

引用格式: 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2368–2376. [Liu Q, Tian C, Zheng X Q, et al. Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2368–2376.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.15

中国电力行业碳减排相关政策评价

刘 强¹, 田 川¹, 郑晓奇^{1,2}, 陈 怡¹

(1. 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 北京 100038; 2. 中国人民大学环境学院, 北京 100872)

摘 要: 中国电力行业发展水平迈上新台阶, 成果显著。随着碳排放目标约束的增强, 中国政府将会针对电力行业出台更多政策和措施, 科学合理地评价这些政策和措施意义重大。本文基于 Vensim 技术平台构建能源政策模拟模型, 对电力行业碳减排设置了三种情景: 即参考、低碳和强化低碳情景, 并对其进行分析, 评估了电力行业关键指标变化、不同政策的减排贡献及减排成本。研究发现, 对电力行业来说, 有多项政策可控制碳排放, 如果政策组合得当, 能推动电力行业碳排放早日达峰, 并将碳排放水平控制在较低水平, 同时还能带来显著的经济效益和社会效益。基于研究结果, 本文提出了推动电力行业低碳发展的政策建议: 一是完善体制机制, 推动电力结构不断优化; 二是充分利用市场手段, 实现电力行业碳排放控制; 三是强化科技支撑, 加快相关技术研发和推广。

关键词: 电力行业; 碳减排; 能源政策模拟模型; 情景分析; 政策评价; 政策建议; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.15

1 引言

电力作为清洁、高效、便利的终端能源载体将逐步成为未来终端用能的主要方式, 也是引领能源系统低碳转型的核心^[1]。中国 2015 年人均电力消费约为 4142 kW·h, 远低于美国、欧盟等绝大多数发达国家和地区 7000 kW·h 以上的人均电力消费水平, 表明中国的电力行业仍有非常广阔的发展空间^[2]。与此同时, 中国“十二五”期间电力行业在发电结构调整和用能效率提升方面取得了显著成就, 非化石能源装机占比从 2010 年的 27.2% 提高到 2015 年的 34.8%^[3,4]。尽管如此, 中国电力结构仍较为高碳, 电源结构仍以火电为主, 单位发电量 CO₂ 排放 773 g CO₂/kW·h, 远高于美国 (492 g CO₂/kW·h)、欧盟 (385 g CO₂/kW·h)、日本 (557 g CO₂/kW·h) 的水平, 电力行业碳排放总量仍呈现持续增长趋势, 从 2005 年的 21.0 亿 t CO₂ 增长到 2015 年的 35.5 亿 t CO₂, 增长

了 69%, 这也突显了中国持续和加快推进电力行业低碳转型的必要性。

2016 年, 中国政府在“十三五”规划纲要中明确提出要有效控制电力等重点行业碳排放的目标^[5], 并首次在《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中提出了 2020 年大型发电集团单位供电 CO₂ 排放控制在 550 g CO₂/(kW·h) 以内的量化目标^[6], 充分显示了中国推动电力行业低碳发展的决心和态度。客观评价电力行业政策的实施效果和碳减排贡献, 以及实施这些政策的成本, 对于科学指导后续政策的制定具有重要参考意义^[7], 然而目前国内针对政策实施效果研究多以定性研究为主, 量化效应研究相对匮乏^[8], 特别是在气候变化和低碳发展领域^[9–11], 政策制定者难以获知政策的实施效果。为对电力行业低碳转型的潜力及政策影响进行量化分析, 本文基于 Vensim 技术平台构建了完善的终端部门政策评价模型——能源政策模拟模型¹⁾ (Energy

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目 (2016YFA0602800); 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心研究项目“中国深度低碳发展转型路径”。

作者简介: 刘强, 男, 山西忻州人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为气候变化及能源政策。E-mail: liuqiang@ncsc.org.cn

1) 由国家应对气候变化战略研究和国际合作中心 (以下简称国家气候战略中心)、美国能源创新组织、国家发展改革委员会能源研究所共同合作开发。

2017年12月

Policy Solution, EPS),在模型分析了中国电力行业到2050年多种碳排放情景的基础上,评估了电力行业碳减排相关政策的综合影响,并据此提出了推动中国电力行业低碳化发展的政策建议。

2 模型与情景设计

2.1 模型方法

本研究基于 Vensim 软件构建了 EPS 模型。Vensim 是系统动力学建模广泛使用的软件,是非常实用的仿真工具,其原理是通过建立一组方程式来描述系统动态行为,构建因果反馈回路。其显著特点是用图形化的各种类型箭头或连接线连接不同类型的变量,各变量之间的数量关系以函数形式写入模型,从而将复杂系统间的关系与动态变化可视化^[12-14]。从能源系统分析的角度出发,本研究参考相关文献^[15,16]对中国能源平衡表中的终端部门进行了分类合并,最终形成工业、建筑和交通三个终端部门(见图1)。其中,工业部门除了中国统计口径中包括的工业行业以外,还包括农业和建筑业,后两者的能源消费量并入工业部门统一处理;建筑部门包含商业建筑和居民建筑,如居民生活产生的能耗放在建筑部门考虑;交通部门除了包含营运交通以外,还包含私人交通。模型中对于能源转换进行单独刻画,并分为电力生产和供热两个部分。基于以上处理,EPS 模型共包括电力生产、供热、工业、交通、建筑共5个模块,通过一系列方程与内部参数模拟和追踪5个模块之间的能源流动及现金流动情况。从政策评估需求出发,并基于对中国能源、气

