

DOI: 10.7500/AEPS201301246

基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费 CO₂ 排放量测算

汪 锋¹, 豆南南¹, 喻冬梅²

(1. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆市 400030; 2. 财政部驻重庆专员办, 重庆市 400023)

摘要: 准确测算各省在经济发展过程中的 CO₂ 排放量是分析地区能源环境效率和制定区域节能减排政策的基础。文中基于电力系统碳排放流理论,从二次能源终端消费角度出发,发展了计算中国分省化石能源消费 CO₂ 排放量的方法。通过考虑二次能源的省际交易,特别是区域电网结构下的电力跨省调配,按能源终端消费量和损失量反推各省市的化石能源消费 CO₂ 排放量。由于国内能源资源分布和能源消费严重不均衡,存在大量的二次能源跨省交易,所提出的方法与传统使用一次能源消费量直接计算各省市化石能源消费 CO₂ 排放量相比更加合理。

关键词: CO₂ 排放; 碳排放流; 二次能源; 区域电网结构

0 引言

能源问题和环境问题关系到人类社会发展的未来,大量使用化石能源和 CO₂ 排放带来的全球气候变化问题是 21 世纪人类面临的最严峻挑战。作为《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》的缔约方,中国政府高度重视节能减排工作,2009 年 11 月国务院常务会议提出 2020 年单位国内生产总值(GDP)的 CO₂ 排放量比 2005 年下降 40%~45%,并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。“十一五”期间国家开始逐步向各省市分摊 CO₂ 减排责任,2012 年国务院印发《节能减排“十二五”规划》,提出综合考虑经济发展水平、产业结构、节能潜力、环境容量及国家产业布局等因素,合理确定各地区、各行业节能减排目标,并强化目标责任评价考核。根据经济发展水平和环境承载能力制定各省市的污染物排放限额和能源环境政策成为中国可持续发展研究的重大现实问题。

对化石能源消费 CO₂ 排放量进行测算的研究通常沿用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的方法^[1],该方法根据地区能源消费量和各类能源碳排放系数直接推算 CO₂ 排放量。但中国地域辽阔,各省市资源禀赋和经济发展水平差距明

显,存在大量的二次能源跨省交易^[2]。如山西、内蒙古、陕西、贵州等能源输出大省,每年向京津冀鲁、江浙、珠江三角洲等地区提供大量的电力、煤炭制品等二次能源产品。当按一次能源消费量核算地区 CO₂ 排放量,这部分交易到其他省市的二次能源仍按一次能源消费属地原则算作能源输出省的 CO₂ 排放,夸大了能源输出省的 CO₂ 减排责任,不利于制定科学的区域节能减排目标任务和时间表。因此,有必要改变从有形的 CO₂ 排放“出口”处进行观察的传统思路,考察 CO₂ 排放从“源头”到“出口”的流动与分布规律,考虑二次能源跨省交易或基于能源终端消费重新核算各省市的 CO₂ 排放量^[3-5]。

最新出现的网络碳排放流理论将网络流的概念引入到对 CO₂ 排放的分析之中,揭示了隐含在能量流中的碳排放流的特征与本质规律^[5]。以电力系统为例,碳排放量与碳排放强度不仅可以在发电环节进行统计,还可以从用电环节根据电力消费量进行统计和核算,而两者可以通过电网的碳排放流关联起来^[6]。文献[5-8]将电力系统碳排放流定义为依附于电力潮流存在,且用于表征电力系统中维持任一支路潮流的碳排放所形成的虚拟网络流,使电力系统中的 CO₂ 排放分析与电力潮流计算相结合,准确地揭示了电力系统碳排放流的特征。文献[5-8]的研究发现,与传统的发电侧碳排放测算结果相比,2010 年区域间的最大碳排放流占地区碳排放量的 10%左右,并且随着未来 10 年中国跨区域电力网络的不断加强和电力电量传输规模的不断加大,该比例至 2020 年将进一步扩大至近 40%。

本文根据网络碳排放流理论,基于能源终端消

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-10-10。
国家自然科学基金重点项目(71133007);国家自然科学基金资助项目(71303270);教育部人文社会科学研究项目(10XJC790004);中央高校基本科研业务费(CQDXWL-2012-167)。

费和省际二次能源交易重新估算了中国各省市化石能源 CO₂ 排放量。将能源输出省向能源输入省调配的二次能源在生产、运输和最终消费过程中产生的 CO₂ 排放量计为能源输入省的隐含 CO₂ 排放量。在二次能源生产使用过程中,热力消费具有明显的就近消费特征,通常情况下不存在省际交易的情况,因此二次能源的省际交易主要考虑发电、炼焦、炼油三大能源生产过程及其制品。其中,电力生产存在独特的技术经济特征,区域电网覆盖多个省市,且存在区域电网之间的跨区电力交易,需要根据电力系统碳排放流理论发展出核算各省市电力消费 CO₂ 排放量的新方法。2013 年初国家电力监管委员会开始在网站上公布省间购售电和电力重点跨区通道交易数据^[9],也为开展这一研究提供了基础。

