

DOI: 10.5846/stxb201402170272

顾佰和, 谭显春, 穆泽坤, 曾元. 中国电力行业 CO<sub>2</sub> 减排潜力及其贡献因素分析. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Gu B H, Tan X C, Mu Z K, Zeng Y. Factors contributing to CO<sub>2</sub> emission reduction potential of the power sector in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

## 中国电力行业 CO<sub>2</sub> 减排潜力及其贡献因素分析

顾佰和, 谭显春\*, 穆泽坤, 曾元

中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190

**摘要:** 电力行业低碳转型是中国迈向低碳经济转型进程中关键行业之一, 如何有效科学分析电力行业的碳减排潜力, 确定操作性强的低碳转型路线、提出有效的政策措施是中国政府亟待解决的焦点问题之一。考虑终端电力消费、低碳能源发电占比、火力发电结构、火力发电效率、线损率等因素, 构建了自底向上的电力行业 CO<sub>2</sub> 排放核算模型, 在此基础上, 利用情景分析方法探索中国电力行业 2015 和 2020 年的 CO<sub>2</sub> 减排潜力, 进一步利用对数平均权重分解法 (LMDI, Logarithmic Mean weight Divisia Index method) 对电力行业 CO<sub>2</sub> 减排影响因素的贡献度做了归因分析。结果显示, 相比基准情景, 在当前政策情景和低碳政策情景下, 电力行业将分别带来 27.0 亿 t 和 36.9 亿 t 的 CO<sub>2</sub> 减排量。低碳能源发电和火力发电效率是未来对 CO<sub>2</sub> 减排最重要的两个贡献因素。终端电力消费量一直是促使电力行业 CO<sub>2</sub> 排放增加最重要的贡献因素, 因此通过电力需求侧管理等手段控制电力消费量对电力行业的低碳发展至关重要。最后结合减排贡献因素分析的结果为中国电力行业低碳发展提出了相应的政策建议。

**关键词:** 电力行业; CO<sub>2</sub> 减排潜力; 贡献因素; 减排措施

## Factors contributing to CO<sub>2</sub> emission reduction potential of the power sector in China

GU Baihe, TAN Xianchun\*, MU Zekun, ZENG Yuan

Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Reducing carbon emissions from the power sector is of great importance for China in moving towards a low-carbon economy. Key issues include how to scientifically analyze potential for reductions, identifying a feasible transition strategy, and developing effective policies and measures to achieve goals. Many studies have explored future CO<sub>2</sub> emissions from the power sector, but few have quantitatively analyzed factors associated with CO<sub>2</sub> emission reduction potential, and research has thus failed to propose targeted policy solutions. This study was built on a CO<sub>2</sub> emissions accounting model with a bottom-up approach. Factors that impact the CO<sub>2</sub> emissions, i.e., terminal electricity consumption, low-carbon power production, thermal power efficiency, and line loss rate, were included in the model. The LMDI method was used to measure the weight of the contribution from each factor. Three scenarios, i.e. a Business As Usual (BAU) Scenario, a Current Policy (CP) Scenario, and a Low-carbon (LC) Policy Scenario, were developed to stimulate emission reductions by the sector during the period 2015–2020. The study results reveal that CO<sub>2</sub> emissions from China's power sector will continue to grow under all three scenarios over the period of 2010 to 2020, with annual growth rates of 10.7% (BAU), 6.5% (CP) and 4.5% (LC). As the Current Policy Scenario was based on existing plans and policies for the power sector, we believe that it should be possible to achieve the 2701 Mt CO<sub>2</sub> emission reduction forecast under CP. As the Low-carbon Policy Scenario requires more radical policies to be adopted in the power sector, we believe that the forecast 3688 Mt

**基金项目:** 中国科学院科技政策与管理科学研究所重大研究任务 A 类项目 (Y20113); 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA05140108); 000 中国低碳发展宏观战略研究课题 (201311)

收稿日期: 2014-02-17; 网络出版日期: 2014-12-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: txc@casipm.ac.cn

reduction by 2020 (down to only 4720 Mt) is likely to be the upper limit of CO<sub>2</sub> emission reductions possible for the sector. By further studying all the factors that contribute to CO<sub>2</sub> emission reduction potential, we found that the most influential factor driving the growth of CO<sub>2</sub> emissions from the sector until 2020 is terminal electricity consumption. Low-carbon power generation will have growing importance in the period 2011—2020. For example, in the LC Policy Scenario, the contribution of low-carbon power generation to CO<sub>2</sub> emission reductions reached 29.7%, exceeding that of thermal power generation efficiency and all other factors, Thermal power generation efficiency will play an important role throughout the evaluated period. However, because the progress of technology may curb gradually with the growth of power generation efficiency, the contribution of this factor will decrease. The contribution made by the thermal power structure will increase owing to the rapid development of gas-fired power generation in the future. Compared to other factors, the line loss rate is not a great contributor to the total CO<sub>2</sub> emissions of the sector, but is still of significance that should not be ignored. Finally, policy recommendations are provided based on the results of the study to support government policy making for China's power sector.

