DOI:10.19511/j.cnki.jee.2018.03.002

中国电力行业生产结构低碳化转型研究

魏文栋　郭　艺　谷岱南　李佳硕*

摘要:在碳减排背景下,中国正持续推进电力行业生产结构转型以促进低碳发展。本文基于2012年和2015年中国投入产出数据,将电力行业拆分为电力供应部门和六种不同发电类型的部门,进一步利用环境扩展投入产出模型,测算并对比各部门隐含碳排放强度。结果表明:2015年电力行业的隐含碳排放强度较2012年有所下降,但电力行业仍然是产生碳排放的主要行业;2012-2015年,大部分产业部门的隐含碳排放强度呈现下降趋势,表明由于可再生能源在能源结构中的比重提升,能源结构的绿色转型也驱动了各个产业部门的低碳发展;气电部门的隐含碳排放强度测算结果显示,其强度超过可再生能源发电部门的20倍。因此,在推进中国绿色转型和低碳发展的背景下,应统筹各类可再生能源协调发展,完善绿色电力证书交易体系和实行可再生能源配额制度,逐步降低煤电和气电所占的比重,以改变电力行业的生产结构。

关键词:可再生能源;投入产出分析;隐含碳排放;电力行业

一、引言

2005-2016年,中国能源消费总量从25.08×10^8t标准煤增长至40.51×10^8t标准煤,而化石能源消费的比重却呈下降趋势。这得益于中国大力推动高排放的能源结构向低碳转型。2015年召开的巴黎气候大会上,中国承诺:2030年单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降60%~65%。以化石能源为主要来源的电力行业向清洁低碳可再生能源转型是实现这一宏伟目标的必由路径。在低碳发展战略驱动下,中国可再生能源消耗占一次能源消费比重

*魏文栋,上海理工大学管理学院,邮政编码:200093,电子邮箱:weiwendong@usst.edu.cn;郭艺,上海理工大学管理学院,邮政编码:200093,电子邮箱:13264723776@163.com;谷岱南,上海理工大学管理学院,邮政编码:200093,电子邮箱:18916971589@163.com;李佳硕(通讯作者),华中科技大学能源与动力工程学院,邮政编码:430074,电子邮箱:lijiashuo@hust.edu.cn。

本文系上海市青年科技英才扬帆计划"中国电力资源流动的空间结构及演化机理研究"(18YF1417500)、上海理工大学人文社科培育基金项目"'一带一路'能源基础设施互联互通对区域经济的影响和机理"(SK18YB12)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的修改意见,文责自负。

从 2015 年的 12.1%增长到 2017 年的 13.8%。2017 年末全国可再生能源发电装机容量为 67093 万千瓦,相比 2007 年增长了 105.3%。《2018 年全球可再生能源投资趋势报告》显示,中国在 2017 年已成为世界上最大的可再生能源投资国,其绿色能源投资达到 1260 亿美元,占全球总额的 45%;弃风弃光率同比下降了约 5%,风电和光伏产业发展持续向好。伴随着"一带一路"倡议和全球能源互联网战略的实施,中国将构建起以特高压电网为骨干网架、以输送清洁能源为主导、跨国跨区域的电力传输体系(刘振亚,2015)。这意味着中国距离实现 2020 年非化石能源占一次能源消费比重达到 15%的战略目标越来越近,电力转型将进一步提速。

鉴于电力转型对于实现低碳发展的重要意义,当前,许多研究从不同方面对电力转型展开研究。Finenko 和 Cheah(2016)通过将电力供给侧和需求侧相结合,研究新加坡每半小时电力生产碳排放的特征,为新加坡向低碳能源转型提供数据参考。Zou 等(2017)利用多阶段 Nash-Cournot 均衡模型,研究中国电力转型对电力行业价格和利润的影响,认为可再生能源发电不能完全替代火力发电。Guo 等(2016)通过构建中国电力生产和供给多区域模型,发现国家政策和能源补贴对于可再生能源短期和长期的发展仍然很重要。电力转型与碳排放的关系,尤其是电力转型的碳核算是当前国内外研究的热点。Hertwich 等(2015)从全生命周期角度基于减排和基准两种情景,研究了低碳发电技术对于环境的效益。郭敏晓等(2012)采用上海某风电场数据,提出了风力发电过程中 CO_2排放核算的详细方法,发现风机生产阶段 CO_2 排放占风电场生命周期 CO_2排放的比例最大。Xia 和 Song(2017)采用 2004-2011 年中国县级层面的风力发电数据,构建局部调整模型,对区域差异的驱动因素进行分析。也有学者对发电和输配电过程中损失的电力二氧化碳排放进行评估(Davíarderius et al.,2017),或者对电网基础设施的隐含碳排放进行了测算(Wei et al.,2017;Wei et al.,2018)。

