

引用格式: 牟初夫, 王礼茂, 屈秋实, 等. 主要新能源发电替代减排的研究综述[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2323-2334. [Mou C F, Wang L M, Qu Q S, et al. Review of emission reduction research on major new energy generation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2323-2334.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.11

# 主要新能源发电替代减排的研究综述

牟初夫<sup>1,2</sup>, 王礼茂<sup>1,2</sup>, 屈秋实<sup>1,2</sup>, 方叶兵<sup>1,2,3</sup>, 张 宏<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003;

4. 中国人民解放军信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450002)

**摘 要:** 新能源替代传统化石能源对实现2030年碳排放达峰目标具有重要作用。新能源发电替代减排是碳减排最为重要的形式之一, 积极开展相关领域的研究意义重大。本文在对国内外有关新能源发电替代减排的研究文献进行搜集、整理和分析总结的基础上, 对已有研究成果从新能源资源潜力评估、发电替代减排量测算、产业全生命周期碳排放计算和减排的成本效益等四个方面进行了整理。综述发现已有的新能源发电减排量测算方法各有利弊, 新能源产业自身碳排放核算缺乏统一的界定范围, 而且新能源的开发成本和效益也缺乏明确的核算标准。最后, 本文从如何对新能源的技术进步率进行科学预测、系统地建立新能源发展与减排的效益评估体系、减排目标下新能源产业发展路径的描述等研究方向进行了展望。

**关键词:** 新能源发电; 替代减排; 成本效益分析; 综述

DOI: 10.18402/resci.2017.12.11

## 1 引言

新能源和可再生能源能够替代传统化石能源, 既能缓解化石能源消耗增长过快、对生态环境造成严重影响的问题, 又能有效补充能源供给、调整能源结构, 是中国未来能源发展的战略重点<sup>[1]</sup>, 同时也是中国在2030年左右达到碳排放峰值的重要途径。按时达峰的关键是降低能源消费总量、合理调整能源结构, 在保证一定的经济发展速度的前提下, 努力提高新能源在一次能源消费中的占比<sup>[2-5]</sup>。

虽然中国的新能源发电装机量呈快速增长的趋势, 但是由于投资者与经营者在新能源利用方面的责任和义务不明确, 利用效率不高, “重建设、轻利用”的情况较为突出, 供给与需求不平衡、不协调, 致使新能源替代化石能源消费的潜力未能被充分挖掘。据统计资料显示, 2015年中国一次能源消

费占全世界消费量的22.9%, 可再生能源却只占一次能源消费的2.08%, 与世界上一些占比较高的国家如丹麦(25.16%)、葡萄牙(14.63%)、德国(12.46%)等相比仍有较大差距<sup>[6]</sup>。在目前这样严峻的新能源应用形势下, 中国想要按时完成减排的自主行动目标是存在一定压力的。为了解决新能源应用以及替代减排中的一系列问题, 积极开展相关的研究是必要的。

新能源替代减排有很多种形式, 在发电、居民生活、供暖、建筑节能、低碳交通等多个方面都有广泛应用, 其中发电替代减排是新能源减排的最重要的形式之一。由于新能源发电本身基本不产生碳排放, 因此使用新能源替代传统火力发电可达到减少碳排放的目的, 但具体到实际操作层面又衍生出了一些新的问题。在文献梳理与归纳总结的过程

收稿日期: 2017-09-07; 修订日期: 2017-11-20

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); 国家自然科学基金项目(41171110)。

作者简介: 牟初夫, 男, 湖北松滋人, 博士生, 从事能源经济与地缘政治研究。E-mail: mouchufu@163.com

通讯作者: 王礼茂, E-mail: lmwang@igsrr.ac.cn

中,笔者发现已有的对新能源替代减排的研究成果主要集中在以下几方面:一是新能源资源潜力的估算;二是发电量替代减排量的计算;三是新能源产业自身周期内产生的碳排放;四是新能源减排的成本效益分析。本文将主要从以上四个方面梳理已有的对风能、太阳能、生物质能这三种主要新能源的研究成果,总结已有研究的不足之处,并尝试为新能源替代减排领域提供一些可能的研究方向的参考。

## 2 国内新能源资源潜力评估研究述评

### 2.1 风能资源

风能资源的贮量取决于地区风速的大小和有效风速的持续时间,而对于风能转换装置而言,可利用的风能是在“起动风速”到“切出风速”之间的风速段,这个范围的风能即通称的“有效风能”<sup>[7]</sup>。

估算方法主要包括以下4种:①基于气象台站常规观测资料的风能资源评估,即运用气象台站的常规气象观测数据进行风能资源评估,然后通过幂指数关系外推得到更高处的风能资源分布图<sup>[7,8]</sup>;②利用风电场的测风塔观测数据进行风能资源的评估<sup>[9]</sup>。该方法由于成本较高,因此多用于小范围(如风电场)的风能资源评估;③利用数值模式的风能资源评估,如利用中尺度气象模式MM5进行区域性风能资源评估<sup>[10,11]</sup>;④结合观测资料和其他影响因子的多指标综合评估<sup>[12]</sup>。

学者们对中国风能资源理论开发潜力的估值主要分为陆上风能和近海风能两部分。对中国陆上风能资源估算较权威的结果为全国第一、二、三次风能资源普查所得到的技术可开发量,分别为1.6亿kW、2.53亿kW、2.97亿kW<sup>[13]</sup>,可以看到随着

风能开发技术的进步,技术可开发资源量的递增较为明显。近海风能资源由于缺乏必要的技术数据,评估难度比较大,代表性的评估为Hong等计算出的中国2010年、2020年和2030年全年的近海技术可开发的风能发电量分别为17.2亿(kW·h)、24.1亿(kW·h)和27.6亿(kW·h)<sup>[14]</sup>。

### 2.2 太阳能资源

目前国内表征太阳能资源数量通常用太阳总辐射和日照时数这两个指标来表征<sup>[8,15]</sup>。与风能资源评估类似,也存在利用气象台站观测数据<sup>[9,16,17]</sup>、经验公式估算<sup>[18]</sup>、卫星遥感反演<sup>[19-21]</sup>等方法。

全国太阳能开发潜力的估值研究较少,主要权威数值为国家气象局风能太阳能资源中心所公布的2015年陆地太阳能资源理论储量为1.86万亿kW<sup>[22]</sup>,其他学者的研究多集中于太阳能利用潜力的区域评价与分析,以及单独各省份的太阳能开发潜力估值<sup>[23-26]</sup>。