**Key Words:** power sector; CO<sub>2</sub> emission reduction potential; contribution factor; policy measures

改革开放以来,中国经济迅猛发展,特别近 10 余年来,中国的经济一直保持高速增长,2000—2010 年, GDP 年均增速达到 10.5%,目前已成为全球第二大经济体。随着经济的高速发展,中国的电力消费也迅速增长,2000—2010 年,中国的电力消费量从 2000 年的 12535.7 亿 kWh 增长到 2010 年的 39366.3 亿 kWh,年均增速 12.1%。与之相对应的是,中国的电力生产也飞速发展,电力装机容量从 2000 年的 31932.1 万 kW 增长到 2010 年的 96641.0 万 kW,年均增速 11.7%,发电量从 2000 年的 13562.4 亿 kWh 增长到 2010 年的 42081.3 亿 kWh,年均增速 12.0%,发电量和发电装机容量仅次于美国,位列世界第二。电力行业作为支持社会经济发展的基础性行业,同时也是能耗和 CO<sub>2</sub>排放大户。2010 年,中国电力行业能源消费量为 10.65 亿 t 标煤<sup>[1]</sup>,占到中国能源消费总量的 32.8%。而由于中国电力行业长期以煤为主的发电结构,带来大量的 CO<sub>2</sub>排放,2010 年中国电力和热力生产部门的 CO<sub>2</sub>排放量达到 35.8 亿 t<sup>[2]</sup>,占全国 CO<sub>2</sub>排放总量的 49.3%,居所有部门之首。随着中国经济的持续稳定增长,未来电力消费将逐年攀升,有效控制电力行业 CO<sub>2</sub>排放量对中国实现低碳发展具有重要的意义。如何科学确定中国电力行业的减排潜力,为电力行业制定科学有效的减排路径和减排政策,成为决策者和研究人员共同关注的焦点之一。

目前已经有研究探索电力行业 CO<sub>2</sub>减排潜力和减排路径,这些研究大致分为以下两类,一类是探索发电技术<sup>[3-4]</sup>、电源结构<sup>[5-6]</sup>、或者某一条减排政策<sup>[7-9]</sup>等因素独立作用时带来的 CO<sub>2</sub>减排潜力,这类研究可以很好地量化某一因素的减排潜力,但是难以从整体层面给出电力行业总体的减排潜力。另外一类是为未来设置综合的情景,通过参考国家、行业的低碳政策、发展规划以及先进技术,构建出一系列未来可能的经济结构、技术水平、能源效率的情景,讨论在各种发展情景下的 CO<sub>2</sub>排放潜力<sup>[10-11]</sup>。也有许多学者针对中国电力行业 CO<sub>2</sub>减排潜力问题做了研究,Chen 等<sup>[12]</sup>总结了适用于中国的低碳技术,并通过综合电源结构规划模型对关键低碳技术的减排潜力做了分析,提出了中国电力行业的低碳发展路线图。部分学者<sup>[13-15]</sup>利用各种分解技术分析了中国电力行业发展的关键影响因素,认为中国电力行业 CO<sub>2</sub>排放的主要影响因素包括 GDP、电力消费量、火力发电效率、电源结构、火电内部结构、线路损失率、发电调度模式等因素。Cai 等<sup>[16]</sup>利用长期能源替代规划系统(LEAP, Long-range Energy Alternatives Planning System)为中国电力行业设置了三个不同的发展情景,通过情景之间的对比得到中国电力行业未来的 CO<sub>2</sub>减排潜力,并量化了关键减排措施的成本。

已有的这些研究对中国电力行业 CO<sub>2</sub>排放未来的发展情景做了有益的探索,但是很少有研究对电力行业的 CO<sub>2</sub>减排潜力的贡献因素做进一步的定量分析,使得提出的政策建议难以做到有针对性。鉴于此,本文首先综合考虑发电、输电、用电等多环节,分析电力行业碳排放结构体系,构建自底向上的电力行业 CO<sub>2</sub>排放核

算模型,将终端电力消费量、低碳能源发电占比、火电内部结构、火力发电效率以及线损率等因素都考虑在内。第二,采用情景分析方法,科学设置中国 2015 和 2020 年电力行业发展情景,探索中国电力行业 CO<sub>2</sub>减排潜力,并利用 LMDI 分解方法,进一步分析了各因素对未来电力行业 CO<sub>2</sub>减排潜力的贡献。最后提出促进中国电力行业 CO<sub>2</sub>减排的政策建议。