本文首先介绍考虑省际二次能源交易的分省 CO₂ 排放量测算方法,然后重点讨论在电力系统碳排放流理论上,根据区域电网结构计算水电、火电比例和火电碳排放系数,测算省际电力交易隐含的 CO₂ 排放量转移的方法。之后计算了 2010 年中国各省市基于能源终端消费的 CO₂ 排放量和考虑省际二次能源交易后的 CO₂ 排放转移规模,并报告了省际电力交易带来的 CO₂ 排放转移规模和各省市电力终端消费 CO₂ 排放量,最后给出了研究结论。

1 考虑省际二次能源交易的分省 CO₂ 排放量测算方法

1.1 CO₂ 排放量计算方法和 CO₂ 排放系数

本文使用《中国能源统计年鉴 2011》^[10] 提供的 2010 年分省能源平衡表(实物量)测算各省市化石能源消费 CO₂ 排放量。在能源平衡表中,能源消费总量分为 3 个部分,即终端消费量、加工转化量和损失量。本文测算各省市 CO₂ 排放量采用的能源消费数据为能源终端消费量和损失量之和。能源损失量是指一定时期内能源在输送,分配,存储过程中发生的损失和由客观原因造成的各种损失量。以电力系统为例,在全国电力平衡表中 2010 年全国电力终端消费量为 3 936.63 TW·h,输配电损失量为 256.82 TW·h,网损占电力消费总量的 6% 左右。这部分电力输送过程中损失的电能与电力终端消费一起构成了各省市电力消费数据。根据这一电力消费数据,本文将各电网电力生产化石能源燃烧对应的 CO₂ 排放量分摊到各省市,作为电力消费隐含的 CO₂ 排放量。

按照《中国能源统计年鉴 2011》能源平衡表中

的分类,本文测算各省市化石能源消费 CO₂ 排放量使用的一次能源和二次能源品种包括原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、天然气、液化天然气、热力、电力共 20 个能源品种,不包括能源平衡表中的煤矸石、其他石油制品、其他焦化产品和其他能源。

根据 IPCC 提出的方法^[1],地区能源消费 CO₂ 排放总量可以根据一次能源和二次能源消费导致的 CO₂ 排放量加总而得。具体的计算公式如下:

$$T_{\text{CO}_2}^a = \sum_{i=1}^n T_{\text{CO}_2,i}^a = \sum_{i=1}^n \frac{44}{12} E_i N_{\text{CV},i} C_{\text{EF},i} C_{\text{OF},i} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{CO}_2}^a$ 为地区能源消费 CO₂ 排放总量; i 代表不同的能源品种; E_i 为某能源品种消费量; $N_{\text{CV},i}$ 为某能源品种净发热值,本文采用《中国能源统计年鉴 2011》中提供的各能源品种平均低位发热量; $C_{\text{EF},i}$ 为 IPCC 提供的某能源品种碳排放系数,其中,原煤的碳排放系数 IPCC 没有报告,本文采用文献^[11]的方法,按 IPCC 提供的烟煤碳排放系数(80%)和无烟煤碳排放系数(20%)的加权平均值作为中国原煤的碳排放系数; $C_{\text{OF},i}$ 为碳氧化因子(煤炭为 0.99,其余能源品种为 1); 44 和 12 分别为 CO₂ 和 C 的分子量。

本文使用的各类能源 CO₂ 排放系数及计算参数见附录 A 表 A1。

1.2 考虑二次能源省际交易的 CO₂ 排放量

国内二次能源生产主要包括发电、供热、炼焦、炼油四大能源产业。基于网络碳排放流理论,本文将二次能源输出省向二次能源输入省调配的二次能源在生产、运输和消费过程中产生的 CO₂ 均计为二次能源终端消费地的 CO₂ 排放量,而非二次能源生产地的 CO₂ 排放量。不考虑电力生产的省际二次能源交易所引起的 CO₂ 排放增减变动量为:

$$T_{\text{CO}_2}^b = \sum_{i=1}^n T_{\text{CO}_2,i}^b = \sum_{i=1}^n (I_{\text{CO}_2,i} - O_{\text{CO}_2,i}) \quad (2)$$

式中: $T_{\text{CO}_2}^b$ 为二次能源的省际交易所引起的某省份 CO₂ 排放增减变动量; $I_{\text{CO}_2,i}$ 为输入的二次能源在生产、运输过程的 CO₂ 排放量; $O_{\text{CO}_2,i}$ 为输出的二次能源在生产、运输过程的 CO₂ 排放量; i 表示存在省际交易的二次能源品种。

热力生产、消费的特征为就近供热,通常情况下不存在省际交易,也不会带来地区 CO₂ 排放量的变化,可以直接采用本地区热力生产所使用的一次能源消耗 CO₂ 排放量。电力生产具有独特的技术经济特征,存在各区域电网不同的水电、火电比例,以