本文利用环境扩展投入产出模型(Environmentally Extended Input-Output Analysis, EEIOA)研究不同类型发电部门基于贸易和产业间关联的隐含碳排放。由于 EEIOA 模型是从部门的层面进行分析,因而不能对部门内的产品进行比较,Kymn(1990)和 Lenzen(2011)发现聚合型投入产出表中的部门会丢失细节方面的信息,称之为"聚合偏差问题",即存在部门聚合的问题。因此,需要对投入产出表中电力生产和供应部门进行拆分。唐志鹏等(2009)创建了基于投入产出技术(IOA)的 AECPC 模型,对 2005 年中国能源投入产出表中的部门进行拆分,发现平均能耗最大的生产链主要集中在传统的高耗能部门。但是分析的过程中没有将火力发电部门进一步细分为煤电和气电部门,并将水力发电与核力发电合并到一起进行研究,部门拆分不够详细。当前研究中使用较多的拆分方法是根据拆分后新部门的产出占拆分前部门的总产出比例,即新部门的产出权重,作为唯一可获得的信息对投入产出表进行拆分(Wolsky,1984;谭显东,2008;时佳瑞等,2015a,2015b),但是此种方法存在对影响拆分的因素

考虑不足的问题。Lindner 等(2012)在 Wolsky(1984)方法的基础上,在拆分后新部门对其他部门的中间投入和新部门间的中间投入区域,利用马尔可夫链随机游走算法进行拆分。Lindner 等(2013)利用 2007 年中国 30 个省份的投入产出表和中国投入产出表,在考虑不同地区电厂组合差异,特定部门对于不同发电部门中间投入差异和不同发电部门投资不同等情况下,将电力部门拆分为电力供应部门和八种不同发电类型的部门,然后通过测算隐含碳排放强度与 Wolsky(1984)的方法进行比较。但 Lindner 等(2013)没有对拆分后不同发电部门的碳排放情况进行分析。并且,该研究采用的是 2007 年中国投入产出数据,具有滞后性,不适用于当前中国电力转型与低碳发展的分析与决策。

基于前人的研究,本文通过结合 Wolsky(1984)和 Lindner 等(2012,2013)的方法,将 2012 和 2015 年中国投入产出表中电力生产和供应部门拆分为电力供应部门和六种不同发电类型的部门,即燃煤发电(煤电)、燃气发电(气电)、水力发电(水电)、核力发电(核电)、风力发电(风电)和太阳能发电部门。这种拆分不仅考虑了其他部门对发电部门中间投入具有不同的影响,还考虑了不同电力生产部门的投资和发电量差异,以及煤炭开采业、水的生产和供给等部门对发电部门中间投入的特殊性。基于拆分后的投入产出表,本文利用 EEIOA 测算了不同部门的碳排放,并在此基础上进一步对比和分析 2012 年和 2015 年电力结构和各部门碳排放的变化,为中国电力转型与低碳发展提供方法和数据参考。

二、研究方法

(一)拆分步骤

投入产出表拆分后的基本结构如图 1 所示,假设将第 N 个部门拆分 n 个部门,分别表示为 $N_1, N_2, \cdots, N_n$。垂直方向由 $N+n-1$ 个部门的中间投入和最初投入(包括劳动者报酬、生产税净额、固定资产折旧、营业盈余)构成,反映了各产业部门在生产过程中的投入情况。水平方向由 $N+n-1$ 个部门的中间需求和最终需求(包括最终消费支出、资本形成总额、净出口)构成,描述了各产业部门产品的使用情况(陈锡康等,2011)。满足如下等式关系:

行平衡:

$$\sum_{j=1}^{N-1} z_{i,j}^{d} + \sum_{w=1}^{n} Z^{*}{}_{i,N_w} + f_i = x_i \ (i=1,2,\cdots,N-1) \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} Z^{*}{}_{N_k,j} + \sum_{w=1}^{n} Z^{*}{}_{N_k,N_w} + f_{N_k} = x_{N_k} \ (k=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

列平衡:

$$\sum_{i=1}^{N-1} z_{i,j}^{d} + \sum_{k=1}^{n} Z^{*}{}_{N_k,j} + V^{*}{}_{l,j} + V^{*}{}_{s,j} + V^{*}{}_{p,j} + V^{*}{}_{q,j} = x_j \ (j=1,2,\cdots,N-1) \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} Z^{*}{}_{i,N_w} + \sum_{k=1}^{n} Z^{*}{}_{N_k,N_w} + V^{*}{}_{l,N_w} + V^{*}{}_{s,N_w} + V^{*}{}_{p,N_w} + V^{*}{}_{q,N_w} = x_{N_w} \ (w=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

其中，$z^d_{i,j}$ 代表部门 i 对部门 j 的中间投入；$Z^*_{N_k,j}$ 代表部门 N_k 对其他部门的中间投入，简记为 A 区域。j 为 1 到 $N-1$，k 为 1 到 n；Z^*_{i,N_w} 代表其他 $N-1$ 个部门对于部门 N_w 的中间投入，简记为 B 区域。i 为 1 到 $N-1$；部门 N_w 间的投入记为 $Z^*_{N_k,N_w}$，简记为 C 区域。$k=1,2,\cdots,n$；$w=1,2,\cdots,n$。D 区域代表部门 N_w 的最终需求部分。V^*_{l,N_w}、V^*_{s,N_w}、V^*_{p,N_w}、V^*_{q,N_w} 是拆分后新部门在最初投入部分的构成，分别代表部门 N_w 的劳动者报酬、生产税净额、固定资产折旧和营业盈余，用 E 区域表示，其需满足公式：

