

基于物质流分析的中国煤炭资源 流动碳效应研究

张赛杰¹, 赵 媛^{1,2}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学金陵女子学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 利用物质流分析方法, 对我国煤炭作为能源燃料和工业过程与产品利用的原料进行代谢分析, 综合选取碳排放总量、贡献率和碳效率指标, 作为衡量 2012 年分部门煤炭资源流动碳排放效应的基础变量, 采用投入产出模型计算部门影响力系数与感应度系数, 并结合碳效应核算结果对我国煤炭资源流动合理性进行了对比分析。结果表明, 煤炭资源在社会经济系统内流动状态及碳排放源不一; 部门间碳排放分布不均衡, 且碳排放效率差异性表现显著; 从碳效应的性质上, 划分为高碳排放部门、中碳排放部门和低碳排放部门; 从煤炭资源流动合理性角度来看, 低碳排放部门是我国煤炭资源利用结构最合理的部门。减排政策应该具有部门针对性, 走低碳生产和提高碳效率并重的道路, 促进煤炭资源在产业部门间的配置结构逐步趋向合理, 实现清洁高效节约化利用。

[关键词] 煤炭资源流动, 碳效应, 物质流分析

[中图分类号] X322 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2017)02-0107-09

Carbon Effects of Coal Resources Flow in China Based on Material Flow Analysis

Zhang Saijie¹, Zhao Yuan^{1,2}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Ginling College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Using the material flow analysis method, this paper analyses the metabolic characteristics generated in the process of the China's coal as a source of energy fuels and industrial processes and products of raw materials fuel. In this context, this paper selected carbon emissions, contribution rates and carbon efficient index synthetically as fundamental variable for measuring carbon scale, share and efficiency of coal resources flow and comparatively analyzed different sectors for the effects of carbon emissions in 2012. Then, the input-output coefficient was used to calculate the influence coefficient and the sensitivity coefficient, and the rationality of the coal resource flow was compared with the result of the carbon effect accounting. The results show that the carbon was tracked within the social and economic system and coal resources flow shows different states for subsystems. Besides, direct carbon emissions of coal resources were unevenly distributed, with concentration of sectors and significant difference between carbon emissions efficiency. As for carbon effects essence, direct carbon emission was significantly different among various industrial sectors, which can be divided into high, medium and low carbon sectors. From the point of view of the rationality of coal resources flow, the low carbon emission sector was the most reasonable sector of coal resources utilization structure in China. Emission reduction policies should therefore have the authority to decrease carbon production and improve the efficiency of carbon, promoting the allocation structure of coal resources in the industrial sectors, and gradually achieving clean and efficient use.

Key words: coal resources flow, carbon effects, material flow analysis

收稿日期: 2016-12-11.

基金项目: 国家自然科学基金(41371518).

通讯联系人: 赵媛, 教授, 博士生导师, 研究方向: 区域经济与可持续发展. E-mail: zhaoyuan@njnu.edu.cn

我国“富煤贫油少气”的能源资源禀赋和燃煤发电为主的能源利用模式,决定了煤炭在能源结构中始终占据主体地位.同时,煤炭资源在不同产业间的流动具有显著的产业利用特征,然而,煤是碳的载体,煤炭利用是我国二氧化碳排放的最主要来源^[1].目前,我国煤炭产业的资源循环利用程度有限、碳排放量仍然很大,能源生态系统远不完善,迫切需要更为具体地针对煤炭的不同利用环节开展碳排放效应分析.

自2000年以来,国内外学者从国家、区域和行业等层面开展资源物质流分析研究,分析框架多样^[2-11],围绕资源循环经济、可持续发展等方面的研究不断深入^[12-13],并对资源减物质化、行业能源需求与碳排放预测进行了探讨^[14-15],上述文献为本文提供了良好基础,但将煤炭资源流动作为特定的主体,基于物质流分析的角度对煤炭资源流动过程的碳排放进行研究还很少.

以往的煤炭利用碳排放分析,无论是区域的还是分部门的,都是把煤炭作为能源,用区域或部门的煤炭使用量乘以燃烧排放系数得出排放总量,这些分析忽略了煤炭作为其他工业原料在转换利用过程中的碳排放效应.虽然煤炭在工业转换中产生的这部分碳排放比重不大,但绝对数量不容忽视,对于把握煤炭资源流动全过程的碳效应具有重要意义.此外,煤炭资源在利用的各环节中物质形态、功能都发生了转化,在每个环节中流量、利用效率和碳排放对区域可持续发展都是不可或缺的.