及不同的火电生产效率和火电碳排放系数,留待第2节在网络碳排放流理论上,单独讨论区域电网结构和省际电力交易对分省化石能源 CO₂ 排放量的影响。因此,可用式(2)直接处理的能源品种为炼焦和炼油行业生产的各类二次能源品种。

根据文献[12]的研究,中国炼焦行业平均每吨焦炭产品的综合能耗为 146.49 kg 标准煤。炼焦的原材料主要是原煤,采用原煤的 CO₂ 排放系数可以推算出焦炭生产的单位 CO₂ 排放量为 406.14 kg/t^[3]。文献[13]根据常用交通工具的碳排放因子和运输遗撒率估算了煤炭在铁路、船舶和公路运输过程中的运输碳排放量,从“三西”地区至华东,煤炭的运输能耗排放率的合理范围是 2.05%~2.88%。由于本文使用的能源平衡表只提供了各省市二次能源输入、输出数据,无法进一步考察跨省二次能源交易细节,特别是二次能源运输过程中的交通工具碳排放和运输遗撒,本文未将一次和二次能源运输过程中的 CO₂ 排放计入能源终端消费省市。

石油炼制比炼焦过程更为复杂,在炼制的不同阶段有不同的主要产品,炼制的产品也因炼油设备工艺的不同而有所差异。参照文献[14]的研究,不同的炼厂构型、不同的石油炼制产品存在不同能耗值和 CO₂ 排放系数,由于缺乏各省市炼油设施的详细资料,本文采取简单平均的方法估算炼油过程中二次能源液化石油气、汽油、柴油、燃料油、煤油的能耗均值,进而推算其生产过程中的 CO₂ 排放量。

考虑二次能源省际交易的 CO₂ 排放量可由上述地区能源消费 CO₂ 排放总量和二次能源的省际交易所引起的 CO₂ 排放增减变动量加总而得,计算公式为:

$$T_{CO_2} = T_{CO_2}^a + T_{CO_2}^b + E_{CO_2} \quad (3)$$

式中: T_{CO_2} 为考虑省际二次能源交易后的分省化石能源 CO₂ 排放量; E_{CO_2} 为考虑区域电网结构和省际电力交易后的电力消费 CO₂ 排放量,将在第2节中讨论。

2 基于电力系统碳排放流的电力消费 CO₂ 排放量测算方法

传统的基于一次能源消费的碳排放计算方法,在电力系统中仅将火力发电厂视为点排放源进行研究,未能体现电网的网络结构特征,与电力系统中的潮流计算相脱节,也不适合中国存在大规模电力跨省输送的国情。根据网络碳排放流理论在对机组-负荷碳流关联分析中提出的比例共享原则,即对于系统中某一存在负荷的节点,系统中所有机组的碳

流注入对负荷碳流率的贡献比例与对流入该节点碳流率综合的贡献比例相等^[6-8],本章构建了将电网中火电生产对应的 CO₂ 排放量分摊到各省市,作为电力终端消费对应的 CO₂ 排放量的方法。

2.1 区域电网结构与 CO₂ 排放转移

自 2002 年实施电力体制改革以来,中国电网形成了区域电网、省级电网及独立电网构成的多层结构。区域电网所涵盖省份的电力输入、输出优先在区域电网内部进行省际调度,其次才进行跨区域电网调度。目前,国家电网公司经营的区域电网包括华东电网、华中电网、西北电网、东北电网、华北电网,南方电网公司经营南方区域电网。除很少的省份存在多个省级电网,国家电网的省网公司经营范围基本与省级行政区划相一致,为本文使用各省市能源平衡表中的电力数据考察省际 CO₂ 排放转移提供了基础。

与国家“西部大开发”“西电东送”整体战略布局相一致,目前国内电力跨区域交易的总体趋势是由西向东输送,电源基地多分布在煤炭、水力资源相对丰富的中西部地区,电力受端主要是京津冀鲁、江浙、珠海三角洲等东部发达地区^[5]。大规模的电力调配一方面解决了东部经济发达地区的用能问题,另一方面也将电力生产污染排放留在了西部落后地区。从区域经济协调发展的角度出发,基于电力消费重新核算中国各省市 CO₂ 排放量可以为中国经济的可持续发展提供重要的决策依据。

不同的火力发电企业在发电过程中的能源投入种类、能源转换效率各不相同,使得不同省份、不同区域电网的电力 CO₂ 排放系数存在差异^[15-16]。在各区域电网中,同时存在大量排放 CO₂ 的火电企业和几乎没有 CO₂ 排放的水电等清洁能源生产企业,不同的区域电网上网电量中的水电、火电比例各不相同,使得在不同的节点上输入同量电力所隐含的 CO₂ 转移排放量也各不相同。例如,北京从山西(煤电为主)、湖北(水电比例较高)输入同量电力隐含的 CO₂ 转移排放量就应有所不同。有必要基于网络碳排放流理论,发展新的基于区域电网结构的电力消费 CO₂ 排放量计算方法来重新核算各省市的 CO₂ 排放量。