$$V^*_{l,N_w}+V^*_{s,N_w}+V^*_{p,N_w}+V^*_{q,N_w}=v_{N_w} \tag{5}$$

(5)式中，v_{N_w} 代表拆分后部门 N_w 的增加值。

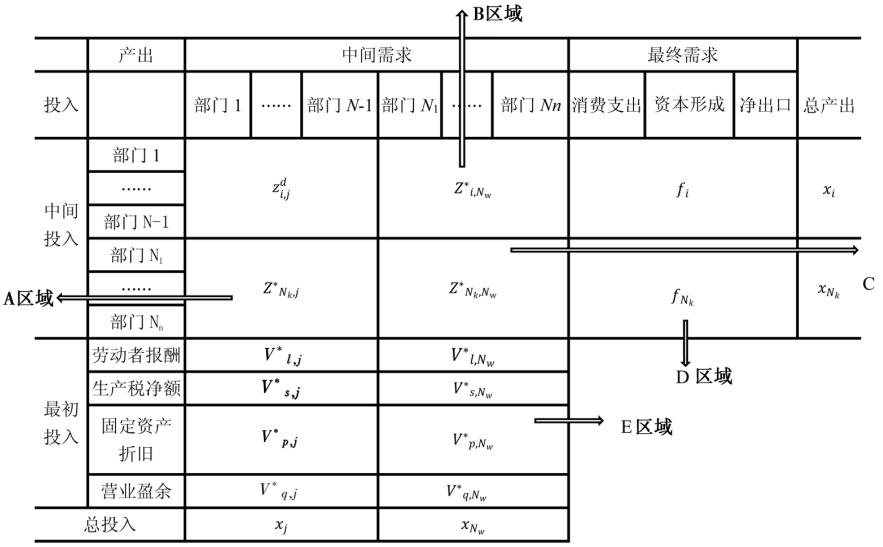

图 1　投入产出表拆分后的基本结构

本文首先将 42×42 部门的中国投入产出表中电力、热力的生产和供应部门拆分为电力供应部门和发电部门，其次，将发电部门拆分为六种不同发电类型的部门(图 2)，分别为煤电、气电、风电、核电、水电和太阳能发电部门。

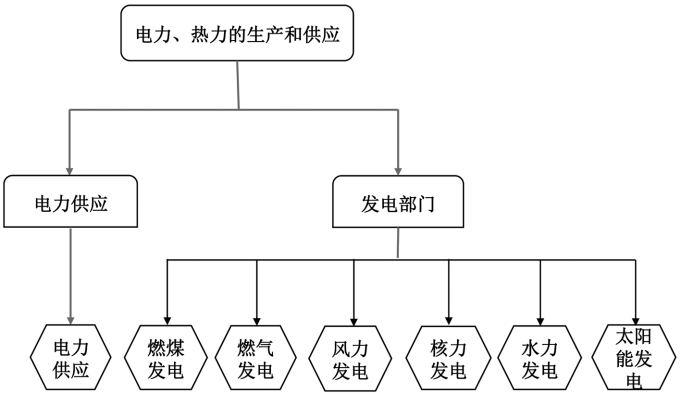

图 2　投入产出表拆分后新部门构成

(二)分区域拆分

将 2012 年和 2015 年中国投入产出表电力部门拆分为电力供应部门和发电部门,而目前其他部门对于电力供应部门和发电部门的中间投入数据是不可知的。本文根据《电力工业统计资料汇编》中的全国电源投资和电网投资数据,按照电力供应部门和发电部门本年完成投资的占比情况来分配其他部门对电力供应部门和发电部门的中间投入。同时,其他部门对这两个部门的中间需求和最终需求也根据上述投资比例进行拆分。

假设区域 A 不同发电类型电价为 P_k ,发电量为 X_k ,则各发电类型总价值为 $V_k = P_k \times X_k$ 。因此,各发电类型的产出权重 $w_k = V_k/v$, v 为不同发电类型的总价值。从而根据不同发电部门的产出权重 w_k 来分配其他部门对于电能的需要。拆分公式为:

$$Z^*_{k,i} = w_k \times Z_{ele,i} \tag{6}$$

上式中, $Z^*_{k,i}$ 代表拆分后新部门 k 对其他部门的中间投入;k 代表拆分后的六种不同发电类型部门; $Z_{ele,i}$ 代表为未拆分的发电部门对其他部门的中间投入。

假设区域 B 中,煤炭采选业、水的生产和供应部门只对煤电部门存在中间投入;燃气的生产和供应只对天然气发电部门存在中间投入;石油、炼焦产品和核燃料加工品对煤电、气电和核电部门存在中间投入;石油和天然气开采业对煤电和气电部门存在中间投入。不同发电部门对上述部门的需求,利用 Lindner 等(2013)的拆分比例。不包括上述部门的其他部门对各发电部门的中间投入,根据各发电类型的产出权重 w_k 来分配。分解公式为:

$$Z^*_{i,k} = w_k \times Z_{i,ele} \tag{7}$$

(7)式中, $Z^*_{i,k}$ 代表拆分后其他部门对新部门 k 的中间投入; $Z_{i,ele}$ 代表拆分前其他部门对发电部门的中间投入; w_k 为产出权重。