## 1 模型和方法

### 1.1 电力行业 CO<sub>2</sub>排放核算方法

为体现各因素对电力行业 CO<sub>2</sub>排放的影响,本文先对电力系统 CO<sub>2</sub>排放进行初步的结构分解,如图 1 所示。

电力行业的 CO<sub>2</sub>排放主要来自于发电环节,但由于电力属于即发即用的产品,因此发电量的多少主要取决于电力的消费量,而电力从发电端到用电端的传输过程会有一些线路损耗,因此发电量就由终端电力消费量、线路损失率两部分共同决定。从电源结构来看,又分为低碳能源发电和火力发电,低碳能源发电不产生 CO<sub>2</sub>排放,因此只需计算火力发电产生的 CO<sub>2</sub>排放(这里需要说明的是,虽然生物质能发电属于火力发电,但是由于生物质能利用碳中性的特征,使得生物质能发电不产生 CO<sub>2</sub>排放,本文在模型构建过程中将生物质能列为低碳能源)。火力发电的 CO<sub>2</sub>排放又由火力发电的内部结构、各种火力发电的发电效率决定。因此电力行业的 CO<sub>2</sub>排放核算公式如下:

$$CE = \sum_{i \in \psi} CE_i = \sum_{i \in \psi} \frac{P}{1 - \mu} \times (1 - \alpha) \times TP_i \times EF_i \times e_i \quad (1)$$

其中,  $CE$ : 电力行业 CO<sub>2</sub>排放总量(t);  $CE_i$ : 第  $i$  种火力发电方式带来的 CO<sub>2</sub>排放量(t);  $\psi$ : 各种火力发电方式集合,包括燃煤发电、石油发电、天然气发电等;

$P$ : 终端电力消费量(kWh);  $\mu$ : 线路损失率(%);  $\alpha$ : 低碳能源发电量占比,这里的低碳能源发电方式包括:水电、核电、风电、太阳能发电、生物质发电等不产生 CO<sub>2</sub>排放的发电方式(%);  $TP_i$ : 第  $i$  种火力发电方式发电量占火力发电比重(%);  $EF_i$ : 第  $i$  种火力发电方式单位发电量燃料消耗(GJ/kWh);  $e_i$ : 第  $i$  种火力发电方式采用燃料的 CO<sub>2</sub>排放因子(t/GJ)。

### 1.2 减排因素贡献分解方法

在对 CO<sub>2</sub>排放量的影响因素进行研究的方法中,应用最多的是指数分解法。其中,LMDI 分解方法由于有效解决了分解中的剩余问题和数据中 0 值与负值问题<sup>[17]</sup>,得到广泛的应用<sup>[13][18]</sup>。本文基于前文建立的 CO<sub>2</sub>排放核算模型对电力行业 CO<sub>2</sub>排放的影响因素进行 LMDI 分解。这里只简要介绍 LMDI 分解的关键步骤,更详细的介绍参见 Ang 等<sup>[19]</sup>。

为了便于分解,令式(1)中  $1/1 - \mu = U$ ,  $1 - \alpha = A$ ,可以将式(1)写成如下形式:

$$CE = \sum_{i \in \psi} CE_i = \sum_{i \in \psi} P \times U \times A \times TP_i \times EF_i \times e_i \quad (2)$$

因此电力行业 CO<sub>2</sub>排放变化可以分解为以下五方面因素产生的效应:

1) 活动效应:即终端电力消费量,(简称为  $P$ );

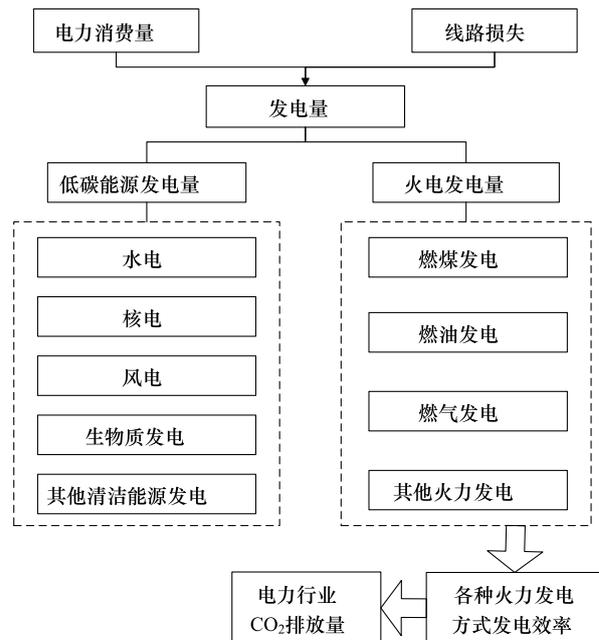


图 1 电力系统 CO<sub>2</sub>排放结构分解

Fig.1 Composition of CO<sub>2</sub> emission from power system

2) 低碳能源效应:即水电、核电、风电、太阳能发电、生物质能发电等低碳能源发电量合计占比,(简称为  $A$ );

3) 火电内部结构效应:即各种火力发电方式发电量占比的变化,(简称为  $TP$ );

4) 火力发电效率效应:即火力发电单位发电量燃料消耗(简称为  $EF$ );

5) 输电线路损失率效应:简称为  $U$ 。

引入对数平均函数  $L(x, y)$ ,  $L(x, y)$  被定义如下:

$$L(x, y) = \begin{cases} (x - y) / (\ln x - \ln y), & x \neq y \\ x, & x = y \\ 0, & x = y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用 LMDI 分解方法可将式(2)分解成如下形式:

$$\Delta CE = CE_T - CE_0 = \Delta P + \Delta U + \Delta A + \Delta TP + \Delta EF \quad (4)$$