候和环境相关各种政策的综合分析和分类合并,模型最终设定了35大类能源、气候和环境相关政策,包括各部门的政策及跨部门的政策,并通过评估这些政策对能源消费量、现金流动、碳排放、常规污染物排放等各类指标的综合影响,识别各类政策的减排潜力、减排成本、环境影响、社会效益等。EPS 模型基准年为2015年,规划期为2050年,模拟时间步长为1年。模型参数的数据来源包括国家气候战略中心所做的情景研究数据^[17,18]、《中国能源统计年鉴》^[2]、《中国统计年鉴》^[19]、《中国电力发展“十三五”规划》^[20]等。

本文利用 EPS 模型中的电力生产模块,对电力行业碳减排相关政策的减排效果进行了评估。首先,通过加总工业、建筑和交通等终端部门的电力消费量,并考虑电力传输损失、厂用电率等因素,得出中国总发电需求量;随后,在考虑历史电力生产结构、新建电站投资和运维成本、电力系统节能调度、污染物排放约束等限制条件的基础上,基于成本最小的目标函数,计算出满足发电量需求的电源结构,以及相应的碳排放量;第三,引入电力行业碳减排相关政策或改变政策实施力度,重新模拟得出政策情景下的电源结构和碳排放量,并计算出政策的减排成本和贡献。电力行业碳减排相关政策包括电力生产侧政策、电力需求侧政策以及其它相关政策,其中,电力生产侧政策包括可再生能源配额制、上网电价补贴、限制煤电新增装机、煤电装机提前淘汰,电力需求侧政策包括强化电力需求响应、

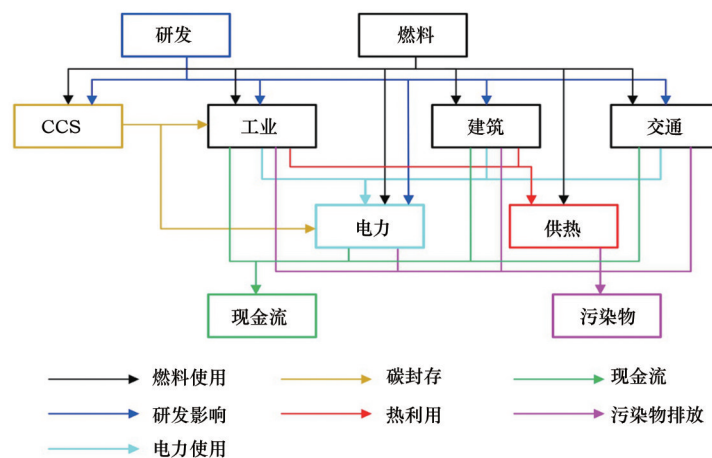


图1 能源政策模拟模型框架

Figure 1 Framework of energy policy solution

增加储能容量等,而其它相关政策包括碳价格和碳捕集、利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage,以下简称CCUS)等。

2.2 情景设计

本文设定了三个电力行业碳排放情景,分别是参考情景、低碳情景和强化低碳情景。三个情景的差异主要体现在政策选择和政策力度上(见表1)。参考情景作为既有政策的延续,是比较其他两个情景的“参照物”,而低碳情景、强化低碳情景是政策力度提升的情景,且后者的政策力度要更强。低碳情景下,中国将采取较参考情景更积极且较可能实现的新政策,如引入了碳价格政策、提高非水可再生电力发展目标等。强化低碳情景下,中国将采取了较低碳情景更为积极的政策,一些关键低碳技术将有突破性进展并带动低碳电力有更快发展,碳排放约束将更为严格。举例说明三个情景设定之间的区别,非水可再生能源发电量比重由2010年的1.8%增加到2016年的6.1%,年均增加0.72个百分点。参考相关研究成果^[17]和专家咨询,综合判断非水可再生能源发电比重年均增加1个百分点虽乐观但有可能实现。如照这两种速度发展,到2050年非水可再生能源发电量的比重将分别达到30.2%和39.0%,所以笔者将30.2%、31.0%(对30.2%向上取

整)和39.0%分别作为参考情景、低碳情景和强化低碳情景的非水可再生能源发电量比重的发展目标。本研究的重点不在于定量给出三个情景的碳排放量,而是希望通过对情景间的比较,从减排贡献、政策减排成本和相关效益等角度,识别出较优的政策选项或组合。