### 2.3 生物质能资源

相比较于太阳能和风能资源潜力的研究,由于生物质能不属于商品能源,因此传统统计口径中通常不包括生物质能,一定程度上限制了农业生物质发电潜力方面的研究。代表性的研究包括刘刚等对中国2004年秸秆、畜粪、林木生物质、城市垃圾和废水的资源蕴藏潜力和实物蕴藏潜力进行的估算(表1)<sup>[27]</sup>。还有一些学者从主要农作物秸秆和废弃物入手,结合主要农作物的种植面积、种植结构、单产以及秸秆的主要用途,对现有耕地主要农作物未来生物质能可开发利用潜力进行分析评价<sup>[28,29]</sup>,代表性研究结果有刘志彬等得到的2011年中国主要农业生物质资源的最大发电潜力为0.68亿kW,净

表1 2004年中国主要生物质能资源汇总

Table 1 Summary of major biomass resources in China in 2004

类型	实物总蕴藏量 /亿t	总蕴藏潜力量 /亿tec	理论可获得量 /亿tec	所占比例 /%
秸秆及农业加工剩余物	7.28	3.58	1.79	38.90
畜禽粪便	39.26	18.80	1.02	22.14
薪柴和林木生物质能	21.75	12.42	1.66	36.01
城市垃圾	1.55	0.22	0.09	1.93
城市废水	482.4	0.09	0.05	1.02
合计		35.11	4.60	100.00

注:表中数据引自刘刚等<sup>[27]</sup>的研究成果。

2017年12月

剩余资源发电潜力为0.12亿kW,其中玉米、稻谷和小麦三种大宗农作物秸秆及加工剩余物的发电潜力较大<sup>[30]</sup>;朱开伟等对中国2050年低还田比、中还田比和高还田比三种情景下主要农作物最终可利用生物质能进行了预测,得到了1.86亿t、0.93亿t和0.15亿t煤的结果<sup>[31]</sup>。

### 3 新能源发电减排量测算方法比较

学术界的研究主要分为计算新能源发电量替代火力发电排放量和计算新能源系统减排潜力这两类方法。

#### 3.1 发电量所替代的减排潜力

由于新能源发电过程中本身不排放CO<sub>2</sub>,因此一般将对其减排潜力的计算转化为计算其发电量进入电网后所避免的当地火电厂发出同等电能所产生的温室气体排放。这种计算方法涉及到CO<sub>2</sub>排放系数的问题。

CO<sub>2</sub>排放系数是指每一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量,即某地(指一个国家范围内)混合电厂(使用多种燃料)每发1kW·h电能,平均排放CO<sub>2</sub>的数量,单位是kgCO<sub>2</sub>/(kW·h)。具体计算时,将发电时消耗各种燃料的数量与相应的燃料排放因子相乘,再除以当年各种燃料总发电量,就可得到CO<sub>2</sub>排放系数<sup>[32]</sup>。

国际上较为认可的排放系数包括IPCC与国际能源署(IEA-PVPS)、欧洲光伏技术讲坛(EPTP)和欧洲光伏工业协会(EPIA)在2006年5月联合发布的报告“2006年国家温室气体清单指南目录”中列出的缺省排放因子<sup>[33]</sup>(表2)。这个系数适用范围较广,但不适用于比国家尺度更小的排放计算。

2011年中国颁布了《省级温室气体清单编制指南》<sup>[34]</sup>,将区域电网边界按目前的东北、华北、华东、华中、西北和南方电网划分,其平均排放因子可由上述电网内各省区市发电厂的化石燃料CO<sub>2</sub>排放量除以电网总供电量获得。这样一来CO<sub>2</sub>排放系数便细化到了省一级(表3)。

此种方法目前是估算新能源减排潜力的主流方法,比如《Nature Energy》上发表的一篇文章显示,到了2030年,中国可以通过风能满足26%的电力需求,而且这些风能只是中国所有风力资源的10%。如果加上对煤炭发电的调整,2030年20%的一次能

表2 能源工业中固定源燃烧的碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient table of fixed source combustion in energy industry

能源种类	单位热值 含碳量	缺省CO <sub>2</sub> 排放因子	1kg燃料燃烧 产生的CO <sub>2</sub> 排放
	/(kg/GJ)	/(kg/GJ)	/kg
原油	20.08	73.30	3.65
汽油	18.90	70.00	3.70
柴油	20.20	74.10	3.67
焦炭	29.42	107.00	3.64
褐煤	28.07	101.00	3.60
无烟煤	27.34	98.30	3.60
天然气	15.32	56.10	3.66

注:1)单位热值含碳量来自《省级温室气体清单编制指南》<sup>[34]</sup>,缺省CO<sub>2</sub>排放因子来自《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[33]</sup>;2)原始数据以J为单位,为与统计数据单位一致,将能量单位转化成ec,转化比例为:1kg ec热值(低位发热量)≈0.0293 GJ<sup>[34]</sup>。

表3 2005年中国区域电网单位供电平均CO<sub>2</sub>排放

Table 3 Average CO<sub>2</sub> emissions of unit power supply in China's regional power grids in 2005

电网 划分区域	覆盖省区市	CO <sub>2</sub> 排放 /(kg/(kW·h))
华北区域	北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古西部地区	1.246
东北区域	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古东部地区	1.096
华东区域	上海、江苏、浙江、安徽、福建	0.928
华中区域	河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆	0.801
西北区域	陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆	0.977
南方区域	广东、广西、云南、贵州	0.714
海南	海南	0.917

注:数据来源于《省级温室气体清单编制指南》<sup>[34]</sup>。

源消费来自非化石能源的这个目标,仅靠风能便可实现3/4<sup>[35]</sup>。李红强等在设置了中国低碳能源发展情景的前提下,从总量、分品种和分领域评价了两种情景下低碳能源的发展潜力和减排潜力,结果表明发展低碳能源对实现国家减排目标的最低贡献为12.58%,最高则可达30.25%,且经济增长速度越快,低碳能源对实现国家减排目标的贡献越低<sup>[36]</sup>。龚道仁等建立了光伏发电系统碳排放的数学计算模型,给出了在不同辐照条件下光伏发电系统的典型计算实例,研究结果表明,与燃煤发电相比,在太阳年辐照量为(3000~9000)MJ/m<sup>2</sup>的地区使用光伏发电系统,均具有良好的碳减排效果。以上减排潜力的估算均基于对新能源的等价排放因子的测算<sup>[37]</sup>。