其中,式中  $\Delta CE = CE_T - CE_0$  用来表示电力行业  $\text{CO}_2$  排放从初始年份 0 到第  $T$  年的变化量,其余各因子分别表达各种影响因素对电力行业  $\text{CO}_2$  排放变化的贡献:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{i \in \psi} L(CE_{i,T}, CE_{i,0}) \ln \frac{P_T}{P_0} \\ \Delta U &= \sum_{i \in \psi} L(CE_{i,T}, CE_{i,0}) \ln \frac{U_T}{U_0} \\ \Delta A &= \sum_{i \in \psi} L(CE_{i,T}, CE_{i,0}) \ln \frac{A_T}{A_0} \\ \Delta TP &= \sum_{i \in \psi} L(CE_{i,T}, CE_{i,0}) \ln \frac{TP_{i,T}}{TP_{i,0}} \\ \Delta EF &= \sum_{i \in \psi} L(CE_{i,T}, CE_{i,0}) \ln \frac{EF_{i,T}}{EF_{i,0}} \end{aligned}$$

### 1.3 数据来源

本文电力消费数据来自中国能源统计年鉴<sup>[1]</sup>。中国能源统计年鉴同时提供了电力生产部分数据,但是没有提供本文所需要的火电内部结构数据(燃煤、燃油、燃气、生物质发电各自发电量),而国际能源机构(IEA, International Energy Agency)<sup>[20]</sup>刚好提供了这部分数据,同时 IEA 也提供了详细的各种低碳能源发电量数据,因此,为了保持数据的一致性,本文的电力生产部分采用 IEA 提供的数据。我们将 IEA 提供的发电总量与中国能源统计年鉴提供的发电总量数据进行了对比,发现两者差别很小,以至于不影响分析。燃煤发电煤耗和燃煤供电煤耗、线路损失率数据均来自中国电力年鉴<sup>[21]</sup>。单位燃油和燃气发电的  $\text{CO}_2$  排放量来自 IEA。各种能源的  $\text{CO}_2$  排放因子数据来自省级温室气体清单编制指南<sup>[22]</sup>,并假设在本文分析的时间跨度内数值不变。

## 2 中国电力行业 $\text{CO}_2$ 减排潜力分析

### 2.1 情景设置

本文将为中国电力行业设置三个不同的发展情景,分别是基准情景,当前政策情景和低碳政策情景。每个情景都是基于不同的政策假设而设置的,分别代表一条中国电力行业未来的发展路径。情景中考虑的主要参数包括前文提到的终端电力消费量、低碳能源发电占比、火力发电内部结构、火力发电效率和线路损失率。需要指出的是,三个情景中有关中国未来 GDP 和电力在终端能源消费中占比的假设是一致的。我国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要充分考虑了中国未来 10 年经济结构转型升级的需要,将 GDP 预期增速调低,2011—2015 年,中国 GDP 的年均增速为 7%,党的“十八大”报告指出,从 2010 年到 2020 年,中国的

GDP 增长要实现翻番,因此本文假设 2016—2020 年,中国 GDP 年均增速仍将保持在 7%的水平。随着社会经济的进一步发展,同时考虑到我国以煤为主的能源结构,未来电力在终端能源消费中占比将进一步提高,假设到 2015 年将达到 25%,2020 年进一步提高到 30%。

基准情景假设中国电力行业从 2010 年开始不采取额外的节能以及应对气候变化的政策。能源消费总量将与 GDP 增长速度保持一致,而由于电力在终端能源消费中占比的提高,2011—2015 年,终端电力消费量年均增长率将达到 10.5%,而 2016—2020 年的年均增长率将达到 11.0%。发电结构保持 2010 年水平不变(包括低碳能源发电占比和火力发电内部结构),火力发电效率以及线损率也都保持 2010 年水平不变。基准情景基本是一个不可能发生的情景,它的作用是为了与其他两个情景作对比,以得到未来电力行业的 CO<sub>2</sub>减排潜力。

当前政策情景主要基于中国已经颁布的有关电力行业未来的发展规划和政策,包括《能源发展“十二五”规划》和《可再生能源发展“十二五”规划》等等。考虑到越来越严峻的来自国内外的资源和环境压力,“十二五”期间中国将通过需求侧管理等一系列措施对能源消费总量进行控制,2011—2020 年,中国终端电力消费量年均增速控制在 8%。低碳能源发电占比逐步提升,到 2015 年,全国常规水电、抽水蓄能电站装机分别达到 2.6 亿 kW 和 3000 万 kW;在保证安全的前提下发展核电,“十二五”时期只批准沿海厂址的建设;加快风能、太阳能、生物质能的开发利用,到 2015 年,风电、太阳能发电和生物质能发电的装机规模分别达到 1 亿 kW、2100 万 kW 和 1300 万 kW。积极推广天然气热电冷联供,支持利用煤层气发电。“十二五”期间将淘汰落后煤电机组 2000 万 kW,新增高效煤电机组 3 亿 kW,其中热电联产 7000 万 kW,到 2020 年,超超临界机组装机占燃煤机组装机容量比例将超过 25%<sup>[23]</sup>,考虑到整体煤气化联合循环发电系统(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)的成本问题,将只能得到小规模商业化应用。到 2020 年,全面建成坚强智能电网。