本文以我国煤炭资源流动为研究对象,以2012年《中国投入产出表》以及2013年《中国能源统计年鉴》为基础数据,基于物质流分析方法,对我国煤炭作为能源燃料和工业过程与产品利用的原料进行代谢分析,全面分析煤炭资源流动过程中相关碳排放产生的来源、路径、数量和效率,编制煤炭资源流动所产生的CO₂排放清单,识别不同环节、不同部门碳排放源及其对环境负荷的贡献;采用投入产出模型计算部门影响力系数与感应度系数,并结合碳效应核算结果分析我国煤炭资源流动合理性,为碳减排政策的制定提供依据.为便于计算分析,以《国民经济行业分类与代码》为参考,将能源统计年鉴和投入产出表的行业分类调整一致,归并调整为32个行业部门.

1 中国煤炭资源流动代谢特征

物质流分析(Material Flow Analysis,简称MFA)是在一定时空范围内对经济社会系统内部物质资源流动和贮存进行系统分析与研究的一种方法^[16],主要研究物质流动规律及其对环境产生的影响,评价或预警经济活动现有及潜在的资源环境压力,是了解经济发展生态可持续的一个窗口^[17].与煤炭资源代谢相关的人类经济活动主要包括资源开采、加工转换、运输、消费、排放与处理等过程和环节.煤炭资源物质流代谢核算模型的构建依据质量守恒定律,建立恒等式,保证在煤炭资源流动过程中每个环节输入与输出的物质和能量持平,即:输入=累积+输出.

从物质流视角分析煤炭能源的代谢特征,即,煤炭能源以不同方式被开采、集中起来,一部分通过不同的加工转换方式转变为二次能源,经过运输与分配最终被终端消费部门利用,在这一过程中,一次能源中的相当部分在转换过程中损失掉了,或者用于其他非能量目的;另一部分则直接经过输送与分配被终端消费部门利用.这一流动过程不仅仅是煤炭能源的物理和化学形态的转变,还反映了煤炭能源所含物质和能量在各圈层迁移的过程.根据煤炭资源流动过程中的消耗情况及物质平衡关系,对2012年我国煤炭资源流的输入、转移、转化和输出关系进行分析,绘制煤炭资源物质流代谢图(图1).

综合考虑输入到社会经济系统的煤炭资源流以及经过生产消费等环节之后输出到自然环境中的CO₂排放情况,进一步分析各子系统内碳排放源及物质流动情况.碳排放途径主要包括开采和洗选环节的生产排放,加工转换环节的锅炉燃烧和煤化工生产排放,运输环节的燃料燃烧排放以及终端消费排放等.在加工转换部门中,其中的一部分经燃烧氧化后转变为CO₂排放到大气,余下部分经煤化工等加工转换过程仍以化合物形式存在于二次燃料中,另一部分直接进入终端消费部门.进入终端消费部门的含碳输出物,一部分经燃烧氧化后转变为CO₂排放到大气,另一部分则以非能源利用形式或经氧化转变为CO₂排放到大气,或转变为新的化合物固定在产品中而没有排放到环境中.在运输子系统中,移动源燃烧造成的排放量主要产生于交通部门,包括公路、铁路、水运等部门燃料燃烧产生的碳排放(表1).