### 3.2 新能源系统减排潜力(PM)

这个潜力计算方法的定义是由给定的单位功率新能源系统输出的电能相当于减少温室气体的排放数量,也就是安装单位功率(通常用1kW)的新能源系统,在其寿命周期内,所输出电能可相当于减少排放的CO<sub>2</sub>数量。这个计算方法不看最终能源系统的发电量,而是与新能源系统本身的性能、当地气象及地理条件以及系统的类别(并网还是离网)和安装方式等因素有关。

采用此种方法估测减排潜力的代表性研究包括:IEA评估了26个经合组织(OECD)国家的41个主要城市,发现光伏减排潜力最好的是珀斯,最差的是奥斯陆<sup>[38]</sup>。Klein等则针对中国28个城市不同倾斜面上的太阳辐射量得到了当地全年能接收到的最大太阳辐照量,结果显示,拉萨地区光伏系统的减排CO<sub>2</sub>潜力最大,最少的则为重庆<sup>[39]</sup>。杨金焕分别对中国26个主要城市,按照最佳倾角和垂直安装两种并网光伏系统的情况进行了分析计算,得到了每1kW光伏系统在其寿命周期内能够减少CO<sub>2</sub>排放量在(8.92~39.20)t之间的结论<sup>[32]</sup>。

## 4 新能源产业生命周期碳排放研究述评

新能源减排潜力巨大的原因是其在发电过程中基本不产生温室气体,新能源往往被认为是“零排放”的电力能源。但从产业的生命周期角度分析,新能源产业在设备制造、运输、安装、运行、废弃等环节和阶段也会带来一定量的温室气体排放。遵循生命周期分析方法进行新能源发电技术温室气体减排潜力比较和分析是具有重要意义的。对产业生命周期中的碳排放的测算多采用生命周期理论(LCA)来进行分析<sup>[40,41]</sup>。本研究主要选取光伏、风电和生物质能三种新能源的生命周期碳排放来总结已有的研究成果。

### 4.1 太阳能

太阳能光伏产业的生命周期碳排放研究是新能源中比较成熟的。目前一部分研究将重点放在单晶硅、多晶硅生产开始的光伏电池生产链的碳排放<sup>[42,43]</sup>。这部分研究涉及较为专业的光伏电池制造技术与知识。

另一部分学者则关注了光伏安装后不同自然

环境对发电效果和减排潜力的影响。如龚道仁等从光伏发电系统生产过程和发电过程等方面系统分析了光伏发电系统碳排放及碳减排效果的各种影响因素,建立了光伏发电系统碳排放的数学计算模型,给出了在不同辐照条件下光伏发电系统的典型计算实例<sup>[37]</sup>。国外学者Louwen的团队计算了1975—2015年之间全球生产光伏组件所消耗的能源以及相应的碳排放。由于中国的发电能源结构以煤为主,所以在中国生产的光伏组件的碳排放要高出欧洲生产的光伏组件一倍。但随着技术进步和能源结构的改变,光伏组件生产的碳排放不断下降<sup>[44]</sup>。此外,Keiichiro等、Jungbluth等采用投入产出法对多个国家的太阳能和风力发电阶段生命周期进行了评价<sup>[45,46]</sup>。郭敏晓将光伏电站生命周期划分为原料生产、电池片生产、光伏组件组装、组件运输和废弃处置五个阶段。核算结果表明,光伏电站生命周期发电排放强度为292.4gCO<sub>2</sub>/(kW·h),能源回报率为6.71(能源回报率是指一个发电站在运行期内发出的电力与它在建设期、运行期为维持其建设、运行所消耗的所有电力的比值。以普通PV单晶硅为例,其回报比约为5.9~16.1)。原料生产阶段能耗和CO<sub>2</sub>占比均为最大,分别为72.84%和71.79%<sup>[47]</sup>。

### 4.2 风能

风能与光伏发电比较类似,都涉及到场地占用、设备生产、设备运输、后期环境恢复等过程,每个过程都有相应的碳排放。如邹治平等对风力发电的用料冶炼、材料运输、电厂建设这3个阶段进行分析,分别计算3个阶段中的单位能耗和环境影响,并与燃煤发电进行比较<sup>[48]</sup>。戴时雨等将自然植被纳入系统边界,计量风电场建设前后植被破坏及恢复带来的影响。在清单分析中,重点考虑对碳排放影响较大的配件生产以及运输、建设期工程车耗油排放,更加合理地核算风电场碳排放和量化其环境影响<sup>[49]</sup>。郭敏晓等应用上海某风电场数据进行核算,结果认为,风机生产阶段能耗和CO<sub>2</sub>排放占风电场生命周期能耗和CO<sub>2</sub>排放的比例均为最大,分别为68.23%和67.18%。风电场能耗强度和CO<sub>2</sub>强度分别为3.24gce/(kW·h)和9.47g/(kW·h),明显低于传统火电机组的相同指标<sup>[50]</sup>。

2017年12月

### 4.3 生物质能

目前生物质能发电主要成规模的形式包括直燃发电、气化发电等。郭敏晓不考虑植物生长阶段吸收CO<sub>2</sub>效应,重点考查生物质电厂的发电排放强度,计算出该值为527gCO<sub>2</sub>/(kW·h)<sup>[47]</sup>。冯超等应用生命周期评价(LCA)方法,以秸秆直燃发电项目为研究对象,对秸秆的种植、运输、粉碎干燥和燃烧发电等4个过程进行了清单分析,并分别计算出4个过程的能耗及其对环境的影响。结果表明,秸秆直燃发电对环境影响主要为烟尘和灰尘,对局部地区的影响占据首位。但与火电比较仍能在温室气体减排上起到积极作用<sup>[51]</sup>。林琳等研究表明,与常规火电相比,生物质直燃发电技术在环境性上的改善是极为显著的,和生物质气化发电相比也有优点。同时,也从降低环境负荷出发,指出了生物质直燃发电在推广应用中的需要注意的问题,如固体废弃物综合利用等<sup>[52]</sup>。王伟等以谷壳气化发电系统为研究对象,建立了共性的生命周期分析方法学模型和支撑数据库,对系统边界、环境影响指标、决定系统环境性的重要参数进行了讨论,同时也对生物质发电系统生命周期中的生物质资源获得阶段以及焦油产生的环境影响的评价方法进行了探讨<sup>[53]</sup>。