3 结果及分析

3.1 不同情景的关键指标分析

三个情景的装机容量呈现不同速度的增长,参考、低碳和强化低碳情景下到2050年的电力装机容量将分别达到38.1亿kW、43.1亿kW和44.4亿kW(见图2)。低碳和强化低碳情景下电力装机容量之所以明显高于参考情景,主要是因为风电、光伏等可再生能源发电占比上升,而同样发电量下替代单位火电装机需2~3个单位的风电或光伏等可再生能源装机。就煤电装机而言,到2050年,参考、低碳和强化低碳情景下的煤电装机分别为11.8亿kW、7.8亿kW和6.5亿kW,占总装机比重分别为30.9%、18.0%和15.0%,非化石电力装机比重分别达到61.9%、75.6%和81.6%。

三个情景的发电量结构有显著差异(图3)。就可再生能源发电占比而言,2015年为28.0%左右,由于采用了不同力度的可再生能源配额制,低碳情景

表1 三个情景下中国电力行业的主要政策设定
Table 1 Policy settings in three scenarios of power sector in China

	参考情景	低碳情景	强化低碳情景
情景定义	延续当前发展趋势,现有政策措施逐步到期且新的政策不再出台。电力行业基本完成已公布的行业相关目标。电力行业相关技术得到一定发展,但能在中短期内实现显著突破	主动采取更积极的政策措施,促进全社会各行业开展碳减排。政府和市场手段并用,加大电力行业对落后燃煤机组的淘汰和替换力度,推动非化石能源电力规模扩大。电力行业相关技术实现了较快的发展	在低碳情景的基础上,对电力行业实施更为严格的碳排放约束,设置更加强化且有约束力的非化石发展目标,充分发挥市场对于配置资源的作用,推动以更低的成本实现减排。电力行业相关技术实现重大突破
生产侧政策	延续现有政策趋势	强化可再生能源发展,2050年,通过可再生能源配额制政策使非水可再生能源发电量占比至少达到31.0%;加大落后燃煤机组的淘汰力度	加大可再生能源电力的规模化发展,2050年,通过可再生能源配额制政策使非水可再生能源发电量占比至少达到39.0%;不断强化落后燃煤机组的淘汰力度
需求侧政策	延续现有政策趋势	适度积极的需求侧管理,推动储能技术的发展	高效的需求侧管理,储能技术大规模发展
其他政策	无碳价格政策;CCUS技术难以实现突破性进展,到2050年电力行业年捕集埋存2.0亿t CO ₂ 左右	在电力行业引入碳价格,到2050年碳价达到160元/t CO ₂ (2012年人民币不变价);碳排放约束推动CCUS技术发展大幅提速,到2050年电力行业年捕集埋存7.0亿t CO ₂ 左右	在电力行业引入碳价格,到2050年碳价达到200元/t CO ₂ (2012年人民币不变价);CCUS技术取得突破,到2050年电力行业年捕集埋存13.0亿t CO ₂ 左右