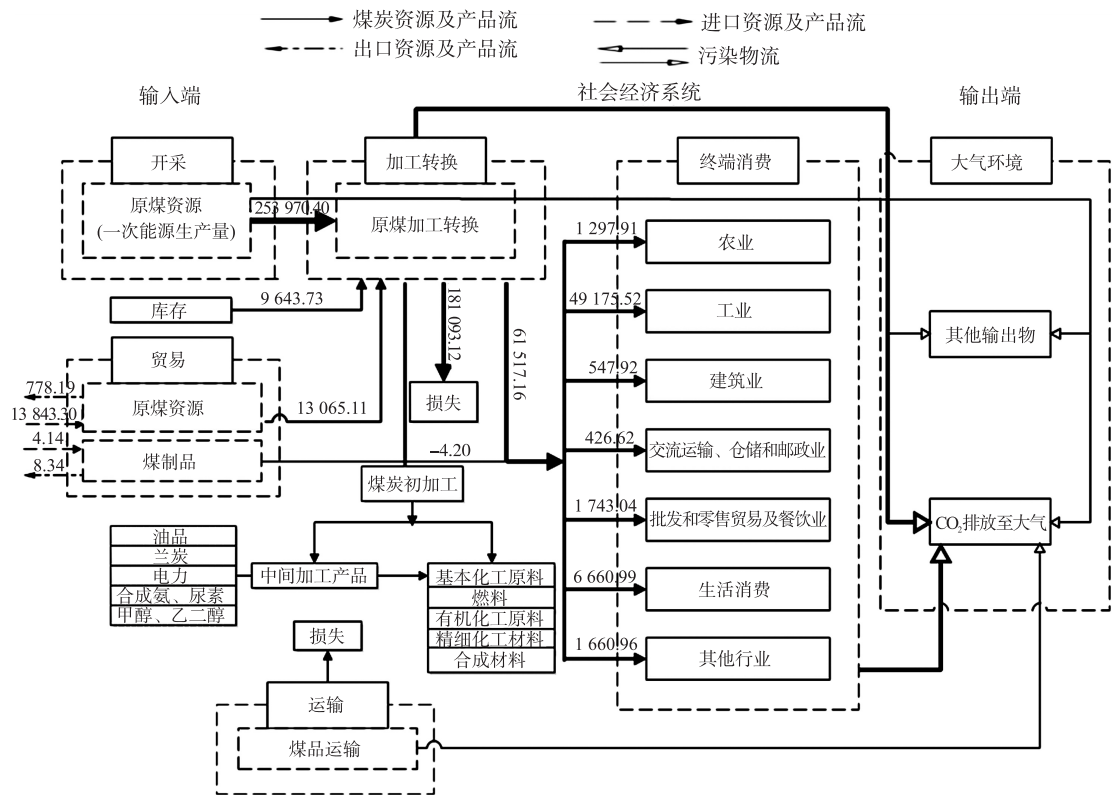


图 1 2012 年中国煤炭资源物质流代谢示意图(单位:10⁴ tce)

Fig. 1 Material flow metabolic map of China's coal resources in 2012(10⁴ tce)

表 1 煤炭资源流动过程中排放源及物质流动情况

Table 1 Emission sources and material flow in the process of coal resources flow

生命 周期	工艺过程	排放源	子系统物质流动情况					
			从自然界 输入的物质	与其他经济体 之间的产品 输入和输出	向自然界 输出的物质	子系统间 输出的物质	输入和输出 的平衡项	损失 耗散
原煤 开采	破煤、装煤、运煤、支护、 处理采空区和辅助生 产等	燃煤、堆煤自燃、运输 消耗和矿下除尘的水 消耗等	煤炭资源、煤 矸石、各种伴 生矿和水资源	煤炭生产设备 用电、煤矸石	废水、部分 煤矸石、煤 层气	煤炭资源、 煤层气	水的蒸发耗 散	可采储量 内的未采 部分
煤炭 加工 转换	发电、供热、洗选(跳 汰、重介、脱水、浮选、干 选、风选等);煤化工 (焦化、气化、液化等)	入洗煤干燥设备的电 力能耗排放、锅炉燃 烧、焦炉气、煤焦油、 生石灰等转换工艺段	毛煤、水和氧 气	煤炭加工用 电、煤泥	废水、粉煤 灰、煤泥等 残料、废气	二次能源产 品、联产产 品以及副产 品等	氧气、热量、 水的蒸发耗 散、其他气 体等	投入的能 源数量和 产出之差 体等
煤炭 运输	铁路运输、水路运输和 公路运输等	移动源燃烧产生排放	焦炭、原煤	运输过程中消 耗的煤、电	煤尘污染等	焦炭、原煤	水的蒸发耗 散等	逸散排放 与损耗
终端 消费	煤炭消费活动	消费排放	煤制品	能源和能源 产品	环境污染物	有用能源和 服务	水的蒸发耗 散等	燃料逃逸 排放

2 中国煤炭资源流动碳效应分析

2.1 研究方法

煤炭资源流动碳效应分析包括两部分:首先,测算 32 部门碳排放量、碳排放贡献率与碳排放效率;其次,采用投入产出模型,计算 32 部门影响力系数与感应度系数.