除了生命周期评价法之外,还可以按照清洁发展机制(CDM)的方法学来计算项目的碳排放。CDM国际规则要求,应建立一套有效且具操作性的程序和方法来估算、测量、核查和核证CDM项目产生的减排量。这样的一套程序和方法可称之为CDM方法学<sup>[54]</sup>。与LCA方法比较而言,CDM提供的方法学简化了计算过程,具有更加规整的计算范式,在国际上也更能得到认可<sup>[55]</sup>。但这并不意味着其可以完全取代LCA计算方法,在具体项目的碳排放计算中应结合二者的优势。

## 5 新能源减排的成本效益研究

2016年12月26日,国家发展改革委员会发出通知,进一步调低光伏及陆上风电上网电价,预示着发电行业竞争压力将不断增强<sup>[56]</sup>,成本效益问题成为了目前新能源发电领域最急需解决的问题。减排的成本效益研究可以从两方面来理解,从成本上来说是新能源的发电成本与传统火电成本的比较,效益上则是用新能源替代火电后对宏观经济发

展的影响以及其带来的社会及环境效益。

### 5.1 新能源发电的成本研究

#### 5.1.1 新能源发电成本计算相关研究

(1)新能源发电成本计算。随着新能源发电市场的迅猛发展,技术不断进步,各类新能源发电的成本正显著下降,市场竞争力越来越显著。欧洲风能协会的计算和分析表明,随着技术进步、风力发电机组单机容量的增大以及成本规模效应,风力发电成本从20世纪80年代9.2欧分/(kW·h)(单机容量95kW风机),下降至2006年5.3欧分/(kW·h)(单机容量2000kW风机),成本下降约40%<sup>[57]</sup>。郑照宁等利用GM(1,1)模型和学习曲线模型研究中国风电投资变化的趋势,比较了在资金有约束和无约束情景下风电投资成本的变化,指出风电进入商业化发展阶段时风电机组价格约占单位千瓦投资成本的50%左右<sup>[58]</sup>。马翠萍等对光伏发电成本进行了计算,发现在剔除财政补贴情况下,装机规模(10~50)kW光伏发电系统,2013年发电成本在(1.13~1.94)元/(kW·h),2015年将下降到(0.74~1.28)元/(kW·h),2020年将进一步下降到(0.58~1.00)元/(kW·h);若装机规模1MW以上的光伏发电系统,那么2012年发电成本在(1.03~1.79)元/(kW·h)之间,2015年有望降到(0.68~1.18)元/(kW·h),到2020年,将下降到(0.53~0.92)元/(kW·h)<sup>[59]</sup>。还有一些学者采用基于动态成本曲线的模型对未来新能源发电成本进行模拟,该模型的基本思想是生产成本的下降是经验积累的结果,能够较好地量化分析规模效应引起的成本下降<sup>[60,61]</sup>。

(2)新能源与火力发电的成本比较。已有的成本比较研究多集中于技术发展较为成熟且较早实现规模化开发的风电领域。郭全英通过风速分布模型、期望发电量模型、成本计算模型对中国风力发电的实际成本进行了研究,得出中国目前风力发电实际成本状况还很难同常规能源相竞争的结论;同时也从国产化的形式、装机容量的增长、风机技术的发展等方面进行分析,预测中国风力发电成本将呈不断下降的趋势<sup>[62]</sup>。蓝澜等发现即使不考虑新能源发电的鼓励性政策补贴和传统能源发电的环境外部性,风电项目仍比火电项目具有明显的成本优势,否定了对新能源成本过高的固有认识<sup>[63]</sup>。美

国斯坦福大学研究表明,煤电与风电的发电内部成本差别不大的,均为(3~4)美分/(kW·h);但是加上外部环境成本,煤电的成本就变成(5.5~8.3)美分/(kW·h),将超过风电成本<sup>[64]</sup>。

### 5.1.2 影响新能源发电成本的因素与降低成本的手段

(1)新能源发电成本的影响因素分析。影响新能源发电成本的因素有很多,已有的研究成果可大致归类为初始设备和组件的投资成本过高、运行维护费用过重、财务费用过多、上网电量过低等主要因素<sup>[59,61,65]</sup>。

(2)降低新能源发电成本的手段与方法研究。由于技术进步的原因,光伏和风机的组件价格持续下跌<sup>[66]</sup>,未来将拥有完全取代化石燃料发电的商业价值。同时,选取不同的并网方案<sup>[67]</sup>、增加适当的政府补贴、提高新能源上网的稳定性<sup>[64]</sup>、发电企业内部进行成本控制<sup>[68]</sup>等方法也可以有效降低新能源发电的成本。

## 5.2 新能源发电的减排效益研究

新能源开发利用可替代大量化石能源消耗、减少温室气体和污染物排放、显著增加新的就业岗位,对环境和社会发展起到重要且积极作用,其效益不能单纯用货币来衡量。

国际上一些机构在新能源效益评价方面做得较好。国际应用系统分析研究所(IIASA)组织了全球300余名科学家、200余名评审专家对世界能源系统转型开展了综合评估研究,并于2012年发布了具有重要影响力的研究报告《Global Energy Assessment-Toward a Sustainable Future》<sup>[5]</sup>。该报告对未来能源系统转型的路径、成本效益及其不确定性、政策选择等全面开展了分析。国际能源署每年的《能源技术展望》致力于能源转型技术研究,评估了各个能源技术领域的转型潜力并开展了成本效益分析<sup>[69]</sup>。

而在国内,减排效益的评价主要集中在新能源发展投入的经济性这一块。如方国昌等从非线性动力学入手,将新能源纳入节能减排演化系统,分析了新能源对能源强度和经济增长的影响。借助李雅普诺夫指数(Lyapunov Exponent,表示相空间相邻轨迹的平均指数发散率的数值特征)和分岔图分析了系统的动力学行为,得到了新能源约束下的

节能减排吸引子。借助神经网络,得到了满足中国情况实际系统的参数。结果表明:依靠新能源自身发展或单纯加大对新能源的经济投入,并不能很好地控制能源强度。当经济投入过大时会对经济发展带来很大的阻碍作用,甚至给经济带来致命的影响。加大包括新能源在内的节能减排等的综合投入,可以很好地降低能源强度,当综合投入加大时,开始对经济的阻碍也大,但是随着系统的进一步发展,当新能源发展成熟时,这种投入对经济的促进作用也大<sup>[70]</sup>。陈立斌采用技术经济评价方法对水电、风电、太阳能光伏发电和核电减排二氧化碳的经济性进行分析。分析结果表明,单从减排二氧化碳的经济性看,水电最好,其次为核电,再次是风电和太阳能光伏;如果从减排效果看,则核电最强<sup>[71]</sup>。