2017年12月

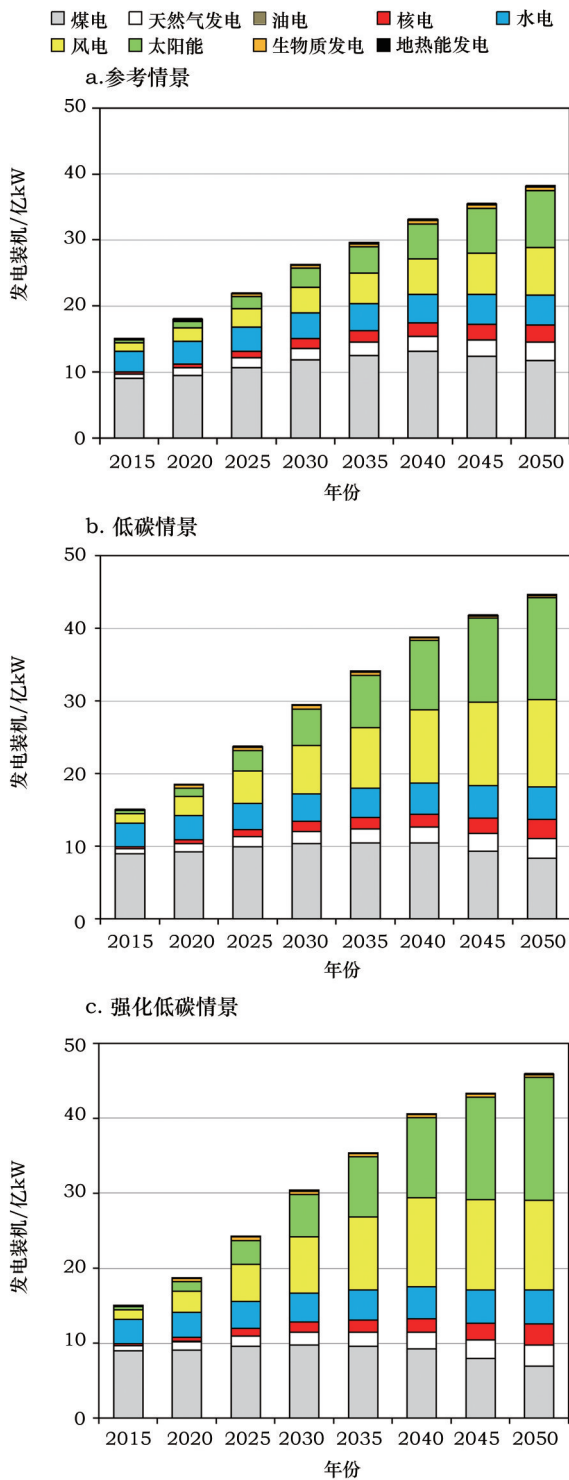


图2 2015—2050年三个情景下的中国装机容量变化趋势

Figure 2 Power capacity trend in three scenarios in China
from 2015 to 2050

和强化低碳情景的非化石发电量增长明显快于参考情景,到2030年分别上升到42.9%和45.9%,分别比参考情景增加7.5个和10.5个百分点,到2050年

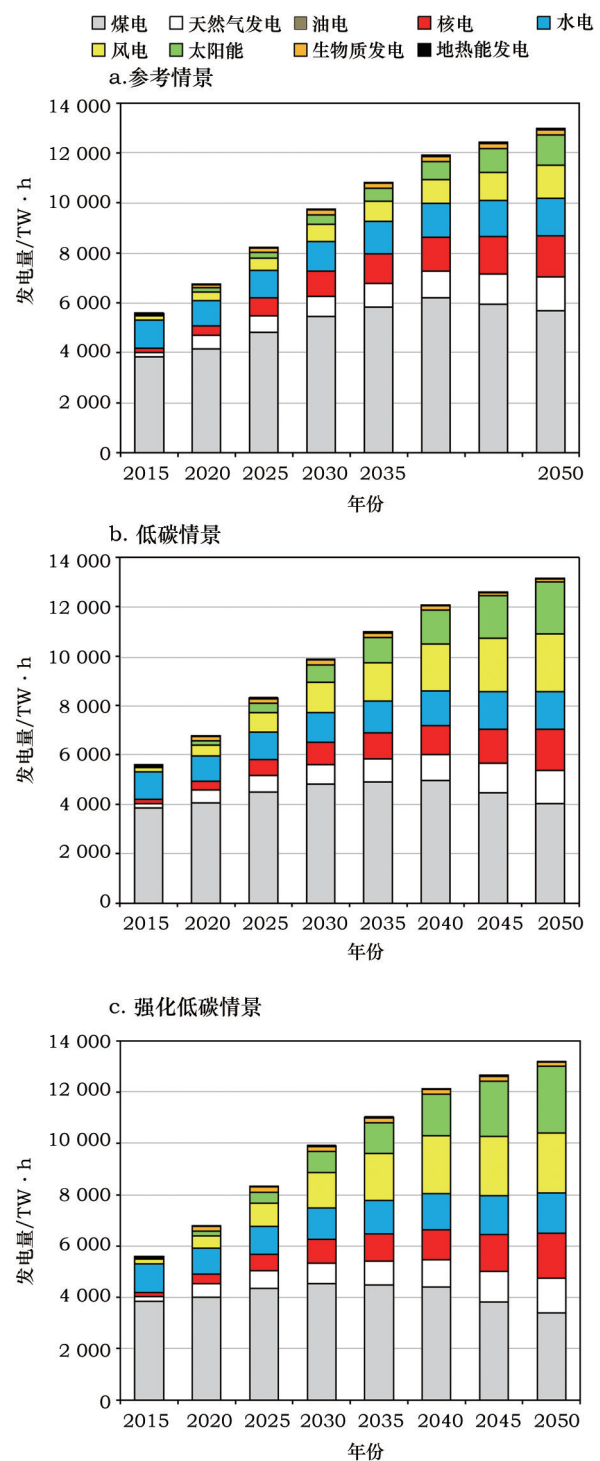


图3 2015—2050年三个情景下的中国发电量变化趋势

Figure 3 Power generation trend in three scenarios in China
from 2015 to 2050

则分别增至59.4%和64.5%,分别比参考情景增加13.7个和18.8个百分点。

三个情景的电力行业碳排放表现出不同变化

趋势(图4)。参考情景下,电力行业碳排放量在2040年前持续增长,2040年左右达到峰值58.4亿t CO₂,到2050年降为51.1亿t CO₂;低碳情景下,电力行业碳排放量增速有所放缓,在2030年左右达到峰值46.5亿t CO₂,之后下降到2050年的27.9亿t CO₂;强化低碳情景下,电力行业碳排放亦2030年左右达到峰值43.8亿t CO₂,随后快速下降到2050年的17.1亿t CO₂。控制电力行业碳排放与控制常规大气污染物排放具有协同效益,低碳和强化低碳情景中的常规大气污染物(如PM_{2.5}、NO_x和SO_x)排放量变化趋势与碳排放量变化趋势类似,呈现出先增长后下降的趋势,到2050年回落到2015年之前水平(见图5)。

