.002 162	0.001 124	0.000 844	0.000 614	0.000 511	0.000 362	0.000 326	0.000 405	0.000 308
X_{31}	89.664 408	82.928 386	83.872 809	83.899 33	84.875 997	86.046 417	89.732 976	92.339 179	93.114 51
X_{32}	75.892 421	83.748 887	88.616 328	86.947 514	94.144 586	87.720 665	86.571 488	91.155 688	90.780 792
X_{41}	17 181.762	19 919.785	22 718.276	24 534.881	28 576.698	33 630.024	37 192.889	38 975.143	44 116.069
X_{42}	0.840 960 1	0.826 715 2	0.806 271 2	0.794	0.771	0.747	0.715	0.684	0.664

转化为正向指标，最优值为1，最差值为0。指标标准化后的特征矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 熵权法确定权重

熵是系统无序程度的一个度量。熵值越小，指标的权重越大。熵值越大，指标的权重越小^[9]。如果各个评价对象的某个评价指标值都相等，则该评价指标并不给系统提供有用信息，可去掉。利用计算熵值来确定各指标的权重，具体计算公式如下^[10-12]：

1) 定义熵。在有 m 个指标、 n 个被评价对象的评估问题中，第 i 个指标的熵为：

$$h_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6)$$

式中： n 为系统可能处于的状态数； $k = 1/\ln n$ ； f_{ij}

为系统所处的某种状态的概率， $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$ ，其中 f

满足 $0 \leq f \leq 1$ ， $\sum f = 1$ ，并规定当 $f = 0$ 时，有 $f \ln f = 0$ 。

2) 定义熵权。定义了第 i 个指标的熵之后，可得到第 i 个指标的熵权为：

$$w_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1) \quad (7)$$

2.3 评价方法

本研究采用综合评价方法来进行核电节能减排效果的测算，其具体评价模型为：

$$ESI = \sum_{i=1}^m W_i \times C_i \quad (8)$$

式中： ESI 为综合评价指数， W_i 为第 i 个指标的权重值， C_i 为无量纲量化值， m 为评价指标个数。

3 评价结果分析

3.1 广东省核电节能减排综合效益分析

按照公式(1)~公式(8)计算广东省1993-2010年核电节能减排综合效益的得分，结果如图1所示。由图1可以看出，总体上广东省1993-2010年核电节能减排综合效益呈上升趋势。1993-1997年广东省核电节能减排效果呈上升趋势、1997-1999年呈下降趋势、1999-2006年核电节能减排效果呈上升趋势，2007年核电节能减排效果相比2006年下降，2006-2010年核电节能减排效果呈上升趋势。

势、1997-1999年呈下降趋势、1999-2006年核电节能减排效果呈上升趋势，2007年核电节能减排效果相比2006年下降，2006-2010年核电节能减排效果呈上升趋势。

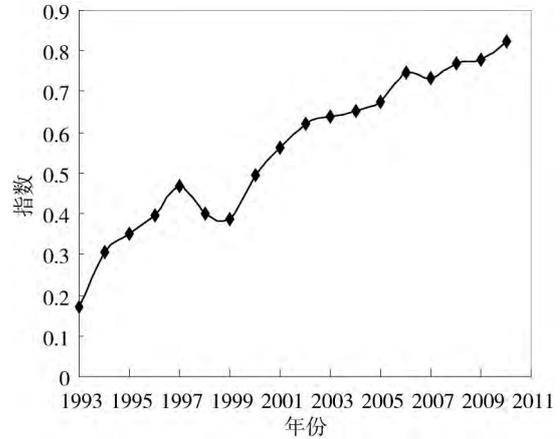


图1 广东省1993-2010年核电节能减排效果综合评价结果

Fig. 1 The oscillation value of nuclear power energy saving and emission reduction of guangdong province during 1993-2010

3.2 广东省核电节能减排效益分析

3.2.1 能源消耗强度、效率分析

由表2数据看出，广东省1993-1994年单位GDP煤炭消耗总量下降，但是2004-2005年单位GDP煤炭消耗总量上升，1995-2002年呈下降趋势，2002-2003年单位GDP煤炭消耗总量上升，2003-2010年单位GDP煤炭消耗总量呈下降趋势，总体上呈下降趋势；广东省1993-1998年单位GDP石油消耗总量呈下降趋势、1998-2000年呈上升趋势、1998-2008年呈下降趋势、2008-2009年广东省单位GDP石油消耗总量上升，2009-2010年又下降，总体上呈下降趋势。