## 6 国内外研究评价与展望

### 6.1 已有研究评价

本文从新能源资源潜力评估、发电量替代减排计算、生命周期碳排放和减排的成本效益等方面着手,详细梳理了新能源替代减排领域的已有主要研究成果,以期能为未来的研究开展和减排政策制定提供参考。已有的研究范围涵盖风能、太阳能、生物质能等多种新能源。研究手段和方法多样化,研究数据来源多样,研究内容各有侧重,主要呈现如下特点:

研究对象上以发展规模较大、技术相对较为成熟的风电和光伏发电为主,而对其他新能源如生物质能、潮汐能、地热能则受关注较少;研究方法上多围绕生产成本曲线、生命周期理论模型等展开,在涉及到电力市场的研究中缺少复杂计量经济模型,致使结果缺乏一定的说服力;研究内容上,新能源发电量所替代的火力发电的排放量的计算研究和全生命周期碳排放量的计算研究都已较为成熟。新能源减排的成本研究主要集中于与传统火电成本的比较、发电成本影响因素分析以及如何降低发电成本的手段等方面,效益研究主要集中于对宏观经济发展的冲击研究和减少污染物排放等环境效益研究,集中体现了近年来环境成本概念在新能源产业研究领域的渗透。

已有研究仍存在以下不足:

(1)两种主要的新能源发电减排量测算方法各

2017年12月

有利弊。第一种方法算得的减排量依赖于碳排放系数的计算方式,而碳排放系数的计算往往由于能源消费统计口径的问题存在较大不确定性;第二种方法的前提是安装的新能源系统在寿命期内均以正常功率运行并发电并网,这个前提在目前风电、光伏弃用率较高的中国西北地区并不能完全成立。

(2)在新能源产业自身碳排放研究中,目前的生命周期评价(LCA)缺乏统一的界定边界,这给建立全面的全周期碳排放核算体系带来了困难。目前已有的研究中边界可以放宽到考虑风场或电厂占地对原有植被的破坏和后续的“草地恢复”过程<sup>[49]</sup>,也可以收窄到只考虑主要生产设备的生产加工中的碳排放。边界的不同所体现的研究尺度和研究视野也不一样。

此外,在考虑了所有可能的潜在碳排放之后,新能源的温室气体排放系数仍低于传统的火电,新能源发电替代火电的减排潜力毋庸置疑。但目前的LCA方法仅在火电领域应用较为成熟<sup>[72]</sup>,在新能源发电领域尚处于设备生产过程排放测算和发电过程减排测算研究相割裂的状态,还未形成产业链上下游结合的新能源减排潜力分析体系;而且目前的LCA分析多以单个电站或电厂为研究对象,其结果不具有普遍性,同时也不适用于国家层级的新能源减排潜力评价。

(3)新能源的开发成本和效益也缺乏明确的核算标准。近年来在大的环境保护和节能减排背景下,已有的新能源减排效益计算主要集中于清洁能源发电的环境效益计算这一方面,但由于缺乏相应专业规范的明确依据,通常采用以燃煤火电为对照的污染物排放量常规计算方法<sup>[73,74]</sup>,导致减排效益的计算模式较为单一,仅考量减排的经济性当然是不可取的,其环境效益、就业推动、社会效益等都需要考量进来,如何构建一个较为完善的成本效益评价体系显得尤为必要。在当下需要新能源在电力市场逐步替代煤电的政策环境下,对新能源发电在电力市场的成本、定价、并网模式等关键内容的研究也显得较为重要且紧迫。

## 6.2 研究展望

近期国际油价一直在低位徘徊,美国和澳大利亚等国页岩气行业的蓬勃发展使得开发成本较高

的新能源发电业面临更严峻的竞争态势,再加上近期美国又宣布单方面退出巴黎协定,全球气候变化治理的行动似乎已陷入困境。在此大环境下,推动新能源替代减排将在政策和经济上面临更严峻的挑战。对中国而言,作为世界上第一大排放国家和最大的发展中国家,如何制定新能源产业政策必然引起国际社会的广泛关注。而产业政策的执行需要从理论和实践上进一步研究论证该政策带来的影响。基于国内学者对新能源替代减排相关研究的特点和局限性,今后可从以下几个方面进行相关研究方向的拓展:

(1)在预测新能源发电量和减排量时,如何对新能源的技术进步率进行考量将是难以回避的重要问题。目前较为普遍的做法是采用“科技进步贡献率”这一指标来笼统地代替,但在涉及到具体行业生产函数计算时不一定适用。可以考虑通过技术管理部门访谈和电厂实地调研的形式建立技术发展数据库,在此基础上对新能源行业的技术进步贡献率进行科学地估算。

(2)整合新能源发展的环境效益、社会效益等因素,系统地建立新能源发展与减排的效益评估体系。目前的评估体系多为“经济效益+环境效益”的模式,对于产业拉动、就业促进、居民生活水平影响、区域竞争力提升等其他社会效益有所忽略,亟待进一步完善。这将是今后新能源项目成本效益评估中的重点。

(3)对新能源发电在电力市场的定价、补贴、并网模式等政策进行研究,对减排目标要求下的新能源产业发展路径进行描述。建立一些适合中国国情的复杂模型,进而分析电力市场改革形势下的可再生能源定价机制和政策措施,论证在未来不同减排目标及减排措施情景下,采取不同电价定价机制对国民经济造成的冲击,以避免承担和中国发展状况不适合的减排目标。

## 参考文献(References):

- [1] 邹洋. 我国新能源和可再生能源的替代效应分析[J]. 经济体制改革, 2015, (6): 185-190. [Zou Y. Alternative effects of new energy and renewable energy in China[J]. *Reform of Economic*