总的来说,电力行业碳排放达峰取决于几项关键政策措施的实施力度,如煤电装机提前淘汰、可再生能源发展、电力需求侧管理等,如果这些政策力度够强,电力行业完全有条件在2030年左右实现碳排放峰值,且峰值控制在47.0亿t CO₂以下,相比2015年碳排放水平仍有约12.0亿t CO₂左右的增量空间。

3.2 不同情景的政策减排贡献分析

在低碳情景下,不同政策带来的减排贡献有明显不同(见图6a)。可再生能源配额制、碳价格这两项政策碳减排贡献最大,到2050年分别减排6.6亿t CO₂和7.8亿t CO₂。CCUS技术在2030年之后逐渐发挥减排作用,到2050年可以减排5.5亿t CO₂。煤电装机提前淘汰政策因政策力度相对较小,碳减排贡献亦相对较小,到2050年仅能实现1.0亿t CO₂

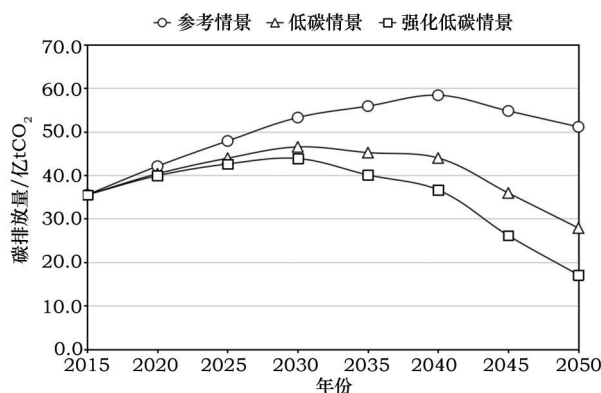


图4 2015—2050年三个情景下的中国电力行业 CO₂ 排放

Figure 4 Power sector CO₂ emission in three scenarios in China from 2015 to 2050

减排贡献。从减排贡献占比来看,到2050年可再生能源配额制、碳价格、CCUS技术三项政策的减排贡献加总可以达到85.5%。

在强化低碳情景下,可再生能源配额制、碳价格、CCUS技术和煤电装机提前淘汰的政策力度强于低碳情景,到2050年,上述政策实施后实现的减排贡献分别达到7.0亿t CO₂、9.7亿t CO₂、11.0亿t

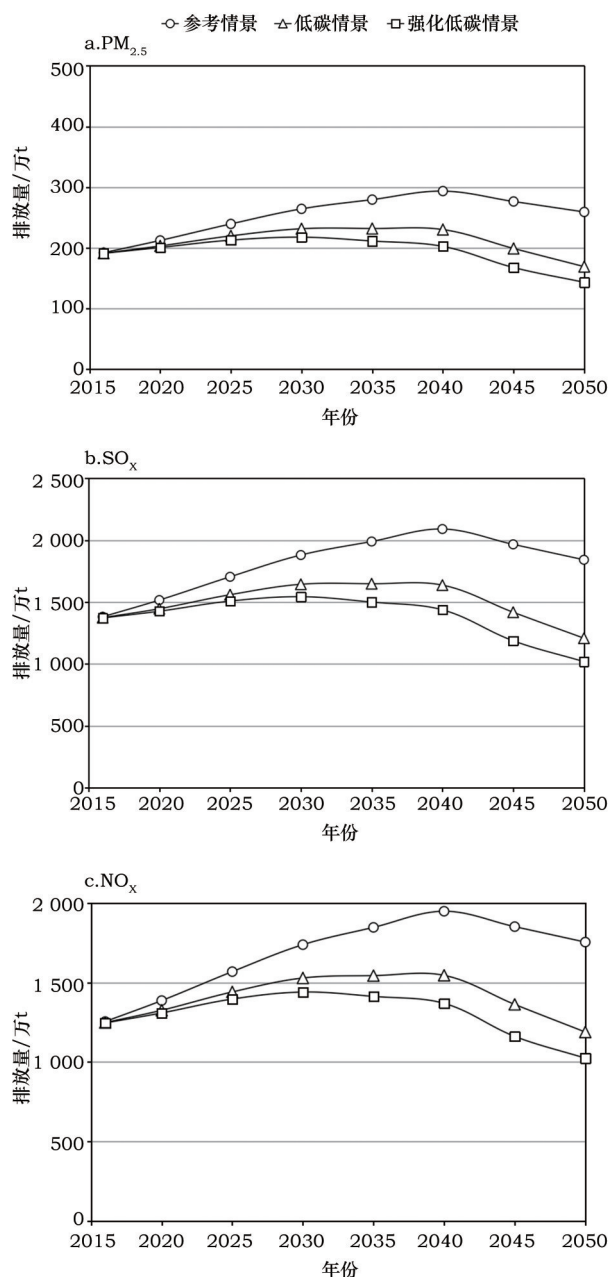


图5 2015—2050年三个情景下的中国电力行业常规大气污染物排放

Figure 5 Power sector air pollutant emissions in three scenarios in China from 2015 to 2050