2.1.1 各部门 CO₂ 排放量核算

从煤炭资源物质代谢过程进行评定,在系统边界内区分碳排放源类别,煤炭能源贡献的不全是燃烧产生碳排放,还包括化学反应和能源转化过程中有大量的碳进入产品中,因此将煤炭资源流动不同层级对应的部门按利用方式分为能源利用、工业过程与产品利用两大类,纳入不同的核算范畴. 具体来说,能源利

用部门主要是利用煤炭的直接燃烧产生能量来进行发电、供热、提供动力等的部门;在工业过程与产品利用部门中,煤主要是作为基础原料、还原剂使用,所涉及的工业利用途径和环节为:①原料利用(计入煤化工行业排放);②还原剂利用(计入钢铁行业排放)(表 2)。

表 2 各部门煤炭资源 CO₂ 排放量核算方法
Table 2 Methods classification for carbon dioxide emissions of coal resources in sectors

类型	利用途径	部门分类	测算方法	变量说明	数据处理
能源利用	燃烧	燃烧部门	依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》 ^[18] 中给出的碳排放量测算方法,将其中的参考方法进行拓展,进一步把煤炭消费量细分到各主要耗煤部门中,得到基于广义参考方法的煤炭燃烧利用相关 CO ₂ 排放清单,具体公式如下: $E_{\text{燃烧}} = E_r \cdot NCV \cdot CEF \cdot COF \cdot (44/12)$	$E_{\text{燃烧}}$ 为煤炭用作燃料 r 部门所产生的 CO ₂ 排放量(万 t); E_r 为 r 部门对煤炭能源的消耗量(万 tce); NCV 为煤炭低位发热量(TJ/万 t); CEF 为煤炭能源碳排放系数(tC/tce); COF 是煤炭碳氧化因子(%)。	基于统计资料获取分部门煤炭消耗量数据及增加值, NCV 采用《中国能源统计年鉴》中规定的煤炭能源平均低位发热量, CEF 参考已有研究成果取平均值 0.714 2 tC/tce 确定煤炭能源碳排放系数 ^[19-20] , COF 采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中的缺省值 ^[18] ,44/12 为碳转化 CO ₂ 系数。
		煤化工	煤化工作为工业过程中煤炭碳排放的重要环节,生产工艺种类数量多,以煤炭为起始物料,化工产品为末端输出,采用碳质量平衡法核算“外排碳”,来反映煤化工工艺过程中碳排放实际情况。计算公式如下: $E_{\text{原料}} = [\sum_r (AD_r \cdot CC_r - \sum_p (AD_p \cdot CC_p))] \cdot (44/12)$	$E_{\text{原料}}$ 为煤炭用作原材料产生的 CO ₂ 排放量(万 t); r 为原材料种类; AD_r 为原材料 r 的投入量(万 t); CC_r 为原材料 r 的含碳量(tC/t); p 为流出边界的含碳产品种类,包括各种具体名称的主产品、联产产品、副产品等; AD_p 为含碳产品 p 的产量(固体或液体产品以 t 为单位,气体产品以万 Nm ³ 为单位); CC_p 为含碳产品 p 的含碳量(固体或液体产品以 tC/t 为单位,气体产品以 tC/万 Nm ³ 为单位)。	结合煤化工生产工艺路线中碳排放源的识别和划分情况,以统计资料为依据分别确定原材料投入量、产品量和含碳量的活动水平数据 ^[18] 。(表 3)
工业过程与产品利用		钢铁(烧结、炼铁、炼钢等工序)	钢铁生产过程中的碳排放来源于碱性氧气转炉(BOF)、电弧炉(EAF)及平炉(OHF)三个阶段,主要是高纯度的氧与熔化铁中的碳结合进行放热反应、碳电极的消耗以及冶金焦还原铁矿石等过程,其测算公式为: $E_{\text{钢铁}} = BOF \cdot EF_{\text{BOF}} + EAF \cdot EF_{\text{EAF}} + OHF \cdot EF_{\text{OHF}}$	$E_{\text{钢铁}}$ 为钢铁生产过程碳排放量(万 t); BOF 为 BOF 中生产的粗钢量(万 t); EAF 为 EAF 中生产的粗钢量(万 t); OHF 为 OHF 中生产的粗钢量(万 t); EF 为二氧化碳排放因子(tCO ₂ /t 粗钢)。	粗钢量数据来自中国统计年鉴, EF 数据取自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》 ^[18] ,三个阶段依次取值 1.46、0.08、1.72。

表 3 推荐的工业生产过程排放因子或基本参数
Table 3 Recommended for industrial production process emission factors or basic parameters