- System*, 2015, (6): 185-190.]
- [2] 马丁, 陈文颖. 中国2030年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, (S1): 1-4. [Ma D, Chen W Y. Analysis of China's 2030 carbon emission peak level and peak path[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, (S1): 1-4.]
- [3] 程路, 邢璐. 2030年碳排放达到峰值对电力发展的要求及影响分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 174-177. [Cheng L, Xing L. Influence of nuclear power on the 15% non-fossil energy target for 2020 and power system[J]. *Electric Power*, 2016, 49(1): 174-177.]
- [4] 王海林, 何晓宜, 张希良. 中美两国2020年后减排目标比较[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 23-29. [Wang H L, He X Y, Zhang X L. A comparative analysis of the post-2020 CO<sub>2</sub> emission reduction target set by China and the United States[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6): 23-29.]
- [5] Johansson T B, Patwardhan A, Nakicenovic N, *et al.* Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [6] BP. BP Statistical Review of World Energy 2016[EB/OL]. (2016-06-23) [2017-10-28]. [https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf](https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf).
- [7] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 167-170. [Xue H, Zhu R Z, Yang Z B, *et al.* Assessment of wind energy reserves in China[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2001, 22(2): 167-170.]
- [8] 龚强, 于华深, 蔺娜, 等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 654-661. [Gong Q, Yu H S, Lin N, *et al.* Temporal-spatial distribution and regionalization of wind and solar energy resources in Liaoning Province[J]. *Resources Science*, 2008, 30(5): 654-661.]
- [9] 朱飙, 李春华, 陆登荣. 甘肃酒泉区域风能资源评估[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 152-156. [Zhu B, Li C H, Lu D R. Wind energy resource assessment of Jiuquan, Gansu Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, 27(2): 152-156.]
- [10] Jimenez B, Durante F, Lange B, *et al.* Offshore wind resource assessment with WAsP and MM5: comparative study for the German Bight[J]. *Wind Energy*, 2007, 10(2): 121-134.
- [11] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉. MM5/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2101-2113. [Zhou R W, He X F, Zhu R. Application of MM5/CALMET model system in wind energy resource assessment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2101-2113.]
- [12] 李柯, 何凡能, 席建超. 中国陆地风能资源开发潜力区域分析[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1672-1678. [Li K, He F N, Xi J C. An analysis of utilization potential distribution of wind power in Mainland China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(9): 1672-1678.]
- [13] 朱成章. 关于中国风能资源储量的质疑[J]. 中外能源, 2010, 15(4): 34-38. [Zhu C. Queries about volume of wind energy resources in China[J]. *Sino-Global Energy*, 2010, 15(4): 34-38.]
- [14] Hong L, Möller B. Offshore wind energy potential in China: under technical, spatial and economic constraints[J]. *Energy*, 2011, 36(7): 4482-4491.
- [15] 袁小康, 谷晓平, 王济. 中国太阳能资源评估研究进展[J]. 贵州气象, 2011, 35(5): 1-4. [Yuan X K, Gu X P, Wang J. Research progress of solar energy resources assessment in China[J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2011, 35(5): 1-4.]
- [16] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738-1749. [Zhou Y, Wu W X, Hu Y, *et al.* The temporal-spatial distribution and evaluation of potential solar energy resources in Northwest China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(10): 1738-1749.]
- [17] 申彦波, 常蕊, 杜江, 等. 吐鲁番地区可利用太阳能资源分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 470-477. [Shen Y B, Chang R, Du J, *et al.* Analysis of the available solar energy resources in Turpan[J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(2): 470-477.]
- [18] 李一平, 杜成勋, 陈永琼, 等. 攀枝花太阳能资源评价[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1): 44-50. [Li Y P, Du C X, Chen Y Q, *et al.* An assessment of solar energy resources in Panzhihua[J]. *Plateau & Mountain Meteorology Research*, 2009, 29(1): 44-50.]
- [19] Hammer A, Heinemann D, Hoyer C, *et al.* Solar energy assessment using remote sensing technologies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 423-432.
- [20] Stöckler S, Schillings C, Kraas B. Solar resource assessment study for Pakistan[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1184-1188.
- [21] 申彦波. 近20年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述[J]. 气象, 2010, 36(9): 111-115. [Shen Y B. Review of applications of satellite remote sensing data to solar energy resources assessment in China in recent 20 years[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(9): 111-115.]
- [22] 杜芳. “风光”无限待开发[N]. 经济日报, 2015-7-15(07). [Du F. Unlimited "Wind and Solar Energy" Ready for Development[N]. *Economic Daily*, 2015-7-15(07).]
- [23] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049-1054. [Li K, He F. Analysis on Mainland China's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1049-1054.]