低碳政策情景采用比当前政策情景更加激进的政策促进电力行业低碳发展,是一个较为乐观的低碳发展情景。将设定更加严格的能源消费总量控制目标,2011—2020 年终端电力消费量年均增速将降低到 7%,这意味着能源消费强度到 2020 年将比 2010 年降低 29%。低碳能源发电和天然气发电占比相比当前政策情景进一步提升。考虑到一部分小火电在中国区域电网中发挥着重要的作用,而且在解决区域就业问题中发挥着不可替代的作用<sup>[24]</sup>,因此低碳政策情景只在当前政策情景基础上多淘汰 1000 万 kW 小火电机组。2020 年,超超临界机组装机占燃煤机组装机容量比例将超过 30%,假设 IGCC 在成本控制上取得突破,IGCC 将得到更大规模商业化应用。电网的精细化管理和控制水平将提升,2020 年线损率将达到 5.7%(德国 2007 年的平均线损率)。

三个情景的具体参数设置见表 1。

表 1 2015—2020 年中国电力行业发展情景参数设置

Table 1 Parameters setting of different scenarios for China's electricity sector during 2015—2020

情景参数 Parameters	单位 Unit	基准情景 Baseline scenario			当前政策情景 Current policy scenario			低碳政策情景 Low-carbon policy scenario		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
		终端电力消费量 Terminal electricity consumption	TWh	3936.6	6480.4	10906.9	3936.6	5784.2	8498.8	3936.6
低碳能源发电占比 Share of low-carbon energy power generation	%	20.8	20.8	20.8	20.8	23.9	25.0	20.8	25.0	30.0
发电效率 Thermal power generation efficiency										
燃煤发电 Coal-fired power generation	gce/kWh	312.0	312.0	312.0	312.0	301.0	292.0	312.0	293.0	286.0

续表

情景参数 Parameters	单位 Unit	基准情景 Baseline scenario			当前政策情景 Current policy scenario			低碳政策情景 Low-carbon policy scenario		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
		燃油发电 Oil-fired power generation	gCO <sub>2</sub> /kWh	1043.7	1043.7	1043.7	1043.7	837.0	837.0	1043.7
燃气发电 Gas-fired power generation	gCO <sub>2</sub> /kWh	506.9	506.9	506.9	506.9	489.0	474.4	506.9	476.0	464.6
火电内部结构 Internal structure for thermal power										
燃煤发电 Coal-fired power generation	%	97.5	97.5	97.5	97.5	96.8	95.4	97.5	96.6	94.6
燃油发电 Oil-fired power generation	%	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.1	0.4	0.1	0.0
燃气发电 Gas-fired power generation	%	2.1	2.1	2.1	2.1	3.0	4.5	2.1	3.3	5.4
线损率 Line loss rate	%	6.5	6.5	6.5	6.5	6.3	6.0	6.5	6.0	5.7

由于未找到燃油和燃气两种发电方式的平均发电效率数据,这里以单位发电量的 CO<sub>2</sub>排放数据代替

## 2.2 CO<sub>2</sub>减排潜力分析结果

将各情景参数带入公式(1),得到各情景 2020 年之前的 CO<sub>2</sub>排放如图 2 所示。总体来看,2020 年之前,中国电力行业 CO<sub>2</sub>排放在三个情景中都将持续增长。但由于所采取的政策措施力度不同,各情景的 CO<sub>2</sub>排放增幅大不相同。

在基准情景下,由于不采取任何积极的应对气候变化的政策,电力需求大幅上升,但电源结构没有得到改善,同时技术水平停滞不前,导致 2020 年 CO<sub>2</sub>排放达到 84.08 亿 t,是 2010 年的 2.8 倍,超过 2010 年中国化石燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub>排放的总和。在当前政策情景中,电力行业按照中国政府颁布的能源规划发展,将带来非常可观的 CO<sub>2</sub>减排量,2020 年 CO<sub>2</sub>排放将比基准情景减少 27.01 亿 t,2010—2020 年 CO<sub>2</sub>排放年均增长率只有 6.5%,而同时期终端电力消费的年均增长率为 8%。由于当前政策情景中各参数是根据已经发布的各种规划设置的,可以认为 27.01 亿 t 是一个非常有可能达到的减排量。在低碳政策情景中,更加严格的电力需求侧管理措施得以实施,电源结构进一步改善,火力发电装机容量向更加大型化的方向发展,到 2020 年,电力行业的 CO<sub>2</sub>排放仅为 47.20 亿 t,相比基准情景大幅降低了 36.88 亿 t,可认为这是中国电力行业通过努力可以达到的 CO<sub>2</sub>减排上限。