2017年12月

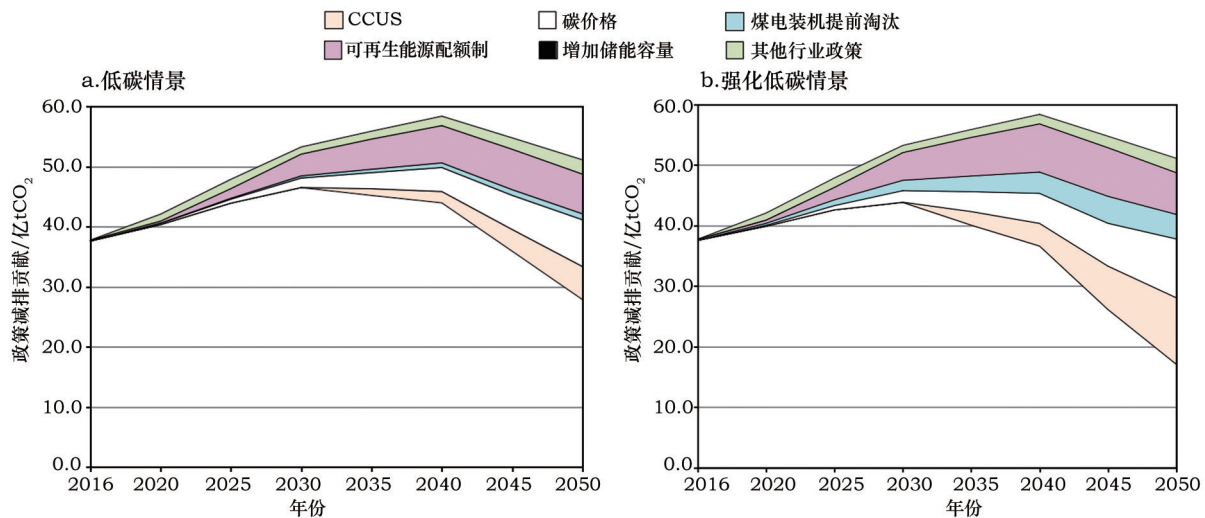


图6 2016—2050年低碳情景和强化低碳情景下的中国电力行业政策碳减排贡献

Figure 6 Contributions to carbon reductions by policy in low-carbon and enhanced low-carbon scenarios of power sector in China from 2016 to 2050

CO₂和4.1亿t CO₂(见图6b)。比较而言,实施增加储能容量政策的碳减排效果并不显著。从减排贡献占比来看,到2050年可再生能源配额制、碳价格、CCUS技术三项政策的减排贡献加总可以达到81.3%。

对单项政策的减排成本评估结果见表2。本文中,减排成本是指由于政策实施带来的资本设备支出变化和运营维护支出变化之和。其中,前者包括新建发电厂或建筑供暖系统带来的支出变化等,后者主要指燃料使用和劳务税带来的支出变化。通

过对减排成本进行的分析可知,可再生能源配额制能够降低总成本,尽管该项政策的实施会使规划期的投资成本增加,但减少的发电燃料需求和运行成本下降可以抵消这部分成本增量,还可带来净收益。实施煤电装机提前淘汰、增加储能容量、碳价格和CCUS技术都将增加总成本,但成本增幅不同。若单独实施这四项政策,则在整个规划期内的减排成本增量分别为77元/t CO₂、1.73万元/t CO₂、3691元/t CO₂和245元/t CO₂(2012年人民币不变价,下同)。特别说明的是,尽管增加储能容量会大幅度增加总成本,并且减排效果并不显著,但该政策可以改善并提高电网的灵活性,有利于电网的健康稳定发展。

本研究还评估了电力行业政策实施后的社会效益。社会效益是指由于避免颗粒物污染导致的过早死亡的货币化数值和气候损失的货币化数值之和¹⁾。低碳和强化低碳情景下,2050年社会效益增量分别达到2.1万亿元和2.8万亿元,相当于2050年GDP的0.8%和1.1%。

4 结论和政策建议

4.1 结论

本文利用能源政策模拟模型研究了参考情景、低碳情景和强化低碳情景下电力行业关键指标变

表2 中国三种情景下相关政策的碳减排贡献与减排成本

Table 2 Contributions to 2050 carbon reduction and cost by policy under three scenarios in China

政策	2050年减排贡献/%		减排成本 /(元/t CO ₂)
	低碳情景	强化低碳情景	
可再生能源配额制	28.4	20.5	-367
煤电装机提前淘汰	4.3	11.9	77
CCUS技术	23.6	32.2	245
电力行业碳价	33.5	28.6	3 691
增加储能容量	—	-0.2	17 332
其他行业政策	10.2	7.0	—