2017年12月

- [24] 韩世涛. 宁夏太阳能资源评估分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [Han S T. Evaluation Analysis on Solar Energy Resources in Ningxia[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]
- [25] 占明锦, 章毅之, 孔萍. 江西省太阳能资源评估研究[J]. 能源研究与管理, 2010, (3): 19-22. [Zhan M J, Zhang Y Z, Kong P. The assessment of solar energy resource in Jiangxi Province[J]. *Energy Research & Management*, 2010, (3): 19-22.]
- [26] 冯刚, 李卫华, 韩宇, 等. 新疆太阳能资源及区划[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 133-139. [Feng G, Li W H, Han Y, et al. The solar energy resources of Xinjiang and its distribution[J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(3): 133-139.]
- [27] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19. [Liu G, Shen L. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 9-19.]
- [28] Kaygusuz K, Türker M F. Biomass energy potential in Turkey [J]. *Renewable Energy*, 2002, 26(4): 661-678.
- [29] Lauri P, Havlik P, Kindermann G, et al. Woody biomass energy potential in 2050[J]. *Energy Policy*, 2014, 66(3): 19-31.
- [30] 刘志彬, 任爱胜, 高春雨, 等. 中国农业生物质资源发电潜力评估[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(4): 133-140. [Liu Z B, Ren A S, Gao C Y, et al. Power generation potential assessment of agricultural biomass resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources & Regional Planning*, 2014, 35(4): 133-140.]
- [31] 朱开伟, 刘贞, 吕指臣, 等. 中国主要农作物生物质能生态潜力及时空分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4285-4301. [Zhu K W, Liu Z, Lv Z C, et al. The ecological development potential and time-space analysis of Chinese main agricultural crop biomass energy[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4285-4301.]
- [32] 杨金焕. 光伏系统减排CO<sub>2</sub>潜力的分析[C]. 杭州: 第十届中国太阳能光伏会议论文集, 2008. [Yang J H. Analysis of potential for CO<sub>2</sub> mitigation by photovoltaic systems[C]. Hangzhou: China Solar Photovoltaic Conference, 2008.]
- [33] Amit G, Tinus P. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2[EB/OL]. (2015-07-01) [2017-10-28]. [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_0\\_Cover.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_0_Cover.pdf).
- [34] 省级温室气体清单编制指南编写组. 省级温室气体清单编制指南[EB/OL]. (2011-03) [2017-10-28]. <https://wenku.baidu.com/view/caa61d366c85ec3a87c2c5d6.html>. [Writing Group of the Provincial Greenhouse Gas Inventories. The Provincial Greenhouse Gas Inventories[EB/OL]. (2011-03) [2017-10-28]. <https://wenku.baidu.com/view/caa61d366c85ec3a87c2c5d6.html>.]
- [35] Davidson M R, Zhang D, Xiong W M, et al. Modeling the potential for wind energy integration on China's coal-heavy electricity grid[J]. *Nature Energy*, 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.86.
- [36] 李红强, 王礼茂. 中国低碳能源发展潜力及对国家减排贡献的初步研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 473-480. [Li H Q, Wang L M. China low carbon energy development potential and its contribution to accomplishing the national GHG mitigation target[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 473-480.]
- [37] 龚道仁, 陈迪, 袁志钟. 光伏发电系统碳排放计算模型及应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(9): 1-4. [Gong D R, Chen D, Yuan Z Z. Mathematics calculation model and application of CO<sub>2</sub> emission [J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(9): 1-4.]
- [38] IEA. Compared Assessment of Selected Environmental Indicators of Photovoltaic Electricity in OECD Cities[EB/OL]. (2006-05-01) [2017-10-28]. [http://www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/report\\_IEA-PVPS\\_T10-01-2006.pdf](http://www.iea-pvps-task10.org/IMG/pdf/report_IEA-PVPS_T10-01-2006.pdf).
- [39] Klein S A, Theilacker J C. An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1981, 103(1): 29-33.
- [40] Joseph V S, Lucille L, Bruce H. Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: assessing the difference[J]. *IAEA Bulletin*, 2000, 42(2): 19-24.
- [41] 马忠海. 中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2002. [Ma Z H. Comparative Evaluation of Greenhouse Gases Emission Coefficients of Several Major Energy Sources in China[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2002.]
- [42] 詹晓燕. 多晶硅-光伏系统全生命周期碳排放研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011. [Zhan X Y. Life Cycle Research on Carbon Emission of Polycrystalline Silicon-Photovoltaic System[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011.]
- [43] 谢泽琼, 马晓茜, 黄泽浩, 等. 太阳能光伏发电全生命周期评价[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(12): 106-110. [Xie Z Q, Ma X Q, Huang Z H, et al. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, 35(12): 106-110.]
- [44] Louwen A, van Sark W G, Faaij A P, et al. Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development[J]. *Nature Communications*, 2016, doi: 10.1038/ncomms13728.
- [45] Keiichirô A, Patrick C, Koji N, et al. CO<sub>2</sub> Emission from Solar Power Satellite through Its Life Cycle Comparison of Power Generation Systems Using Japanese Input-Output Tables[EB/OL]. (2000-07-01) [2017-10-28]. [http://www.iioa.org/conferences/13th/files/Asakura Collins Nomura Hayami & Yoshioka\\_LifeCycleCO2.pdf](http://www.iioa.org/conferences/13th/files/Asakura%20Collins%20Nomura%20Hayami%20&%20Yoshioka_LifeCycleCO2.pdf).
- [46] Jungbluth N, Bauer C, Dones R, et al. Life cycle assessment for emerging technologies: case studies for photovoltaic and wind power (11pp) [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*

- ment, 2005, 10(1): 24-34.
- [47] 郭敏晓. 风力、光伏及生物质发电的生命周期 CO<sub>2</sub> 排放核算 [D]. 北京: 清华大学, 2012. [Guo X M. The Life Cycle Accounting of CO<sub>2</sub> Emissions for Wind, PV and Biomass Power Generation in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.]
- [48] 邹治平, 马晓茜. 风力发电的生命周期分析[J]. 中国电力, 2003, 36(9): 83-87. [Zou Z P, Ma X Q. Life cycle assessment on wind-power generation[J]. *Electric Power*, 2003, 36(9): 83-87.]
- [49] 戢时雨, 高超, 陈彬, 等. 基于生命周期的风电场碳排放核算[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 915-923. [Ji S Y, Gao C, Chen B, et al. Carbon emission accounting for wind farm based on life cycle assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 915-923.]
- [50] 郭敏晓, 蔡闻佳, 王灿, 等. 风电场生命周期 CO<sub>2</sub> 排放核算与不确定性分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 742-747. [Guo M X, Cai W J, Wang C, et al. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions of one wind farm using life cycle assessment and uncertainty analysis[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4): 742-747.]
- [51] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 711-715. [Feng C, Ma X Q. Life cycle assessment of the straw generation by direct combustion[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29(6): 711-715.]
- [52] 林琳, 赵黛青, 魏国平, 等. 生物质直燃发电系统的生命周期评价[J]. 华电技术, 2006, 28(12): 18-23. [Lin L, Zhao D Q, Wei G P, et al. Life cycle assessment of biomass direct combustion power generation system[J]. *Water Conservancy & Electric Power Machinery*, 2006, 28(12): 18-23.]
- [53] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 752-759. [Wang W, Zhao D, Yang H L, et al. Life cycle analysis on biomass gasification & power generation system and inquiry to assessment method[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2005, 26(6): 752-759.]
- [54] 杨卫华, 初金凤, 吴哲, 等. 基于 LCA 和 CDM 方法学的垃圾焚烧发电过程中碳减排的计算研究[J]. 节能, 2013, 32(11): 20-23. [Yang W H, Chu J F, Wu Z, et al. Based on the LCA and CDM methodology for carbon emission reduction from MSW incineration for power generation processes[J]. *Energy Conservation*, 2013, 32(11): 20-23.]
- [55] 金豫佳, 吴长淋. 生活垃圾焚烧发电温室气体减排计算的研究[J]. 能源与环境, 2012, (6): 52-54. [Jin Y J, Wu C L. Study on greenhouse gas emission reduction calculation of municipal solid waste incineration power generation[J]. *Energy and Environment*, 2012, (6): 52-54.]
- [56] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于调整光伏发电陆上风电标杆上网电价的通知[EB/OL]. (2016-10-26)[2017-11-01]. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201612/t20161228\\_833065.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201612/t20161228_833065.html).
- [National Development and Reform Commission. Notice on Adjusting the Benchmark Price of Photovoltaic Power Generation and Onshore Wind Power Generation from the National Development and Reform Commission[EB/OL]. (2016-10-26)[2017-11-01]. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201612/t20161228\\_833065.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201612/t20161228_833065.html).
- [57] Søren K. The Economics of Wind Energy: A Report by the European Wind Energy Association [EB/OL]. (2009-03-01)[2017-10-28]. [http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%2876848a2eca135226258a7c8770656a34%29&filter=sc\\_longsign&tn=SE\\_xueshusource\\_2kduw22v&sc\\_vurl=http%3A%2F%2Fciteeex.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.397.7663%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ie=utf-8&sc\\_us=5655845334865378158](http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%2876848a2eca135226258a7c8770656a34%29&filter=sc_longsign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fciteeex.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.397.7663%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ie=utf-8&sc_us=5655845334865378158).
- [58] 郑照宁, 刘德顺. 中国风电投资成本变化预测[J]. 中国电力, 2004, 37(7): 77-80. [Zheng Z N, Liu D S. Forecasting the investment cost of wind power in China[J]. *Electric Power*, 2004, 37(7): 77-80.]
- [59] 马翠萍, 史丹, 丛晓男. 太阳能光伏发电成本及平价上网问题研究[J]. 当代经济科学, 2014, 36(2): 85-94. [Ma C P, Shi D, Cong X N. The research on the generation cost of solar photovoltaic electricity and a pathway to grid parity[J]. *Modern Economic Science*, 2014, 36(2): 85-94.]
- [60] 刘贞, 张希良, 何建坤. 基于动态成本曲线的可再生能源发电目标分解模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 9-15. [Liu Z, Zhang X L, He J K. Target decomposition model for renewable energy generation based on dynamic cost curves[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32(11): 9-15.]
- [61] 张雯, 刘瑞丰, 刘静, 等. 基于多影响因素分析的光伏发电成本及走势预测模型[J]. 陕西电力, 2013, 41(11): 17-20. [Zhang W, Liu R F, Liu J, et al. Probe into cost and trend forecast model of photovoltaic power generation based on multiple factors analysis[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2013, 41(11): 17-20.]
- [62] 郭全英. 中国风力发电成本研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002. [Guo Q Y. Study on Wind Power Generation Cost in China [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2002.]
- [63] 蓝澜, 刘强, 陈梓, 等. 新能源比传统能源成本更高吗? 基于 LCOE 方法的中国风电与火电成本比较[J]. 西部论坛, 2013, 23(3): 66-72. [Lan L, Liu Q, Chen Z, et al. Is the cost of renewable energy higher than traditional energy? Comparison of the cost between wind power and heat power in China based on LCOE[J]. *West Forum*, 2013, 23(3): 66-72.]
- [64] 李钢, 张磊, 姚磊磊. 中国风力发电社会成本收益分析[J]. 经济