## 3 中国电力行业 CO<sub>2</sub>减排因素贡献分析

为了了解各因素在各情景中对 CO<sub>2</sub>减排的贡献,我们利用前文构建的 LMDI 模型对情景分析的结果进行了分解,结果如表 2 所示。

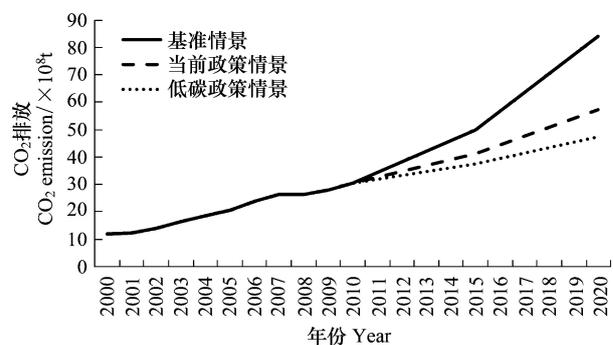


图 2 2000—2020 年不同情景下电力行业 CO<sub>2</sub>排放

Fig.2 CO<sub>2</sub> emission forecast for different scenarios, 2000—2020

表 2 2010—2020 年中国电力行业 CO<sub>2</sub>排放影响因素贡献分析Table 2 Decomposition of CO<sub>2</sub> emission change of electricity sector in China for different scenario during 2010—2020

情景 Scenarios	$\Delta P$	$\Delta A$	$\Delta EF$	$\Delta TP$	$\Delta U$	$\Delta CE$
	亿 t CO <sub>2</sub> (10 <sup>8</sup> t CO <sub>2</sub> )					
基准情景 Baseline Scenario	53.7	0.0	0.0	0.0	0.0	53.7
当前政策情景 Current policy scenario	32.5	-2.3	-2.8	-0.4	-0.2	26.7
低碳政策情景 Low-carbon policy scenario	25.8	-4.7	-3.3	-0.6	-0.3	16.9
	%					
基准情景 Baseline Scenario	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
当前政策情景 Current policy scenario	121.7	-8.6	-10.5	-1.7	-0.9	100.0
低碳政策情景 Low-carbon policy scenario	152.8	-27.9	-19.7	-3.3	-2.0	100.0

$\Delta P$  表示终端电力消费量(Terminal electricity consumption);  $\Delta A$  低碳能源发电占比(Share of low-carbon energy power generation);  $\Delta EF$  表示火力发电效率(Thermal power generation efficiency);  $\Delta TP$  表示火电内部结构(Internal structure for thermal power);  $\Delta U$  表示线损率(Line loss rate);  $\Delta CE$  表示 CO<sub>2</sub>排放变化量(Change of CO<sub>2</sub> emission)

### 3.1 终端电力消费量( $\Delta P$ )

研究结果显示,2010—2020年,各情景中对 CO<sub>2</sub>排放变化贡献最大的因素是终端电力消费量。由于中国工业化进程的持续推进,越来越多的生产用能设备从其他能源转向了电力,同时随着城市化水平的提高,居民生活质量不断提升,越来越多的电器和电子产品得到普及使用,例如电脑、电动汽车、空调等,这些使得中国整体的能源消费结构中,电力的占比越来越高,2020年电力占终端能源消费的比重将增加到30%,这使得2010—2020年三个情景中终端电力消费量的年均增速分别达到10.7%、8%和7%,对中国电力行业的 CO<sub>2</sub>排放增长的贡献分别高达100%、121.7%和152.8%。这意味着电力需求侧管理、积极推广节能产品和技术在未来仍将是电力行业 CO<sub>2</sub>减排的最重要手段之一。

### 3.2 低碳能源发电占比( $\Delta A$ )

中国的低碳能源发电存在巨大的开发潜力,风力发电潜力与中国在2030年电力需求量相当<sup>[25]</sup>,同时中国在生物质能、核能发电等方面的发展也呈现良好势头。2011—2020年,随着中国对可再生能源开发的愈发重视,低碳能源发电对 CO<sub>2</sub>减排的贡献将逐渐增加,在当前政策情景中,低碳能源发电对 CO<sub>2</sub>减排的贡献率达到8.6%,远超2010—2020年3.8%的贡献率;在低碳政策情景中,由于采取了更加激进的促进低碳能源发展的政策措施,低碳能源发电对 CO<sub>2</sub>减排的贡献率更是达到了27.9%,超过火力发电效率成为最重要的减排因素。未来随着化石能源枯竭、环境保护压力的增加等一系列问题的出现,中国会更加重视可再生能源发电的发展,低碳能源发电占比因素对 CO<sub>2</sub>减排的贡献作用将会越发凸显。