区域 C 代表不同发电类型部门间的中间投入。由于风电、水电等可再生能源发电存在季节性,电厂在日常工作过程中同样需要消耗电能,这部分电能是从电网购买来的,还是利用电厂自身的储能装置或其他途径,从目前数据无法得知。因此,本文假设不同发电部门只消耗其自身的电能,根据不同发电部门本年度完成投资比例来分配发电部门间的中间投入。同时,电力供应部门对不同发电部门的消耗根据不同发电部门产出权重 w_k 来确定 。

对于区域 E,劳动者报酬、生产税净额和营业盈余与电力行业的利润有关,因此,假设上述三种增加值构成对不同发电部门的最初投入,都按照各电力部门利润占电力行业总利润的比例 c_m 进行分配。固定资产折旧对不同发电部门的最初投入,根据各电力部门在建筑工程 e_m 、安装工程 f_m 、设备工具购置 g_m 三项投资费用的总和占其在电力行业投资费用总和的比例 a_m 来分配 。拆分公式为:

$$a_m = \frac{e_m + f_m + g_m}{\sum_{m=1}^{7} e_m + f_m + g_m} \tag{8}$$

$$V^*_{l,m} = c_m \times V_l \tag{9}$$

$$V^*_{s,m} = c_m \times V_s \tag{10}$$

$$V^*_{p,m} = a_m \times V_p \tag{11}$$

$$V^*_{q,m} = c_m \times V_q \tag{12}$$

上式中,m 代表不同发电类型部门(六种)和输配电部门;$V^*_{l,m}$、$V^*_{s,m}$、$V^*_{p,m}$ 和 $V^*_{q,m}$ 代表拆分后各电力部门的增加值构成;V_l、V_s、V_p 和 V_q 分别代表拆分前的增加值构成。

(三)隐含碳排放强度测算

基于投入产出表的基本平衡方程,在计算隐含碳排放强度时,需要结合矩阵代数的计算方法。首先,定义 E_j 为部门 j 的直接碳排放量,j 部门的直接能源投入在生产过程产生的碳排放称为 j 部门直接碳排放量。通过将 2012 年和 2015 年不同部门的直接碳排放量数据(Shan 等,2018)整理得到 42 部门的直接碳排放数据。由于水电、风电等可再生能源发电和输配电部门的直接碳排放量为 0,根据电力部门中原煤和天然气消耗过程中产生的直接碳排放量数据,将电力部门的直接碳排放量分解为煤电和气电的直接碳排放量。分解公式为:

$$E^1_{ele} = \frac{E^{co}_{ele}}{E^{co}_{ele} + E^{gas}_{ele}} \times E_{ele} \tag{13}$$

$$E^2_{ele} = \frac{E^{gas}_{ele}}{E^{co}_{ele} + E^{gas}_{ele}} \times E_{ele} \tag{14}$$

其中,E^1_{ele} 和 E^2_{ele} 代表煤电和气电部门的直接碳排放量;E^{co}_{ele} 和 E^{gas}_{ele} 代表电力部门中原煤和天然气产生的直接碳排放量;E_{ele} 代表电力部门总的直接碳排放量。

其次,对于部门 r,蕴含在总产出中的隐含碳排放来源于两部分,即部门 m 对部门 r 的中间投入和 r 部门的直接能源投入(Chen, Z. M. & Chen,2011;Chen, Z. M. & Chen,2013)。总产出中的隐含碳排放强度可以表述为:

$$\varepsilon_r \times \left(\sum_{m=1}^{N+1} Z_{r,m} + f_r \right) = \sum_{m=1}^{N+1} \varepsilon_m \times Z_{m,r} + E_r \tag{15}$$

其中,ε_r 为部门 r 的隐含碳排放强度,$Z_{m,r}$ 代表部门 m 对于部门 r 的中间投入,E_r 代表 r 部门直接的碳排放量;f_r 代表部门 r 的最终需求。

将(15)式以矩阵的形式表现为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}\,\widehat{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{Z} + \boldsymbol{E} \tag{16}$$

(16)式中,$\boldsymbol{\varepsilon}$ 代表各部门的隐含碳排放强度,以行向量的形式表示;$\widehat{\boldsymbol{X}}$ 代表总产出向量的对角矩阵;$\boldsymbol{Z}$ 为中间投入矩阵,$\boldsymbol{E}$ 代表直接碳排放量的行向量。

因此,各部门的隐含碳排放强度 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 计算如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{E}\,(\widehat{\boldsymbol{X}} - \boldsymbol{Z})^{-1} \tag{17}$$

三、数据来源

对电力部门进行拆分的过程中,需要用到以下数据:

(1)2012 年和 2015 年中国 42 部门投入产出表,来源于中国投入产出学会和国家统计局。

(2)中国对电力供应部门和六种不同发电部门的投资数据(表 1),来源于 2013 年和 2016 年《电力工业统计资料汇编》。2012 年电力供应部门的投资为 3661 亿元,占全国本年完成投资的 50.5%,2015 年对电力供应部门的投资为 4639 亿元,占 54.1%。

表 1　　各年度完成的电力建设投资　　(单位:亿元)

部门	2012 年	2015 年
电力供应	3661.13	4639.81
水力发电	1238.78	789.13
燃煤发电	829.17	1061.43
燃气发电	30.54	101.67
核力发电	784.48	565.08
风力发电	607.37	1200.24
太阳能发电	98.7	218.45