注:①减排成本为正值表示该政策将增加成本,减排成本为负值则说明该项减排政策可带来净收益;②某项政策的减排成本是指整个规划期内的算术平均减排成本;③表格中“—”表示无此项数据。

1)由于避免颗粒物污染导致的过早死亡的货币化数值是用颗粒物总减排量、单位排放量致死人数、单位死亡人数的经济成本计算得出;气候损失的货币化数值是用碳减排总量和单位碳的社会成本计算得出。

化、不同政策的减排贡献及减排成本,得到以下主要结论:

(1)参考、低碳和强化低碳情景下到2050年的电力装机容量将分别达到38.1亿kW、43.1亿kW和44.4亿kW,届时非化石发电装机比重分别为61.9%、75.6%和81.6%。

(2)参考、低碳和强化低碳情景下电力行业分别在2040年、2030年和2030年达峰,峰值水平分别为58.4亿t CO₂、46.5亿t CO₂和43.8亿t CO₂。

(3)从减排贡献来看,可再生能源配额制、碳价格、CCUS技术这三项政策碳减排贡献大,是电力行业显著减少碳排放、尽早实现碳排放峰值的重要政策。

(4)从单项政策的减排成本看,可再生能源配额制能够降低总成本,煤电装机提前淘汰、增加储能容量、碳价格和CCUS技术都将增加总成本,但成本增幅不同。

4.2 政策建议

从研究中看出,对电力行业来说有多项政策可促进碳排放的控制,如果政策组合得当,能推动电力行业碳排放早日达峰,并将碳排放水平控制在较低水平,同时还能带来显著的经济效益和社会效益。结合上述研究结果,提出以下推动电力行业低碳发展的政策建议:

(1)完善体制机制,推动电力结构不断优化。一方面,要强化实施可再生能源配额制,制定更加积极的中长期国家非水电可再生能源电量比重指标,将指标分解到地方并确保严格执行,同时加强电力需求侧管理,减少无效电力需求和削峰填谷,实现电力发电端的有效利用。另一方面,推进供给侧结构性改革,化解煤电产能过剩,促进煤电有序发展,在做好存量清洁化、增量先进化、严格控制新增煤电规模的基础上,不断提高超临界和超超临界机组在新建燃煤机组的比例。

(2)充分利用市场手段,实现电力行业碳排放控制。积极利用碳交易等市场机制促进煤电厂能效提升,在强化煤电厂控制碳排放的意识和基础能力的同时,通过合理的碳排放配额分配和交易机制,降低煤电厂碳减排的成本,引导煤电行业向更清洁、高效的方向转型。建立健全全国碳排放权交

易市场制度体系,为电力行业参与全国碳市场提供法律依据,并推动电力企业加强基础能力建设,完善数据基础。

(3)强化科技支撑,加快相关技术研发和推广。一方面,加大对CCUS技术的重视及支持力度。将CCUS技术的示范和商业化应用与国家政策导向紧密相连,通过在国家层面建立完善的CCUS相关法律法规体系、制定可行的发展规划与技术路线图、出台一系列优惠政策,拓宽CCUS技术发展的融资渠道,最终实现CCUS技术的突破式发展和规模化商业利用。另一方面,加大对储能技术、大规模可再生能源发电并网、电动汽车充电技术、智能电网等技术的研发示范和应用,强化电网建设,加强煤电机组灵活性改造,从技术上为可再生能源的规模化利用提供保障。

参考文献(References):

- [1] 国际能源署. 世界能源展望2015 [EB/OL]. (2015-11-10)[2017-08-01]. <http://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2015SUM.pdf>. [International Energy Agency, (IEA). World Energy Outlook 2015 [EB/OL]. (2015-11-10)[2017-08-01]. <http://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2015SUM.pdf>.]
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [NBSC (National Bureau of Statistics of China). China Energy Statistical Yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [3] 中国电力企业联合会. 2016年度全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL]. (2016-02-03)[2016-05-10]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2016-02-03/148763.html>. [China Electricity Council. National Forecast Report of Power Industry Demand and Supply Situation [EB/OL]. (2016-02-03)[2016-05-10]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2016-02-03/148763.html>.]
- [4] 中国电力企业联合会. 2013年电力统计基本数据一览表 [EB/OL]. (2014-06-06)[2016-05-10]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/nianrushuju/2015-03-06/134849.html>. [China Electricity Council. Annual Statistics of China Power Industry 2013 [EB/OL]. (2014-06-06)[2016-05-10]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/nianrushuju/2015-03-06/134849.html>.]
- [5] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. (2016-03-18)[2016-05-10]. <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146392/c4676365/content.html>. [Xinhua News. The 13th Five-Year Plan for Economic and Social De-