2.2 基于区域电网结构的电力终端消费 CO₂ 排放量测算方法

电力系统具有独特的技术经济特征,发电、供电、用电瞬间同时完成,输送到区域电网上进行省际交易的电力很难区分具体的来源。本文基于碳排放流在电力网络中分布的特性和机理,将某一区域电网内的省际电力交易视为一个整体,讨论其能源转

换效率和排放系数,进而将电力省际交易中隐含的 CO₂ 转移排放量按比例分摊到区域电网中存在电力输入的省市。

值得注意的是,由于电力生产和消费具有季节性,部分省级电网在一年之内不同的时期存在不同的输入输出状态。一些水电占比大的省份,在丰水期大量输出电力,而在枯水期需要从区域电网输入电力。以青海省为例,青海省火电发电量仅占全省发电量的 20.7%,而整个西北电网跨省输送的电力中火电比例高达 73.4%。2010 年青海省全年输出电力 5.695 TW·h,输入电力 5.021 TW·h,电力净输出 0.674 TW·h,但由于输出的电力中水电比例很高,而输入的电力主要是来自西北电网的火电,隐含大量的 CO₂ 排放转移,使青海省全年电力净输出的情况之下,反而成为 CO₂ 净输入省。因此,本文在处理区域电网跨省电力交易带来的隐含 CO₂ 排放转移时,分别使用各省级电网的电力消费量(终端消费量+输配电损失量)、电力输入量和电力输出量进行计算,而非全年的净电力输入或输出量。

如果存在跨区域电网的电力交易,则需要先根据输出电网的火电碳排放系数和水电、火电比例对电力跨区域交易带来的隐含 CO₂ 转移排放量进行核算,然后分摊到受端电网中各存在电力输入的省市。以华北电网为例,华北电网作为受端电网,网内的电力消费市场北京、天津等省级电网,除从华北电网内部的山西电网大规模输入电力以外,还需要从蒙西电网、西北电网购入电力。因此,本文在处理华北电网所辖各省市的电力输入隐含 CO₂ 排放转移时,需要将华北电网内部电力省际交易和从蒙西电网、西北电网输入华北电网电力所隐含的 CO₂ 排放量按比例分摊到存在电力输入的省市。在这一计算过程中,各电网不同的火电碳排放系数和水电、火电比例作为重要的参数被考虑到计算过程之中。

类似于煤炭、成品油运输中的损失量,电力在传输过程中存在输配电损失的问题^[13,17]。网络碳排放流理论可以确定隐含在电网结构中的碳排放流,并确定电力传输过程中由于输配电损失带来的 CO₂ 排放量。本文使用的《中国能源统计年鉴》在全国电力平衡表和分省能源平衡表中,各省的电力消费量包括终端消费量和输配电损失量两个组成部分,全国的电力生产量(可供量)与终端消费量和输配电损失量之和相等(由于数据统计口径的问题,2010 年全国的电力可供量与电力消费量之间存在 0.2 TW·h 的平衡差额)。使用这一电力消费量分摊各省 CO₂ 排放量实际上已经将输配电损失带来的 CO₂ 排放分摊到对应的省市。

测算各省市电力消费 CO₂ 排放量的具体计算方法如下。

1) 电力输出情景下电力消费 CO₂ 排放量

式(3)中的电力消费 CO₂ 排放量 E_{CO_2} 表示为:

$$E_{\text{CO}_2} = S_j P_j \frac{C_j}{T_j} \quad (4)$$

式中: S_j 为省份 j 的电力消费量(终端消费量+输配电损失量); P_j 为火电消费量在省份 j 的电力消费量中所占的比例,这一变量没有直接的统计数据,本文采用该省份火电生产量 T_j 与电力生产总量 E_j 之比作为火电在电力消费中占比的替代变量,即 $P_j = T_j / E_j$; C_j / T_j 为火电 CO₂ 排放系数; C_j 为省份 j 火电生产一次能源消耗的 CO₂ 排放总量。

由于电力输出情景下的电力消费量低于电力生产量,因此其考虑区域电网结构和省际电力交易后的电力消费 CO₂ 排放量是火电生产一次能源投入 CO₂ 排放总量的一部分。

2) 电力输入情景下电力消费 CO₂ 排放量

如果某省级电网采取网调方式从区域电网中购入电力,满足自身电力生产不足,则该情景下省份 j 从区域电网输入的火电消费量可表示为:

$$\omega_j = M_j \frac{\sum_{j=1}^n P_j W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (5)$$

式中: ω_j 为省份 j 从区域电网输入的火电消费量; n 为区域电网中省份的数量; M_j 为省份 j 的电力输入量; W_j 为区域电网中省份 j 的电力输出量; $(\sum_{j=1}^n P_j W_j) / (\sum_{j=1}^n W_j)$ 表示整个区域电网省际交易电力中火电所占的比例。