由表2数据看出，广东省单位GDP火电生产总量1993-1998年呈下降趋势、1998-2000年呈上升趋势、2000-2010年呈下降趋势，总体上广东省1993-2010年单位GDP火电生产总量呈下降趋势；广东省核电从1994年开始生产，单位GDP核电和水电生产总量1994-2010年变化幅度不大，但是核电和水电在电力供应中所占比例较小。

3.2.2 污染物排放效益分析

由表2数据看出，广东省单位GDP火力发电CO₂排放总量1993-1998年呈下降趋势、1998-2000年呈上升趋势变化，总体上呈下降趋势。

4 结论

广东省核电节能减排效果明显。核电效益是节省煤炭等不可再生能源用量,减少CO₂、SO₂、烟尘、NO_x等污染物排放。通过广东省1993年(广东省核电生产前一年)–2010年核电节能减排效益综合评价研究,发现广东省核电节能减排综合效益1993–2010年呈上升趋势;广东省1993–2010年单位GDP煤炭和石油消耗总量呈下降趋势,单位GDP火电生产总量呈下降趋势、单位GDP核电和水电生产总量1994–2010年变化幅度不大,但是核电和水电在电力供应中所占比例较小;总体上广东省单位GDP火力发电CO₂排放总量呈下降趋势。我国在快速发展核电的同时,要注意放射性废物和滨海核电站的热污染等问题的处理。

研究过程中出现某些指标数据难以获得问题。CO₂排放量统计数据没有,仅以火力发电排放CO₂排放量计算;广东省氧化氮NO_x排放量统计年鉴没有1993–2010年全部数据,仅以火力发电排放氧化氮NO_x排放量计算;有些指标例如单位GDP工业固体危险废物排放量、废气治理设施数、废水治理设施数、单位GDP工业污染治理投资统计年鉴没有1993–2010年全部数据,因此删掉了这些指标,这些指标的删除对核电节能减排效果评价的结果可能会产生一定的影响。

参考文献:

- [1] 郭贤明,李建华. 广东核电发展的优势与前景 [J]. 能源技术, 2009, 30(3): 169-172.
- [2] 大亚湾核电站 [OL]. http://www.lvmama.com/dest/dayawan_hedian/place.
- [3] 赵仁恺. 发展核电对减排CO₂的贡献 [J]. 核科学与工程, 2003, 23(1): 1-8.
- [4] 徐洪波,杨俊峰. 河北省节能减排项目绩效评价研究 [J]. 现代营销, 2011(5): 141.
- [5] 陈一萍. 基于密切值法的节能减排评价研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 419-422.
- [6] 王曼,杨俊峰. 节能减排项目绩效评价体系的构建 [J]. 中国证券期货, 2010(10): 103.
- [7] 迟国泰,祝志川,张玉玲. 基于熵权-G1法的科技评价模型及实证研究 [J]. 科学学研究, 2008, 26(6): 1210-1213.
- [8] CO₂及污染物排放系数 [OL]. <http://www.china5e.com/show.php?contentid=213543>.
- [9] 杨保安,张科静. 多目标决策分析 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2008: 20-21.
- [10] 刘艺梅,杨锦秀,杨启智,等. 基于熵权的农民工对流出地影响的模糊综合评价 [J]. 农业技术经济, 2008(4): 28-29.
- [11] 贾艳红,赵军,南忠仁,等. 基于熵权法的草原生态安全评价 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 1004-1008.
- [12] 黄曼丽,朱凌,尹华. 基于熵权的多目标综合评价方法在水利工程中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2008(12): 100-102.

(责任编辑 高春萌)

(下接第44页 Continued from Page 44)

- [2] 周海翔. 田湾核电站自动功率控制器(APC)功能分析 [J]. 核技术, 2006, 29(11): 850-853.
ZHOU H X. Tianwan nuclear power plant automatic power controller (APC) functional analysis [J]. Nuclear Technology, 2006, 29(11): 850-853.
- [3] 郭春. 田湾核电站反应堆功率控制系统APC控制逻辑 [R]. 连云港: 江苏核电有限公司, 2008.
- [4] 董威,曹东茂. 阳江核电堆机协调控制方案浅析[C]//第一届中国(国际)核电仪控技术大会论文集: 专题二. 北京: 中国核学会, 2011(5): 4-6.

- [5] 杨宗伟,冯光宇,栾振华,等. 岭澳二期核电站反应堆功率控制系统启动试验研究 [R]. 深圳: 中广核工程公司调试中心, 2012: 1-2.
- [6] 孙林宁. AP1000压水堆功率控制模式浅析 [J]. 科技资讯, 2015(6): 42-43.
SUN L N. Analysis of Power Control Mode of AP1000 [J]. Science and Technology Information, 2015(6): 42-43.

(责任编辑 张春文)