类别	单位	推荐数值	类别	单位	推荐数值	类别	单位	推荐数值
碳酸氢铵	tC/t	0.151 9	煤制乙二醇	tC/t	0.387 0	电石	tC/t	0.314 0
煤基尿素	tC/t	0.199 1	煤制油	tC/t	1.622 6	生铁平均含碳量	%	4.100 0
煤制甲醇	tC/t	0.374 9	煤制天然气	tC/Nm ³	1.309 0	钢材平均含碳量	%	0.248 0
煤制烯烃	tC/t	3.027 0	焦炭作为还原剂	tC/t	0.845 4	金属硅	tC/t	1.172 6

2.1.2 各部门碳排放贡献率与碳排放效率测算

本文采用碳排放贡献率指标来判断部门排放量大小在总量中的贡献程度,其计算公式为:
$$CEC_r = CE_r / CE, \tag{1}$$

式中, CEC_r 为 r 部门碳排放贡献率(%); CE_r 为 r 部门碳排放量(10^4 t); CE 为碳排放总量(10^4 t)。
采用碳排放效率指标来反映在排放相应的大气碳容量后,单个经济产出单位能够创造出的经济价值,高度强调节能减排的重要性,其值越大,所代表的碳排放效率也就越高。表达式如下:

$$CEE_r = VA_r / CE_r, \tag{2}$$

式中, CEE_r 为 r 部门碳排放效率(10^4 元/t); VA_r 为 r 部门增加值(10^8 元)。

2.1.3 影响力系数

影响力系数是一对多的概念,指国民经济某一产品部门增加一个单位最终产品对国民经济各部门所

产生的生产需求波及程度,也称后向关联系数. 公式如下:

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

式中, F_j 为影响力系数, $\sum_{i=1}^n b_{ij}$ 为列昂惕夫逆矩阵的第 j 列之和; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}$ 为列昂惕夫逆矩阵的列和平均值. $F_j = 1$, 表示第 j 部门的生产对其他部门所产生的需求波及影响程度等于社会的平均影响力水平; $F_j > 1 (< 1)$, 表示第 j 部门的生产对其他部门所产生的需求波及影响程度超过 (低于) 社会的平均影响力水平.

2.1.4 感应度系数

感应度系数是多对一的概念, 指国民经济各部门均增加一个单位最终产品时, 某部门由此而受到的需求感应程度, 即需要本部门为其他部门生产所提供的支持量, 也称前向关联系数. 公式如下:

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (4)$$

式中, E_i 为感应度系数, $\sum_{j=1}^n b_{ij}$ 为列昂惕夫逆矩阵的第 i 行之和; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}$ 为列昂惕夫逆矩阵的行和平均值. $E_i = 1$, 表示第 i 部门所受到的感应程度等于社会平均感应程度; $E_i > 1 (< 1)$, 表示第 i 部门所受到的感应程度高于 (低于) 社会平均感应程度.

2.2 煤炭资源流动碳效应测度结果

综合选取碳排放量、贡献率和碳效率指标, 作为测度 2012 年我国煤炭资源流动碳排放规模效应、份额效应和效率效应的基础变量. 碳效应分析结果见表 4.

表 4 2012 年我国煤炭资源流动碳排放效应

Table 4 The coal flow effects of carbon emissions in China (2012)

编号	部门	碳排放		
		总量/(10^4 t)	贡献率/%	效率/(10^4 元/t)
1	电力、热力的生产和供应业	330 424.327 3	51.46	0.038 0
2	钢铁行业(高炉喷吹)	72 307.580 1	11.26	0.172 2
3	非金属矿物制品业	66 560.002 3	10.37	0.068 5
4	煤化工行业	26 660.333 3	4.15	0.870 3
5	煤炭开采和洗选业	26 510.773 7	4.13	0.418 5
6	化学原料及化学制品制造业	24 737.451 7	3.85	0.937 9
7	黑色金属冶炼及压延加工业	21 587.422 9	3.36	0.576 9
8	居民生活部门	17 110.037 7	2.66	2.850 8
9	食品制造及烟草加工业	4 852.515 5	0.76	4.265 7
10	批发和零售贸易及餐饮业	4 477.342 4	0.70	13.259 6
11	其他服务业	4 266.499 9	0.66	25.627 4
12	造纸印刷及文教体育用品制造业	3 451.499 7	0.54	2.023 3
13	农、林、牧、渔、水利业	3 333.922 7	0.52	15.704 9
14	有色金属冶炼及压延加工业	2 378.611 9	0.37	3.108 4
15	石油及核燃料加工业	2 232.009 7	0.35	2.586 4
16	纺织业	2 163.304 5	0.34	3.204 3
17	建筑业	1 407.449 0	0.22	26.150 0
18	通用、专用设备制造业	1 171.349 1	0.18	11.444 8
19	交通运输、仓储及邮电通讯业	1 095.861 3	0.17	20.928 5
20	交通运输设备制造业	972.969 0	0.15	13.214 8
21	非金属矿及其他矿采选业	928.993 0	0.14	3.016 1
22	木材加工及家具制造业	738.653 0	0.12	5.761 5