区域电网的火电 CO₂ 排放系数 β 可表示为:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{T_j} P_j W_j}{\sum_{j=1}^n P_j W_j} \quad (6)$$

省份 j 从区域电网输入电力中的隐含 CO₂ 排放量为从区域电网输入的火电消费量与区域电网的火电 CO₂ 排放系数的乘积:

$$r_j = \omega_j \beta \quad (7)$$

则电力输入情景下电力消费 CO₂ 排放量为:

$$E_{\text{CO}_2} = (S_j - M_j) P_j \frac{C_j}{T_j} + r_j \quad (8)$$

$$E_{\text{CO}_2} = (S_j - M_j) P_j \frac{C_j}{T_j} + M_j \frac{\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{T_j} P_j W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (9)$$

3) 存在跨区域电网电力交易时的电力消费 CO₂ 排放量

类似于电力输出情景,对于向外输出电力的区域电网,可以使用电力消费量直接核算其电力消费 CO₂ 排放量。从其他区域电网输入电力的区域电网中的电力输出情景下的电力消费 CO₂ 排放量同样可以使用其电力消费量直接核算电力消费 CO₂ 排放量。唯一需要处理的是需要从其他区域电网输入电力的区域电网中的电力输入情景下的电力消费 CO₂ 排放量。设该区域电网从其他区域电网 k 输入电力,则省份 j 从区域电网输入电力中的隐含 CO₂ 排放量可重写为:

$$r_j = M_j \frac{\sum_{j=1}^n W_j P_j \frac{C_j}{T_j} + \sum_{k=1}^n R_k \frac{\sum_{m=1}^n W_{m,k} P_{m,k} \frac{C_{m,k}}{T_{m,k}}}{\sum_{m=1}^n W_{m,k}}}{\sum_{j=1}^n W_j + \sum_{k=1}^n R_k} \quad (10)$$

式中: R_k 为省份 j 所在区域电网从其他区域电网 k 输入的电力;下标 m,k 表示区域电网 k 中的第 m 个省。

在此基础上,可以继续使用式(8)计算电力输入情景下的电力消费 CO₂ 排放量。

3 各省市 2010 年基于能源终端消费的 CO₂ 排放量

3.1 各省市 CO₂ 排放量与省际二次能源交易带来的 CO₂ 排放转移规模

本文使用《中国能源统计年鉴 2011》各省市能源平衡表(实物量)中提供的 2010 年能源生产和消费数据计算 2010 年中国各省市化石能源消费 CO₂ 排放量,结果如表 1 所示。在不考虑省际二次能源交易的情况下,仅使用各省市一次能源和二次能源消费量测算的 2010 年全国化石能源消费 CO₂ 排放总量为 935 483 万 t。考虑省际二次能源交易后,加上二次能源生产过程的 CO₂ 排放量,2010 年全国化石能源消费 CO₂ 排放总量为 955 860 万 t。

表 1 2010 年中国各省市化石能源消费 CO₂ 排放量
Table 1 Chinese provinces' CO₂ emissions from fossil energy consumption in 2010

省市 (自治区)	CO ₂ 排放量/万 t		省际二次能 源交易带来的 CO ₂ 排放转 移规模/万 t	CO ₂ 排 放转移 规模占 比/%	省市 (自治区)	CO ₂ 排放量/万 t		省际二次能 源交易带来的 CO ₂ 排放转 移规模/万 t	CO ₂ 排 放转移 规模占 比/%
	不考虑省 际二次能 源交易	考虑省际 二次能源 交易				不考虑省 际二次能 源交易	考虑省际 二次能源 交易		
北京	11 592.44	17 752.24	6 159.81	53.14	河南	56 178.32	58 625.42	2 447.10	4.36
天津	15 074.89	16 346.58	1 271.69	8.44	湖北	36 889.03	35 812.57	-1 076.46	2.92
河北	75 757.11	85 671.91	9 914.79	13.09	湖南	28 861.51	30 422.95	1 561.44	5.41
山西	46 487.12	40 707.30	-5 779.82	-12.43	广东	504 97.48	56 641.09	6 143.61	12.17
内蒙古	56 000.69	44 431.66	-11 569.03	-20.66	广西	18 385.32	18 619.83	234.51	1.28
辽宁	51 913.74	58 069.34	6 155.59	11.86	海南	2 726.33	2 876.36	150.03	5.50
吉林	23 088.72	22 508.01	-580.70	-2.52	重庆	14 412.99	15 408.26	995.27	6.91
黑龙江	24 968.90	25 106.33	137.43	0.55	四川	31 151.18	31 441.37	290.19	0.93
上海	21 601.59	24 993.37	3 391.78	15.70	贵州	21 919.12	17 982.90	-3 936.21	-17.96
江苏	63 978.46	68 029.01	4 050.55	6.33	云南	21 103.16	19 687.72	-1 415.44	-6.71
浙江	38 623.91	41 207.19	2 583.28	6.69	陕西	23 257.48	20 947.31	-2 310.17	-9.93
安徽	29 967.83	26 710.86	-3 256.97	-10.87	甘肃	14 263.07	13 879.25	-383.82	-2.69
福建	21 160.90	21 549.82	388.92	1.84	青海	3 308.45	3 577.39	268.94	8.13
江西	15 209.76	15 827.62	617.86	4.06	宁夏	10 404.35	9 888.83	-515.51	-4.95
山东	87 817.04	91 862.21	4 045.17	4.61	新疆	18 883.02	19 275.19	392.17	2.08