2017年12月

- velopment of the People's Republic of China [EB/OL]. (2016-03-18)[2016-05-10]. <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146392/c4676365/content.html>.]
- [6] 国务院. 国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知[EB/OL]. (2016-10-27)[2017-05-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm. [The State Council. Work Plan to Control Greenhouse Gas Emissions during the 13th Five-Year Plan Period[EB/OL]. (2016-10-27)[2017-05-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.]
- [7] European Environment Agency. Environment and Climate Policy Evaluation [EB/OL]. (2016-09-05)[2017-08-01]. <https://www.eea.europa.eu/publications/environment-and-climate-policy-evaluation>.
- [8] 黄青. 我国政府政策的量化研究综述[J]. 消费导刊, 2016, (2): 19-19. [Huang Q. Research review on quantitative analysis on governmental policies[J]. *Consume Guide*, 2016, (2): 19-19.]
- [9] European Environment Agency. Reporting on Environmental Measures: Are We Being Effective? [EB/OL]. (2016-11-10)[2017-08-01]. <https://www.eea.europa.eu/publications/rem>.
- [10] Kerr A. Serendipity is not a strategy: the impact of national climate programmes on greenhouse gas emissions[J]. *Area*, 2007, 39(4): 418-430.
- [11] Mikael H, Andrew J, Tim R. Climate policy innovation: developing an evaluation perspective[J]. *Environmental Politics*, 2014, 23(5): 884-905.
- [12] 胡玥昕, 江洪, 王颖, 等. 基于系统动力学的工业产业经济与碳排放综合分析-以无锡装备制造业为例[J]. 生态经济, 2014, 30(8): 17-22. [Hu Y, Jiang H, Wang Y, *et al.* System dynamics modeling for economics and carbon emission analysis of industries: a case study of equipment manufacturing industry in Wuxi, China[J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(8): 17-22.]
- [13] 张振伟, 杨路华, 高慧嫣, 等. 基于 SD 模型的河北省水资源承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2008, (3): 20-23. [Zhang Z W, Yang L H, Gao H Y, *et al.* Study on water resources carrying capacity based on system dynamics model in Hebei province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008, (3): 20-23.]
- [14] 韩雨, 张喜. 基于 Vensim 仿真的城市机动车耗油量预测方法研究[J]. 山东科学, 2012, 25(4): 69-73. [Han Y, Zhang X. Research on a Vensim simulation based prediction method of urban vehicle fuel consumption[J]. *Shandong Science*, 2012, 25(4): 69-73.]
- [15] 齐晔. 2010 中国低碳发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Qi Y. Annual Review of Low-Carbon Development in China: 2010[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [16] 韩文科, 康艳兵, 刘强. 中国 2020 年温室气体控制目标的实现路径与对策[M]. 北京: 中国发展出版社, 2012. [Han W K, Kang Y B, Liu Q. China's 2020 Low-Carbon Targets: approaches and Measures[M]. Beijing: China Development Press, 2012.]
- [17] Liu Q, Chen Y, Tian C, *et al.* Strategic deliberation on development of low-carbon energy system in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7(1-2): 26-34.
- [18] 刘强, 陈怡, 滕飞, 等. 中国深度脱碳路径及政策分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 162-170. [Liu Q, Chen Y, Teng F, *et al.* Pathway and policy analysis to China's deep decarbonization[J]. *Journal Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2017, 27(9): 162-170.]
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [NBSC (National Bureau of Statistics of China). China Statistical Yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [20] 国家能源局. 中国电力发展“十三五”规划(2016-2020 年)[EB/OL]. (2016-11-07)[2017-08-01]. <http://www.big-bit.com/down/show.php?id=236897>. [National Energy Administration. The 13th Five Years Plan for National Power Sector (2016-2020) [EB/OL]. (2016-11-07)[2017-08-01]. <http://www.big-bit.com/down/show.php?id=236897>.]

Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector

LIU Qiang¹, TIAN Chuan¹, ZHENG Xiaoqi^{1,2}, CHEN Yi¹

(1. National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, Beijing 100038, China;

2. School of Environment & Natural Resources of Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: The power sector in China has undergone significant development with remarkable achievements. Along with stronger carbon emission constraints, the Chinese government will launch more low-carbon policies and measures across the power sector, which makes it important to conduct a scientific evaluation of these policies and measures. Here we built a system dynamics model termed the Energy Policy Solution model, based on Vensim software and present a comprehensive analysis under Reference, Low-Carbon and Enhanced Low-Carbon scenarios. The key indicators of the power sector, CO₂ abatement contribution and abatement costs of different policies are reviewed and evaluated. We found that many policies make a great contribution to CO₂ emission control in the power sector, and if these policies can be combined appropriately, an earlier peak in CO₂ emission in the power sector can be expected at a relatively lower level with significant economic and social benefits. Suggestions include improving the regulatory system and related mechanisms to drive the continuous optimization of power generation structure; making full use of market-based measures to control CO₂ emissions in the power sector effectively; and providing necessary support to speed up research, development and application of relevant technologies.

Key words: power sector; CO₂ emission reduction; energy policy solution model; scenario analysis; policy evaluation; policy suggestion; China