续表 4 Table 4 continued

编号	部门	碳排放		
		总量/(10 ⁴ t)	贡献率/%	效率/(10 ⁴ 元/t)
23	金属制品业	596.420 8	0.09	43.989 7
24	金属矿采选业	562.800 4	0.09	8.642 3
25	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	490.722 9	0.08	12.934 6
26	电气机械及器材制造业	277.233 8	0.04	30.019 6
27	工艺品及其他制造业	241.172 2	0.04	2.160 3
28	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	178.192 6	0.03	61.915 3
29	燃气生产和供应业	126.928 9	0.02	5.330 8
30	水的生产和供应业	55.854 4	0.01	13.990 5
31	仪器仪表及文化、办公用机械制造业	39.072 6	0.01	31.612 4
32	废弃资源和废旧材料回收加工业	27.650 4	0.00	118.106 6
	总量	621 964.956 3	100	484.931 1
	均值	19 436.400 1	3.13	15.150 0

注:表中 2,4 划归为工业过程与产品利用;其余划至能源利用. 为了避免重复计算,在钢铁行业(高炉喷吹)中不再计入煤炭用于燃料燃烧产生的碳排放.

(1)2012 年我国煤炭资源利用碳排放总量为 6.22 Gt(1 Gt=10⁹ t),其中能源利用碳排放 5.23 Gt,工业生产过程与产品利用碳排放 0.99 Gt. 从分部门碳排放总量来看,作为煤炭产业链起点的开采和洗选业碳排放总量为 0.27 Gt,高于平均水平(0.19 Gt);下游火力发电和供热部门,产生的碳排放量最多,为 3.30 Gt,说明由一次能源向二次能源的转化过程中,碳排放是比较严重的,是煤炭能源碳排放的重点管控部门;非金属矿物制品业碳排放总量 0.67 Gt,位居我国能源利用部门碳排放量的第二位,仅次于发电和供热部门;冶金行业碳排放量总量位列第五,碳排放量达 0.22 Gt;此外,化工也是高能耗、高排放的煤炭资源利用部门,经核算,化学原料及化学制品制造业碳排放量达 2.47 亿 t,这一数值约占煤炭资源利用碳排放的 4.15%,影响相当可观;同时,包括食品、居住、家庭设备用品等在内的居民生活部门碳排放量为 0.17 Gt,也需要给予特别的关注;废弃资源和废旧材料回收加工业碳排放量约为 28 万 t,不到平均水平的 1/1 000,是碳排放最少的部门. 而在工业生产过程与产品利用部门中,钢铁行业和煤化工行业碳排放量分别为 0.72 Gt 和 0.27 Gt,均超平均水平,在 32 部门中遥遥领先. 总体而言,电力、冶金、建材、化工和居民生活五大部门的碳排放量远远高于其他部门,说明我国煤炭资源各部门碳排放分布不均衡.

(2)碳排放贡献率也具有较大的部门差异. 能源利用碳排放和工业生产过程与产品利用碳排放所占比重分别为 84.09%和 15.91%. 在能源利用部门中,电力、热力的生产和供应业、非金属矿物制品业、煤炭开采和洗选业、化学原料及化学制品制造业以及黑色金属冶炼及压延加工业贡献率均超平均水平(3.13%),在这五大部门中,贡献率最高的是电力、热力的生产和供应业(51.46%),最低的是黑色金属冶炼及压延加工业(3.36%),两者相差近 15 倍;另外,研究发现,在 32 个部门中,有 27 个部门碳排放贡献率都在 1%以下,这些部门包括终端消费领域的农林牧渔水利业、建筑业、制造业、燃气和水的生产供应业、商业、交通以及其他服务业. 而在工业生产过程与产品利用部门中,钢铁行业(高炉喷吹)以及煤化工行业对总碳排放的贡献率分别是 11.26%和 4.15%,这说明煤炭用作原料和还原剂对煤炭资源流动全过程碳排放的影响作用还是很大的,需要引起足够的重视,是应该重点管控的部门. 总体而言,电力、冶金、建材、化工和居民生活五大部门的 CO₂ 排放超过 90%,说明我国煤炭资源碳排放分布不均衡,具有部门集中的特点.