注:《中国能源统计年鉴 2011》未提供西藏自治区的能源平衡表,故本文未计算西藏自治区的 CO₂ 排放量。

省际二次能源交易带来的 CO₂ 排放转移对部分省市的化石能源消费 CO₂ 排放量带来了重大影响。其中,CO₂ 排放量增加最大的二次能源输入省为河北(CO₂ 排放量为 9 914.79 万 t,增加了 13.09%)、北京(CO₂ 排放量为 6 159.81 万 t,增加了 53.14%)、辽宁(CO₂ 排放量为 6 155.59 万 t,增加了 11.86%)和广东(CO₂ 排放量为 6 143.61 万 t,增加

了 12.17%)。CO₂ 排放量减少最大的二次能源输出省(自治区)为内蒙古(CO₂ 排放量为 11 569.03 万 t,减少了 20.66%)、山西(CO₂ 排放量为 5 779.82 万 t,减少了 12.43%)、贵州(CO₂ 排放量为 3 936.214 万 t,减少了 17.96%)和安徽(CO₂ 排放量为 3 256.97 万 t,减少了 10.87%)。

以北京市为例,2010 年北京市从其他省市输入

原煤 2 455.45 万 t、洗精煤 198.62 万 t、焦炭 75.92 万 t、石油制品 1 255.01 万 t、天然气 75.03 亿 m³、电力 56.564 TW·h。传统的 CO₂ 排放量核算方法将二次能源生产过程中的 CO₂ 排放量计入二次能源生产省,不算作北京的 CO₂ 排放量。本文提出的处理省际二次能源交易带来的 CO₂ 排放量转移的方法,使北京在使用上述输入二次能源时,CO₂ 排放量增加了 6 160 万 t,其中仅其他省市向北京的电力输入就转移了 CO₂ 排放量 5 694 万 t。新方法将二次能源生产地发电、供热、炼焦、炼油四大工业过程中的污染物排放转移到能源终端消费地,增加了作为二次能源终端消费地的北京应负担的减排责任。由于中国能源终端消费地往往是经济发达地区,考虑省际二次能源交易的

CO₂ 排放量计算方法有利于更有效地重新分配能源输出地区和能源输入地区之间的 CO₂ 减排责任。

3.2 省际电力交易带来的 CO₂ 排放转移

电力是现代社会最为重要的能源品种之一,传统的 CO₂ 排放量核算方法将火电生产产生的 CO₂ 排放计入电力生产地的 CO₂ 排放量,而本文使用的新方法将其计为电力消费地的 CO₂ 排放。中国的省际电力交易是省际二次能源交易带来 CO₂ 排放转移的主要原因,2010 年全国电力消费 CO₂ 排放量达 349 038 万 t,占全国化石能源消费 CO₂ 排放总量的 36.5%,占二次能源消费 CO₂ 排放量的 75.5%。2010 年中国各省市电力交易和电力消费 CO₂ 排放情况如表 2 所示。

表 2 2010 年中国各省市电力交易和电力消费 CO₂ 排放量
Table 2 Chinese provinces' CO₂ emissions from power trading and electricity consumption in 2010

省市 (自治区)	电力净输入 量/(TW·h)	省际电力交易 带来的 CO ₂ 排放 转移规模/万 t	电力终端消 费 CO ₂ 排 放量/万 t	省市 (自治区)	电力净输入 量/(TW·h)	省际电力交易 带来的 CO ₂ 排放 转移规模/万 t	电力终端消 费 CO ₂ 排 放量/万 t
北京	55.488	5 654.98	7 641.4	河南	15.012	854.53	24 395.6
天津	10.892	1 104.69	6 284.2	湖北	-59.919	-1 748.44	6 492.7
河北	66.850	6 774.83	28 891.3	湖南	13.411	935.75	8 867.0
山西	-69.051	-7 017.97	14 835.3	广东	85.678	5 783.26	27 102.0
内蒙古	-106.446	-12 010.60	17 340.6	广西	-3.900	-148.50	5 425.6
辽宁	37.501	4 181.61	19 198.4	海南	-0.205	-15.69	1 206.3
吉林	-8.125	-774.99	5 503.3	重庆	14.145	929.71	4 356.5
黑龙江	-3.293	-365.27	8 393.8	四川	-15.486	-376.22	5 466.5
上海	35.198	2 472.31	10 920.5	贵州	-55.012	-4 210.20	6 393.8
江苏	36.508	2 495.33	31 032.9	云南	-32.170	-1 787.44	5 502.6
浙江	25.342	1 841.74	20 063.4	陕西	-9.532	-1 191.27	7 614.5
安徽	-38.540	-3 918.00	10 939.4	甘肃	-7.008	-312.49	5 171.3
福建	-4.124	-232.41	7 498.4	青海	-0.674	244.75	1 266.9
江西	6.292	424.78	6 095.6	宁夏	0	0	5 563.0
山东	20.761	2 103.96	34 090.8	新疆	-0.310	-25.69	5 484.7