(3)2012 年和 2015 年平均上网电价数据(图 3)和不同发电部门的总产量(图 4),分别来源于 2013 年和 2016 年《电力工业统计资料汇编》,用于计算不同发电部门产出权重。

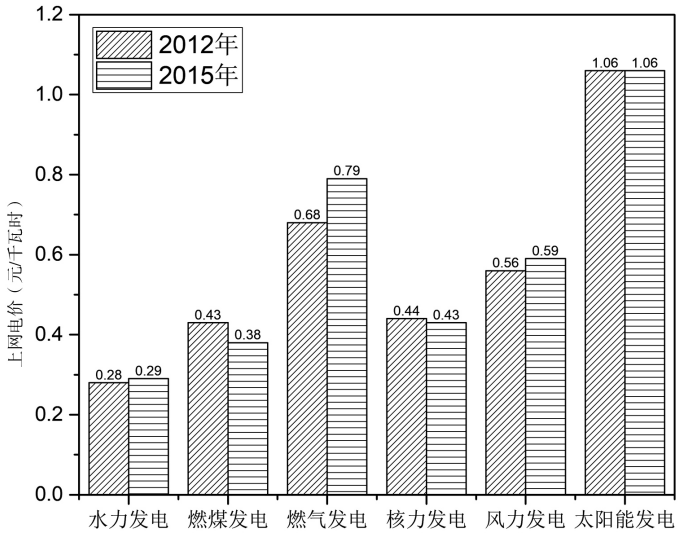

图 3　2012 年和 2015 年不同发电部门平均上网电价

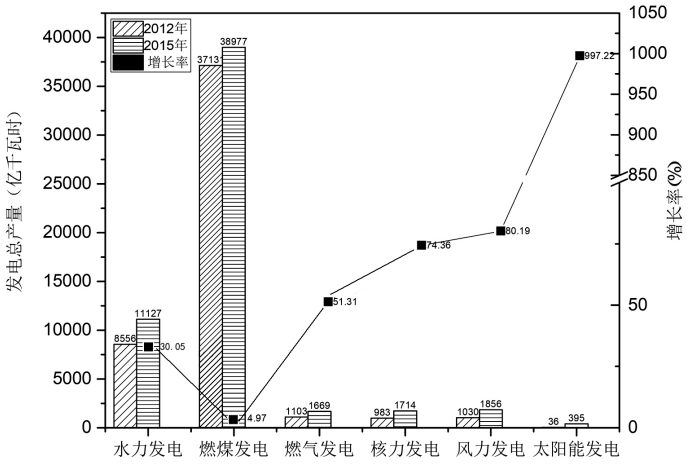

图 4　2012 年和 2015 年发电部门总产量

(4)特定部门对于不同发电部门中间投入比例数据来源于 Lindner 等(2013)中的结果,如表 2 所示。其中煤炭采选业、水的生产和供应部门只对煤电部门存在中间投入,对于其他发电类型部门的中间投入为零。燃气的生产和供应只对气电部门存在中间投入,对于其他发电类型部门的中间投入为零;石油、炼焦产品和核燃料加工品对发电部门的中间投入按照 8∶1∶1 的比例分配到燃煤、燃气和核电三个部门;石油和天然气开采业对发电部门的中间投入按照 1∶9 的比例分配到煤电和气电部门。

表 2　　特定部门对于拆分后新部门中间投入比例

部门	拆分后新的发电部门					
	燃煤发电	燃气发电	太阳能发电	核力发电	风力发电	水力发电
煤炭采选业	1	0	0	0	0	0
水的生产和供应部门	1	0	0	0	0	0
燃气的生产和供应	0	1	0	0	0	0
石油、炼焦产品和核燃料加工品	0.8	0.1	0	0.1	0	0
石油和天然气开采业	0.1	0.9	0	0	0	0

注:数据来源于 Lindner 等(2013)。

四、结果分析

(一)不同发电部门的隐含碳排放强度比较

通过公式(13)-(17)的计算结果,从发电部门的隐含碳排放强度上来看(如图 5 所示),2012 年煤电部门的隐含碳排放强度最高,达到 28.74 吨/万元,其次是气电部门 8.40 吨/万元。隐含碳排放强度最低的部门分别是核电、风电和太阳能发电部门,分别为 0.42 吨/万元、0.34

吨/万元和 0.28 吨/万元。水电与核电的隐含碳排放强度比较接近,仅相差 0.01 吨/万元。2015 年相比 2012 年不同类型发电部门的隐含碳排放出现不同情况。2015 年,煤电、气电、水电、核能和太阳能发电部门的隐含碳排放强度均有所增长。其中,2015 年太阳能发电部门的隐含碳排放强度为 0.50 吨/万元,相比 2012 年增长了 78.5%,增长幅度最大。其次是气电部门,为 8.68 吨/万元,相比 2012 年增长了 3.3%。