(3)碳排放效率的部门差异也十分显著. 就各部门而言,碳排放效率最高的为废弃资源和废旧材料回收加工业,为 118.11 万元/t,最低的为电力、热力的生产和供应业,仅有 0.04 万元/t,分析表 4 可知,碳排放效率的部门差异与碳排放量的部门差异基本一致. 另外由于各部门增加值存在较大差异,因而碳排放效率也明显不同. 煤化工行业以及电力、热力的生产和供应业,碳排放效率极低,不到平均水平的 1/400;通用专用设备制造业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、通信设备计算机及其他电子设备制造业和电气机械及器材制造业等属于知识技术密集型部门,存在较强的规模效益,具有高科技、低消耗、低污染等特点,并且煤炭在能源产业利用中比例较低,碳效率相对较高,远超出平均水平(15.15 万元/t);金属制品业、木材加工及家具制造业等劳动密集程度高的部门,虽然煤炭在能源消费中比例较高,但部门规模较小,因此

部门碳效率较高。

(4)根据煤炭资源流动碳效应特征,可以把煤炭资源流动各部门划分为3种类型:①前1/3定为高碳排放部门(总量>1亿t,碳效率0~1万元/t),如煤炭开采和洗选业、化学工业、黑色金属冶炼及压延加工业等,这些部门具有高能耗高排放的特点,经济产出效率较低,属于资源密集性部门;②中间1/3定为中碳排放部门(总量750万~1亿t,碳效率1~27万元/t),如食品制造及烟草加工业、造纸印刷及文教体育用品制品业等,这类部门规模大,能源需求量大,碳排放总量较高,但是碳成本相对较低,碳效率相对较高;③后1/3定为低碳排放部门(总量<750万t),如仪器仪表及文化办公用品机械制造业等,这些部门包括轻工业和一些资本技术密集性部门,碳排放总量相对较小,碳效率相对较高。

2.3 煤炭资源流动合理性分析

分析煤炭资源流动碳效应特征是为了制定针对性减排目标,但不是某个部门排放多,就强行减少生产,若对经济有巨大推动作用和强大支持能力的部门停滞生产,势必会对经济系统的稳定发展带来冲击。因此短期内不可能对煤炭资源流动各环节中所有的高碳行业部门进行硬性调整,还要尽可能将数量分析与结构分析相结合。本文采用投入产出模型,根据2012年《投入产出表》计算32个部门影响力系数、感应度系数(表5),考虑产业关联连锁反应对煤炭资源在部门间流动产生的影响。

表5 2012年各部门影响力系数和感应度系数
Table 5 Influence coefficient and induction degree coefficient of each sector(2012)

编号	影响力系数	感应度系数	编号	影响力系数	感应度系数	编号	影响力系数	感应度系数
1	0.485 9	1.492 5	12	1.055 2	0.324 0	23	2.066 9	0.370 7
2	1.882 0	2.959 5	13	0.543 9	0.987 8	24	0.692 9	1.186 5
3	0.950 6	0.366 2	14	0.517 9	0.655 3	25	0.886 6	0.136 0
4	1.896 1	4.087 7	15	0.264 5	1.427 3	26	1.220 7	0.350 0
5	0.681 7	0.986 4	16	0.992 3	0.440 2	27	1.271 9	0.068 5
6	1.897 1	5.087 7	17	1.439 7	0.122 2	28	0.964 1	0.440 8
7	3.212 2	2.959 5	18	1.529 2	0.677 3	29	0.217 2	0.089 1
8	0.614 2	0.121 8	19	0.453 1	0.941 5	30	0.591 2	0.071 3
9	0.520 9	0.724 0	20	1.343 8	0.253 4	31	1.034 9	0.136 9
10	0.247 4	0.901 4	21	0.789 5	0.166 3	32	0.324 0	0.288 1
11	0.412 3	2.014 8	22	0.999 3	0.165 4			

从正常煤炭资源流动碳效应角度看,煤炭资源通过投入产出联系在不同层级各部门间进行流动,而碳作为流动负效用元素,如果对国民经济有强大推动和支持能力的部门碳排放量越少,碳效率比较高,就可以认定煤炭资源在此部门的流动是合理的。因此将32个部门影响力系数、感应度系数与碳效率的计算结果按降序排列,排序差距越小,煤炭资源流动越趋于合理。分析结果见图2。