从表 2 中可以发现,2010 年国内电力输出最多的几个省(自治区)依次为内蒙古、山西、湖北和贵州,电力输入最多的几个省市依次为广东、河北、北京和辽宁,这些省市由省际电力交易带来的 CO₂ 排放转移规模也最大。

中国经济发展最为落后的西部地区 12 个省市(自治区)(四川、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、内蒙古)2010 年电力输出量高达 216.392 TW·h,考虑电力省际交易带来的 CO₂ 排放转移,西部省市电力消费 CO₂ 排放量减少了 22 742.27 万 t。值得注意的是,西部地区内部的能源资源分布并不均衡,既存在内蒙古、贵州这类电力大规模输出省,也有部分电力输入地区,例如

2010 年电力输入为 21.677 TW·h 的重庆市。

东部地区(北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南)是中国经济最发达的区域,同时也是电力大规模输入地区。2010 年东部地区输入电力 332.388 TW·h,考虑电力省际交易带来的 CO₂ 排放转移,东部省市电力消费 CO₂ 排放量将增加 26 281.18 万 t。

火电生产的效率是影响全国 CO₂ 排放总量和地区分布的重要因素,火电生产效率越高,单位电力生产和消费所隐含的 CO₂ 排放量就越低。决定火电生产效率和 CO₂ 排放效率的有两个因素:一是煤炭发电综合利用技术,现阶段中国火力发电及电站供热的加工转换效率远低于世界平均水平,

2010 年全国平均火电 CO₂ 排放系数为 1.042 tCO₂/(MW·h),以火电生产效率最高的北京市(CO₂ 排放系数为 0.739 tCO₂/(MW·h))为参考,仍有巨大的节能减排空间;二是火电生产使用的一次能源品种,中国火电生产的主要燃料是煤炭,造成火力发电 CO₂ 排放强度偏高。以海南省为例,其火力发电投入能源结构中天然气占比达 12.29%,有效地减少了火电生产 CO₂ 排放,火电碳排放系数仅为 0.847 tCO₂/(MW·h)。

目前国内火电生产效率和 CO₂ 排放效率最高的省市依次为北京、海南、江苏和广东,均集中在东部沿海发达地区,而效率最低的省份(自治区)为云南、内蒙古、吉林和辽宁,均为煤炭和火电生产大省。大规模地从火电生产效率和 CO₂ 排放效率低的地区向效率高的地区输送电力,一方面带来了大量 CO₂ 排放转移,使电力生产污染物排放留在了中西部经济欠发达地区,不利于地区经济的协调发展,另一方面,也使从国家层面协调地区间的利益分配机制,促使东部沿海发达省份向中西部能源输出省转移资金和技术,提高火电生产的效率,从全局上减少 CO₂ 排放成为可能。

4 结语

中国是一个能源资源分布和经济发展水平差异很大的国家,在全球气候变化和 CO₂ 减排的大背景下,如何协调能源输出省和能源输入省在 CO₂ 减排中的责任成为区域经济协调发展的关键问题。本文研究发现,大规模的省际二次能源交易意味着二次能源输入省应该承担更多的 CO₂ 减排责任,在区域 CO₂ 排放量的核算中应该基于一次和二次能源终端消费和二次能源生产过程重新估算中国各省市化石能源 CO₂ 排放量。这一新的分省化石能源 CO₂ 排放核算方法有利于理清二次能源生产地与能源终端消费市场之间的利益分配问题,进而更加准确地测算各省市的能源使用效率和 CO₂ 排放效率。

与其他二次能源相比,由于电力在终端使用时不排放 CO₂,全部 CO₂ 排放均在火电生产过程中完成,因此考虑区域电网结构,处理省际电力交易、跨区调运与 CO₂ 排放转移的关系是核算省际二次能源交易带来的 CO₂ 排放转移的关键。本文研究发现,区域电网结构、各区域电网不同的火电、水电比例和火电生产效率对中国各省市的 CO₂ 排放量存在很大的影响,决定了省际电力交易隐含的 CO₂ 排放转移规模。本文提出的基于区域电网结构计算水