煤电部门隐含碳排放强度较高可能受三方面因素的影响:首先,燃煤发电在我国电源结构中仍然占据很高比例,燃煤发电量约占中国总发电量的 70%左右;其次,燃煤发电的主要燃料是煤,在燃烧和发电过程中将产生大量的二氧化碳;最后,燃煤发电的成本较低,平均上网电价仅高于水电部门(图 3),为 0.427 元/千瓦时。太阳能发电和气电部门隐含碳排放强度升高的原因可能受两方面因素的影响,首先,2015 年太阳能发电和气电装机容量较 2012 年分别增长了 1137.0%和 75.3%。在此背景下,2015 年气电部门直接碳排放量由 2012 年的 51.5Mt 增长到了 76.6Mt。其次,2015 年太阳能发电和气电部门受到成本和电网调度等因素的影响,发电利用小时数仅为 808h 和 2527h,比 2012 年分别下降了 23.4%和 13.7%,由此导致的效率降低在隐含碳视角下可能会导致碳排放强度的上升。

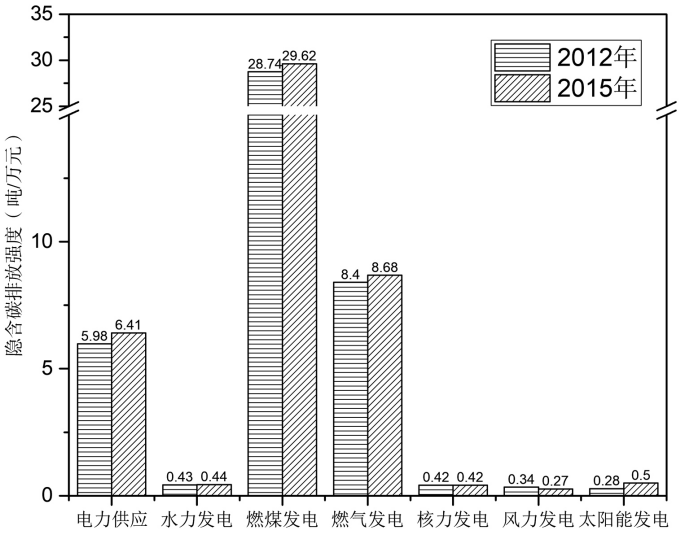

图 5　2012 年和 2015 年中国不同电力部门隐含碳排放强度

(二)不同发电部门与其他部门隐含碳排放强度比较

对比不同类型发电部门与其他 41 部门的隐含碳排放强度情况,如图 6 所示。2015 年高耗能部门(石油和天然气开采产品、石油、炼焦产品和核燃料加工品业、金属冶炼和压延加工品)和废品废料部门相比 2012 年的隐含碳排放强度增长较大。同时煤炭采选业基本保持不变,其 2015 年隐含碳排放强度为 2.15 吨/万元,相比 2012 年仅上升了 0.003 吨/万元。可以看出高耗能部门的碳排放减排效果并不显著,可能与中国对于煤炭的依赖性较高,同时与高耗

能部门为其他行业提供生产所需的能源有很大关系。虽然全国煤炭消费占比由 2012 年的 72.2%下降到了 2015 年的 68.1%,但煤炭的消费量依然很高。从整体来看,大部分产业部门在 2012-2015 年的隐含碳排放强度呈现下降趋势,表明由于可再生能源在电力结构中的比重提升,能源结构的低碳转型也驱动了各个产业部门的低碳转型。

2012 年隐含排放强度最低的三个部门分别是房地产业、风电和太阳能发电部门,分别为 0.39 吨/万元、0.34 吨/万元和 0.28 吨/万元。2015 年隐含碳排放强度最低的部门分别是房地产、教育和风电部门,分别为 0.32 吨/万元、0.32 吨/万元和 0.27 吨/万元。可以看到风电、水电、太阳能发电等可再生能源发电部门的隐含碳排放强度不仅远低于需要消耗大量一次能源的金属制造业、非金属制造业和采掘业,还低于交通运输业、农业和大部分服务业部门,其主要原因可能受两方面因素的影响:首先,由于中国投入产出表在编制时,将电力部门建设业的投入划分到了建筑业,因此与电力建设相关的碳排放也被归属到了建筑业,而本研究所涉及的可再生能源发电部门仅包含了运行和发电过程;其次,由于本文在拆分不同类型发电部门间中间投入的时候,假设不同发电部门只消耗其自身的电能,因此可再生能源发电部门在生产过程中消耗的也都是清洁能源,故而隐含碳排放强度较低。而对于服务业部门,其所消耗的电能是从电网购买而来。由于燃煤发电仍然是当前我国的主要发电类型,因此服务业部门在实际生产运行过程中所消耗的电能,也大都来源于高碳排放的煤电部门,这也造成在计算服务业部门的隐含碳排放强度时,相比可再生能源发电部门高。