### 3.3 火力发电效率( $\Delta EF$ )

从分解结果来看,2010—2020年,火力发电效率的提高仍将是促进 CO<sub>2</sub>减排最重要的因素之一。由于“十二五”期间大批超临界和超超临界机组的建设和投产,到2020年单机60万kW以上火电机组容量占比将达到65%左右,使得发电效率进一步提升,其中煤电效率将处于国际领先水平。2010—2020年,在当前政策情景和低碳政策情景中,火力发电效率对 CO<sub>2</sub>减排的贡献率分别为10.5%和19.7%。但随着未来发电效率的不断提升,技术进步的速率会逐渐降低,同时由于火力发电碳锁定效应的存在,相应的对 CO<sub>2</sub>减排的贡献有可能会逐渐降低。

### 3.4 火力发电结构( $\Delta TP$ )

由于在当前政策情景和低碳政策情景中燃气发电得到了较为快速的发展,火力发电结构得到较为明显的改善,“十二五”期间,燃气发电的装机容量年均增速将达到16.2%,远高于煤电的装机增速,2020年燃气发电占火力发电的比重在当前政策情景和低碳政策情景中将分别提高到4.5%和5.4%,火力发电结构对 CO<sub>2</sub>减排的贡献率将分别达到1.7%和3.3%。未来如果页岩气开发技术在中国取得重大突破,燃气发电规模将进一步

大幅提升,火力发电结构将成为一个更加重要的 CO<sub>2</sub>减排因素。

### 3.5 线损率( $\Delta U$ )

从相对量上来看,线损率对电力行业 CO<sub>2</sub>减排的贡献不大,在当前政策情景中,2010—2020 年,线损率的贡献只为 0.9%,但它是一个非常稳定的减排因素。且从绝对量上来看,线损率对减排的贡献并不小,2010—2020 年,线损率为电力行业带来的累计 CO<sub>2</sub>减排量在当前政策情景和低碳政策情景中分别达到 2400 万 t 和 3400 万 t。因为电力行业几乎占中国化石燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub>排放的一半,因此电力行业中任何一个减排因素都可能对中国整体的 CO<sub>2</sub>减排产生比较重要的影响。未来随着中国坚强智能电网的建成,线损率将对电力行业 CO<sub>2</sub>减排做出持续稳定的贡献。

## 4 结论和政策建议

本文旨在探索中国电力行业的 CO<sub>2</sub>减排潜力及其主要贡献因素分析。首先综合考虑发电、输电、用电等多环节,分析电力行业 CO<sub>2</sub>排放结构体系,构建了电力行业 CO<sub>2</sub>排放核算模型,设置三种不同的发展情景,通过情景之间的对比,得到了 2020 年前中国电力行业的 CO<sub>2</sub>减排潜力。进一步利用 LMDI 分解方法分析了各影响因素在未来对 CO<sub>2</sub>减排潜力的贡献。结果显示,2010—2020 年,中国电力行业 CO<sub>2</sub>排放在三个情景中都将持续增长,年均增长率分别为 10.7%、6.5%和 4.5%。由于在终端电力消费、低碳能源发电、火力发电效率、火力发电结构、线损率等因素方面所采取的积极政策,将带来 27.01—36.88 亿 t 的 CO<sub>2</sub>减排量。这其中低碳能源发电和火力发电效率是对 CO<sub>2</sub>减排最重要的两个贡献因素,而从长期来看,低碳能源发电对 CO<sub>2</sub>减排的贡献更大。终端电力消费量一直是促使电力行业 CO<sub>2</sub>排放增加最重要的贡献因素,因此通过电力需求侧管理等手段控制电力消费量对电力行业的低碳发展至关重要。

结合研究结果,本文针对中国电力行业未来的低碳发展提出以下对策建议:(1)终端电力消费量在所有情景中都是对 CO<sub>2</sub>排放增长贡献最大的因素,因此亟需加强电力需求侧管理,通过阶梯电价政策提高居民的节能意识,积极推广节能产品和技术,尤其是在钢铁、有色金属等高耗能行业。(2)根据分析结果,未来低碳能源发电占比对 CO<sub>2</sub>减排的贡献将会越来越大,甚至有可能超过火力发电效率成为最重要的减排因素。因此应进一步大力发展水电、核电、风电、太阳能、生物质能发电等低碳能源发电方式,稳步提升低碳能源发电比例,逐渐降低火力发电比例。(3)未来火力发电效率对 CO<sub>2</sub>减排的贡献有可能会逐渐降低,但由于在目前和可预见的未来中国还将主要以燃煤发电为主,因此降低发电煤耗仍是非常有效的降低电力行业 CO<sub>2</sub>排放的途径。可以通过不断提升超超临界等高效燃煤发电机组比例,积极推动 IGCC 等发电方式的关键技术研发,降低其发电成本,促进商业化应用等方式来实现这一目标。(4)不断提高燃气发电比重将有效降低火力发电的 CO<sub>2</sub>排放强度,但由于中国的天然气资源有限,不可能在全国范围内大规模推广天然气发电,因此建议有选择的在天然气来源可靠的东部经济发达地区,建设燃气蒸汽联合循环调峰电站;在电价承受能力强、热负荷需求大的中心城市,优先发展大型燃气蒸汽联合循环热电联产项目;积极推广天然气热电冷联供,支持利用煤层气发电。(5)线损率是对电力行业 CO<sub>2</sub>减排贡献最小的因素,但电网在整个电力行业低碳转型过程中的重要地位却不容忽视。因为电网对 CO<sub>2</sub>减排的贡献更多体现为“间接作用”,包括满足大规模可再生能源发展需要,促进实现大范围能源资源优化配置,提高电能终端能源消费中的比重等等。因此应加快推进坚强智能电网建设,不断降低电网线损。通过推进建设大型电源基地外送通道,构建坚强网架等措施加快推进坚强智能电网建设,不断提高电网的稳定性、输送容量和输送效率。