电、火电比例和火电碳排放系数,测算省际电力交易隐含的 CO₂ 排放量转移的方法,使对中国各省市 CO₂ 排放量的测算更为准确。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. 2006.
- [2] 肖涛,张宗益,汪锋.我国区域能源消耗与经济增长关系——基于能源输入省与输出省面板数据的实证分析[J].管理工程学报,2012,26(3):74-79.
XIAO Tao, ZHANG Zongyi, WANG Feng. The relationship between regional energy consumption and economic growth in China[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2012, 26(3): 74-79.
- [3] 周曙东,赵明正,王传星,等.基于二次能源省际调配的中国分省 CO₂ 排放量计算[J].中国人口资源与环境,2012,22(6):69-75.
ZHOU Shudong, ZHAO Mingzheng, WANG Chuanxing, et al. Calculation of carbon dioxide emissions considering secondary energy deployment among provinces in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(6): 69-75.
- [4] 郑立群.中国各省市碳减排责任分摊——基于零和收益 DEA 模型的研究[J].资源科学,2012,34(11):2087-2096.
ZHENG Liqun. Sharing the carbon emission reduction responsibility across Chinese provinces: a zero sum gains DEA model[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2087-2096.
- [5] KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Carbon emission flow in networks [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 479.
- [6] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流分析理论初探[J].电力系统自动化,2012,36(7):38-43.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianqiao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [7] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流的计算方法初探[J].电力系统自动化,2012,36(11):44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianqiao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [8] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J].电力系统自动化,2012,36(15):39-44.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianqiao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.
- [9] 电监会办公厅.2012 年 12 月电能交易监管情况[EB/OL]. [2013-01-09]. <http://www.serc.gov.cn/qwfb/qwxxfb/201301/>

t20130109_36649.htm.

[10] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2011[M].北京:中国统计出版社,2012.

[11] 陈诗一.能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J].经济研究,2009(4):41-55.

CHEN Shiyi. Energy consumption, CO₂ emission and sustainable development in Chinese industry [J]. Economic Research Journal, 2009(4): 41-55.

[12] 翁雪鹤.我国焦炭单位产品综合能耗统计中存在的问题研究[J].冶金经济与管理,2009(4):22-26.

[13] 康重庆,周天睿,陈启鑫,等.电网低碳效益的评估模型及其应用[J].电网技术,2009,33(17):1-7.

KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Assessment model on low-carbon effects of power grid and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 1-7.

[14] 李雪静,乔明,郑铁丹.世界炼油工业二氧化碳减排进展[J].中外能源,2010,15(5):64-70.

LI Xuejing, QIAO Ming, ZHENG Yidan. Advances in CO₂ emission reduction in global refining industry[J]. Sino-global Energy, 2010, 15(5): 64-70.

[15] 陈启鑫,康重庆,夏清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化,2009,33(15):18-23.

CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonization and their impact on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.

[16] 陈晓科,周天睿,李欣,等.电力系统的碳排放结构分解与低碳目标贡献分析[J].电力系统自动化,2012,36(2):18-24.

CHEN Xiaoke, ZHOU Tianrui, LI Xin, et al. Structure identification of CO₂ emission for power system and analysis of its low-carbon contribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 18-24.

[17] 刘焕志,李扬,柏瑞,等.区域电力市场中实用网损计算及分摊的研究[J].电网技术,2003,27(3):63-67.

LIU Huanzhi, LI Yang, BO Rui, et al. Practical calculation and allocation of transmission losses in regional electricity market[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 63-67.

汪 锋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:能源环境经济、电力系统。E-mail: wangfeng2008@cqu.edu.cn

豆南南(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向:低碳经济。E-mail: nan_nan_0209@yahoo.com.cn

喻冬梅(1980—),女,硕士,中级经济师,主要研究方向:低碳经济。E-mail: yudongmei@gmail.com

(编辑 蔡静雯)

Measurement of Provincial CO₂ Emission from Fossil Energy Consumption Based on Carbon Emission Flow in Power Systems

WANG Feng¹, DOU Nannan¹, YU Dongmei²

(1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Chongqing Office of Ministry of Finance, Chongqing 400023, China)

Abstract: Accurate calculation of each province's CO₂ emissions in the process of economic development is the basis of analyzing regional energy and environment efficiency and making the regional energy saving policies. Based on the theory of carbon emission flow in power systems, a method of calculating Chinese provinces' CO₂ emissions from fossil energy consumption is developed proceeding from the secondary-energy terminal consumption. By considering the provincial trading of secondary energy, especially interprovincial electricity transactions under the regional grid structure, the provincial CO₂ emissions from fossil energy consumption are calculated according to the energy consumption and loss of terminals. Owing to the serious unbalance of domestic energy resources distribution and energy consumption, there are a lot of interprovincial secondary energy transactions. Thus the proposed method is more rational than the traditional methods which only consider the primary energy consumption when calculating each province's CO₂ emissions from fossil energy consumption.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71133007, No. 71303270), MOE (Ministry of Education in China) Project of Humanities and Social Sciences (No. 10XJC790004), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CQDXWL-2012-167).

Key words: CO₂ emissions; carbon emission flow; secondary energy; regional grid structure