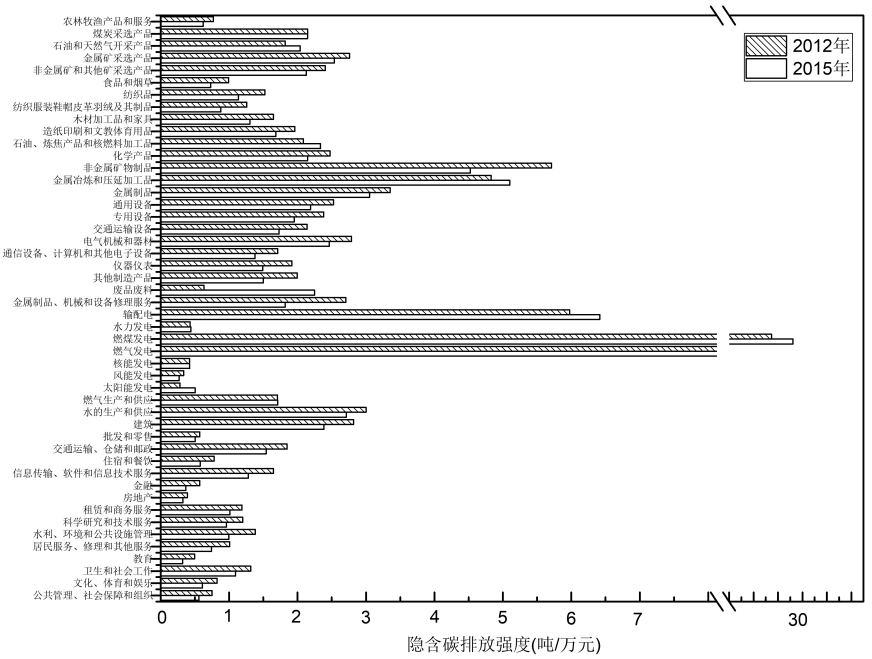

图 6　2012 年和 2015 年 48 部门隐含碳排放强度

五、总结与政策建议

本研究在拆分 2012 年和 2015 年投入产出表电力部门的基础上,应用 EEIOA 模型测算了不同发电部门的隐含碳排放强度,通过比较不同发电部门隐含碳排放强度、不同发电部门与其他 41 部门的隐含碳排放强度,对隐含碳视角下中国电力行业的绿色转型和低碳发展进行了探讨。主要结论和政策建议如下:

(1)与 2012 年相比,2015 年电力行业的隐含碳排放强度有所下降,但电力行业仍然是产生碳排放的主要行业。与此同时,不同发电类型部门隐含碳排放变化情况分析表明,采用化石燃料发电的煤电和气电部门隐含碳排放强度最高,远高于风电和太阳能发电等可再生能源部门的隐含碳排放强度。可再生能源发电部门的隐含碳排放强度不仅低于需要使用一次能源的金属制造业、非金属制造业和采掘业,还低于交通运输行业、农业和大部分服务业部门。因此,在推进中国绿色转型和低碳发展的背景下,应统筹各类可再生能源协调发展,完善绿色电力证书交易体系和实行可再生能源配额制度,逐步降低煤电和气电所占的比重,改变电力行业的生产结构。

(2)2012-2015 年,大部分产业部门的隐含碳排放强度呈现下降趋势,但高耗能部门(石油和天然气开采产品、石油、炼焦产品和核燃料加工品业、金属冶炼和压延加工品)、废品废料部门、电力供应部门、煤电、气电、水电、核能和太阳能等发电部门相比 2012 年的隐含碳排放强度却有所增长。一方面表明在一些高耗能行业,尤其是发电部门的碳减排政策推进效果并不显著,应持续加大对高耗能行业,特别是发电部门能源消费结构的绿色转型。另一方面也表明能源结构的绿色转型带动了其他产业部门的绿色低碳发展。

(3)气电部门的隐含碳排放强度测算结果显示,其强度超过可再生能源发电部门的 20 倍。伴随着大气污染防治行动和“煤改气”等政策的推进,2017 年我国天然气消费量同比增长 15.3%,燃气发电也成为电力转型中增长较快的发电类型。但是与可再生能源部门相比,气电部门的隐含碳排放强度较高,既不低碳,又存在价格较高等问题。本研究结果显示太阳能发电部门的隐含碳排放强度增长显著高于其他部门,表明在大力发展可再生能源的背景下,也应对太阳能发电等可再生发电部门的规划、布局、消纳及其隐含碳排放强度变化加以更多的关注。

本研究对于投入产出表中电力部门拆分模型的探讨,可以避免由于投入产出模型同质性假设而产生的“聚合偏差问题”,有助于后续研究进一步开展对不同类型发电部门的环境影响、政策模拟和情景分析,对于推进中国电力结构绿色转型、实现低碳发展具有重要参考价值。由于缺乏电力部门,尤其是可再生能源部门消耗不同类型电能的比例,且电力部门对其他部门的中间投入等相关数据也存在缺失,因此在本研究中采用了较多的假定,在下一步的

研究中需要进一步完善。基于多区域投入产出表对不同区域的电力部门进行拆分,进而挖掘不同区域不同发电部门的经济环境影响也将是未来研究的重要方向。

参考文献:

[1]陈锡康,杨翠红等. 投入产出技术[M]. 北京:科学出版社,2011.

[2]刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[3]时佳瑞,蔡海琳,汤铃,余乐安. 基于 CGE 模型的碳交易机制对我国经济环境影响研究[J]. 中国管理科学,2015a,23(11):801-806.

[4]时佳瑞,汤铃,余乐安,鲍勤. 基于 CGE 模型的煤炭资源税改革影响研究[J]. 系统工程理论与实践,2015b,35(7):1698-1707.

[5]谭显东. 电力可计算一般均衡模型的构建及应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.

[6]唐志鹏,刘卫东,刘红光,陈锡康. 基于投入产出技术的中国部门生产链平均能耗[J]. 地理科学进展,2009,28(6):919-925.