### 参考文献(References):

- [ 1 ] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001-2012.
- [ 2 ] International Energy Agency (IEA). CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion-highlights. 2012.
- [ 3 ] Zhang N, Zhou P, Choi Y. Energy efficiency, CO<sub>2</sub> emission performance and technology gaps in fossil fuel electricity generation in Korea: a meta-frontier non-radial directional distance function analysis. *Energy Policy*, 2013, 56: 653-662.

- [ 4 ] Telsnig T, Tomaschek J, Özdemir E D, Bruchof D, Fahl U, Eltrop L. Assessment of selected CCS technologies in electricity and synthetic fuel production for CO<sub>2</sub> mitigation in South Africa. *Energy Policy*, 2013, 63: 168-180.
- [ 5 ] Muis Z A, Hashim H, Manan Z A, Taha F M, Douglas P L. Optimal planning of renewable energy-integrated electricity generation schemes with CO<sub>2</sub> reduction target. *Renewable Energy*, 2010, 35(11): 2562-2570.
- [ 6 ] Bergh K V D, Delarue E, D'haeseleer W. Impact of renewables deployment on the CO<sub>2</sub> price and the CO<sub>2</sub> emissions in the European electricity sector. *Energy Policy*, 2013, 63: 1021-1031.
- [ 7 ] Harmsen R, Graus W. How much CO<sub>2</sub> emissions do we reduce by saving electricity? A focus on methods. *Energy Policy*, 2013, 60: 803-812.
- [ 8 ] Hu J F, Kahl F, Yan Q Y, Wang X Y. The impact of China's differential electricity pricing policy on power sector CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy*, 2012, 45: 412-419.
- [ 9 ] Ko L, Chen C Y, Lai J W, Wang Y H. Abatement cost analysis in CO<sub>2</sub> emission reduction costs regarding the supply-side policies for the Taiwan power sector. *Energy Policy*, 2013, 61: 551-561.
- [ 10 ] Saysel A K, Hekimoğlu M. Exploring the options for carbon dioxide mitigation in Turkish electric power industry: system dynamics approach. *Energy Policy*, 2013, 60: 675-686.
- [ 11 ] Ari I, Koksall M A. Carbon dioxide emission from the Turkish electricity sector and its mitigation options. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 6120-6135.
- [ 12 ] Chen Q X, Kang C Q, Xia Q, Guan D B. Preliminary exploration on low-carbon technology roadmap of China's power sector. *Energy*, 2011, 36(3): 1500-1512.
- [ 13 ] Zhang M, Liu X, Wang W W, Zhou M. Decomposition analysis of CO<sub>2</sub> emissions from electricity generation in China. *Energy Policy*, 2013, 52: 159-165.
- [ 14 ] Steenhof P A. Decomposition for emission baseline setting in China's electricity sector. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 280-294.
- [ 15 ] 陈晓科, 周天睿, 李欣, 康重庆, 陈启鑫. 电力系统的碳排放结构分解与低碳目标贡献分析. *电力系统自动化*, 2012, 36(2): 18-25.
- [ 16 ] Cai W J, Wang C, Wang K, Zhang Y, Chen J N. Scenario analysis on CO<sub>2</sub> emissions reduction potential in China's electricity sector. *Energy Policy*, 2007, 35(12): 6445-6456.
- [ 17 ] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [ 18 ] Zhang L Q, Chen S P, Zhu Y W, Xu X W. The measurement of carbon emission effect of construction land changes in Anhui province based on the extended LMDI model. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(2): 186-186.
- [ 19 ] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 2003, 31(14): 1561-1566.
- [ 20 ] International Energy Agency (IEA). *Online Data of Electricity and Heat. 2000-2010*.
- [ 21 ] 中国电力年鉴编辑委员会. *中国电力年鉴*. 北京: 中国电力出版社, 2001-2011.
- [ 22 ] 国家发展和改革委员会. *省级温室气体清单编制指南*. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [ 23 ] 国家发展和改革委员会能源研究所. *能效及可再生能源项目融资指导手册*. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [ 24 ] Cai W J, Wang C, Chen J N. Revisiting CO<sub>2</sub> mitigation potential and costs in China's electricity sector. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4209-4213.
- [ 25 ] Liu Z, Guan D B, Douglas C B, Zhang Q, He K B, Liu J G. Energy policy: a low-carbon road map for China. *Nature*, 2013, 500(7461): 143-145.