2017年12月

- 研究参考, 2009, (52): 44-49. [Li G, Zhang L, Yao L L. Analysis of social cost benefit of wind power generation in China[J]. *Review of Economic Research*, 2009, (52): 44-49.]
- [65] 王德良. 影响我国光伏发电成本的主要因素研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. [Wang D L. Research on Key Factors Affecting the Cost of PV Power Generation in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.]
- [66] 霍沫霖. 中国光伏发电成本下降潜力分析[J]. 能源技术经济, 2012, 24(5): 7-11. [Huo M L. Cost reduction potential of photovoltaic power generation in China[J]. *Energy Technology & Economics*, 2012, 24(5): 7-11.]
- [67] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56. [Su J, Zhou L M, Li R. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation[J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2013, 33(34): 50-56.]
- [68] 谢建湘. 光伏发电成本控制的有效措施[J]. 中国市场, 2014, (35): 47-48. [Xie J X. Effective measures for cost control of photovoltaic power generation[J]. *China Market*, 2014, (35): 47-48.]
- [69] IEA. Energy Technology Perspectives 2017[EB/OL]. (2017-06-01)[2017-10-28]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2017ExecutiveSummaryChineseversion.pdf>.
- [70] 方国昌, 田立新, 傅敏, 等. 新能源发展对能源强度和经济增长的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(11): 2795-2803. [Fang G C, Tian L X, Fu M, et al. Impacts of new energy on energy intensity and economic growth[J]. *System Engineering Theory & Practice*, 2013, 33(11): 2795-2803.]
- [71] 陈立斌. 可再生能源与核电减排二氧化碳经济性分析[J]. 中外能源, 2016, 21(11): 30-34. [Chen L B. Economic analysis of carbon dioxide emission reduction by using renewable and nuclear energy sources[J]. *Sino-Global Energy*, 2016, 21(11): 30-34.]
- [72] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镭. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 632-635. [Di X H, Nie Z R, Zuo T Y. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 632-635.]
- [73] 黄静, 汪毅, 汪永祥, 等. 光伏发电节能减排环境效益计算方法探讨[J]. 华北电力技术, 2014, (10): 67-70. [Huang J, Wang Y, Wang Y X, et al. Research on environmental benefits computing method of energy saving for photovoltaic system[J]. *North China Electric Power*, 2014, (10): 67-70.]
- [74] 蔡贵珍, 王莹, 黄家文, 等. 风电工程节能减排环境效益计算方法探讨[J]. 人民长江, 2010, 41(15): 23-26. [Cai G Z, Wang Y, Huang J W, et al. Analysis of calculation methods of environment benefits from energy saving and emission reduction for wind power project[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(15): 23-26.]

## Review of emission reduction research on major new energy generation

MOU Chufu<sup>1,2</sup>, WANG Limao<sup>1,2</sup>, QU Qiushi<sup>1,2</sup>, FANG Yebing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hong<sup>4</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

4. College of Geospatial Information, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To achieve the 2030 carbon emissions peak target, it is important to replace fossil fuels with new energy sources. Using new energy generation to reduce carbon emissions is one of the most important forms. It is particularly important to carry out research in related fields. On the basis of collecting and summarizing research into new energy generation reducing carbon emissions in China and abroad, we combed the literature from the aspects of new energy resource potential assessment, emission replacement calculation, life cycle carbon emission calculation and cost-benefit analysis. We found that current studies have the following issues: (1) the calculating methods of new energy generation reducing carbon emissions have advantages and disadvantages; (2) carbon emission accounting of new energy industry itself lacks a uniform definition of calculating scope; (3) costs and benefits of new energy development also lack clear accounting standards. Finally, future research directions are discussed regarding scientific prediction of new energies' technological progress rate, establishing benefit evaluation systems of new energy development and emission reduction, and describing the development path of new energy industry under emission reduction targets.

**Key words:** new energy power generation; emission reduction; cost-benefit analyze; review