[7]郭敏晓,蔡闻佳,王灿,陈吉宁. 风电场生命周期 CO_2 排放核算与不确定性分析[J]. 中国环境科学,2012,32(4):742-747.

[8]Chen, Z. M. and G. Q. Chen. An Overview of Energy Consumption of the Globalized World Economy[J]. Energy Policy,2011,39(10):5920-5928.

[9]Chen, Z. M. and G. Q. Chen. Demand-driven Energy Requirement of World Economy 2007: A Multi-region Input - output Network Simulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2013,18(7):1757-1774.

[10]Davíarderius, D., M. E. Sanin, and E. Trujillobaute. CO_2 Content of Electricity Losses[J]. Energy Policy, 2017,104:439-445.

[11]Finenko, A. and L. Cheah. Temporal CO_2 Emissions Associated with Electricity Generation:Case Study of Singapore[J]. Energy Policy,2016,93:70-79.

[12]Guo, Z.,L. W. Ma, P. Liu, I. Jones, and Z. Li. A Multi-regional Modelling and Optimization Approach to China's Power Generation and Transmission Planning[J]. Energy,2016,116:1348-1359.

[13]Hertwich, E. G.,T. Gibon, E. A. Bouman, A. Arvesen, S. Suh, G. A. Heath, J. D. Bergesen, A. Ramirez,M. I. Vega, and L. Shi. Integrated Life-cycle Assessment of Electricity-supply Scenarios Confirms Global Environmental Benefit of Low-carbon Technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(20):6277-6282.

[14]Kymn, K.O. Aggregation in Input-Output Models:A Comprehensive Review,1946-1971[J]. Economic Systems Research,1990,2(1):65-93.

[15]Lenzen, M. Aggregation Versus Disaggregation in Input-Output Analysis of the Environment[J]. Economic Systems Research,2011,23:73-89.

[16]Lindner, S., J. Legault, and D. Guan. Disaggregating Input-Output Models with Incomplete Information[J]. Economic Systems Research,2012,24(4):329-347.

[17]Lindner, S., J. Legault, and D. Guan. Disaggregating the Electricity Sector of China's Input-Output Table for Improved Environmental Life-cycle Assessment[J]. Economic Systems Research,2013,25(3):300-320.

[18]Shan, Y. L., D. B. Guan, H. R. Zheng, J. M. Ou, Y. Li, J. Meng, Z. F. Mi, Z. Liu, and Q. Zhang. China CO_2 Emission Accounts 1997-2015[J]. Scientific Data, 2018, 5: 1-14.

[19] Wei, W. D., X. B. Wang, H. Zhu, J. Li, S. L. Zhou, Z. Y. Zhou, and J. S. Li. Carbon Emissions of Urban Power Grid in Jing-Jin-Ji Region: Characteristics and Influential Factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 428-440.

[20] Wei, W. D., X. D. Wu, J. S. Li, X. Y. Jiang, P. Zhang, S. L. Zhou, H. Zhu, H. Z. Liu, H. P. Chen, J. L. Guo, and G. Q. Chen. Ultra-high Voltage Network Induced Energy Cost and Carbon Emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 276-292.

[21] Wolsky, A. Disaggregating Input-Output Models[J]. The Review of Economics and Statistics, 1984, 66(2), 283-291.

[22] Xia, F. and F. Song. The Uneven Development of Wind Power in China: Determinants and the Role of Supporting Policies[J]. Energy Economics, 2017, 67: 278-286.

[23] Zou, P., Q. X. Chen, Y. Yu, Q. Xia, and C. Q. Kang. Electricity Markets Evolution with the Changing Generation Mix: An Empirical Analysis Based on China 2050 High Renewable Energy Penetration Roadmap[J]. Applied Energy, 2017, 185: 56-67.

Low Carbon Transformation of Production Structure in China's Power Sector

Wei Wendong[a], Guo Yi[a], Gu Dainan[a] and Li Jiashuo[b]

(a: Business School, University of Shanghai for Science and Technology;
b: School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Against the background of the carbon emission reduction, China is vigorously promoting electricity transition to facilitate low carbon development. This paper based on the 2012 and 2015 input-output table, disaggregates the power sector into power supply sector and other six different power generation sectors. Further, by using of the Environmentally Extended Input - Output Analysis, we then evaluate the sectoral embodied carbon emission intensities. The results showed that the embodied carbon emission intensity of the power sector in 2015 was lower than that in 2012, but the power sector is still the main sector generating carbon emissions. And most industrial sectors' embodied carbon emission intensities showed a downward trend in 2012-2015, indicating that the low-carbon transformation of energy structure had also driven the low-carbon transformation of various industrial sectors. However, the calculation of embodied carbon emission intensity of the gas power sector showed that its intensity was 20 times higher than that of the renewable energy power sector. Therefore, increasing the share of renewable energy in energy mix will benefit China's green and low-carbon development. In the future, measures such as improving the green certificate trading system and the renewable energy quota system should be implemented to enhance the development of renewable energy. Moreover, the production structure of the power industry can be further optimized by reducing the proportions of coal and gas power.

Keywords: Renewable Energy; Input-Output Analysis; Embodied Carbon Emissions; Power Sector

JEL Classification: C67, Q43, Q54, Q56

(责任编辑：朱静静)