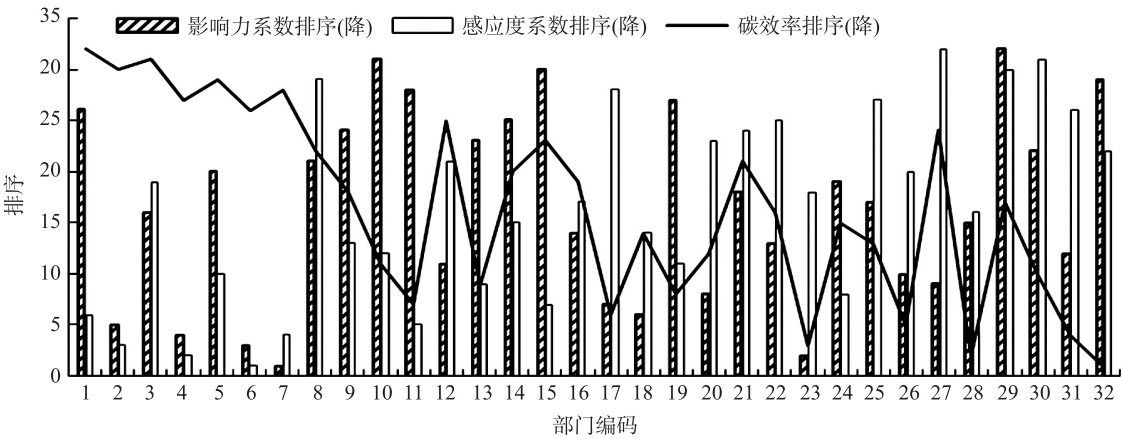


图2 2012年我国煤炭资源流动合理性指标排序
Fig. 2 The reasonable index of coal utilization of sectors in China(2012)

首先,从高碳排放部门来看,钢铁行业(2)、煤化工行业(4)、化学原料及化学用品制造业(6)以及黑色金属冶炼及压延加工业(7)等部门影响力系数与感应度系数均大于1,与国民经济其他部门的前后向关

联效应较强,对经济的发展起很大的推动支撑作用,排序均在前5位,但是碳效率排序均在26以后,很明显,这些部门影响力系数、感应度系数与碳效率排序差距很大,部门不合理,在我国煤炭资源产业链结构是应整治的重点对象;电力热力的生产和供应业(1)和煤炭开采和洗选业(5)两部门感应度系数远大于影响力系数,且与碳效率的排序差距较大,部门不合理,但是作为国民经济基础部门,这些部门碳排放责任重大,应该追求更高的技术水平来实现低碳生产;非金属矿物制品业(3)影响力和感应度系数位于中位数16.5附近,但是其碳效率排序值为31,部门较为不合理。

其次,从中碳排放部门来看,如石油及核燃料加工业(15)、建筑业(17)碳排放相对较多,感应度系数与碳效率排序差距较大,部门不合理,应该及时进行调整以促进低碳生产;相反,其他部门如批发和零售贸易及餐饮业(10)、交通运输仓储及邮电通讯业(19)等,影响力系数小于感应度系数,感应度系数和碳效率排序差距较小,是我国煤炭资源流动产业链结构中相对合理的部门,应该鼓励发展;此外,居民生活部门(8)、有色金属冶炼及压延加工业(14)、非金属矿及其他矿采选业(21)三个指标排序均超过15且排序差距较小,也是中碳排放部门中相对合理的部门;纺织业(16)影响力系数、感应度系数、碳效率排序依次为14、17、19,三者排序差距最小,在中碳排放部门中是最合理的部门。

最后,从低碳排放部门来看,如通信设备、计算机及其他电子设备制造业(28)、仪器仪表及文化办公用机械制造业(31)以及废弃资源和废旧材料回收加工业(32),部门碳效率较高,排序依次为2、4、1,影响力系数和感应度系数排序虽位于12以后,但是三者之间排序差距较高碳排放部门小,部门较合理;纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业(25)、燃气生产和供应业(29)、水的生产和供应业(30)三个部门影响力系数、感应度系数以及碳效率排序均大于10,排序差距较小,也是相对合理的部门;通用专用设备制造业(18)、电器机械及器材制造业(26)、工艺品及其他制造业(27),这些部门碳效率较高且影响力系数较大,三者排序差距很小,是我国煤炭资源利用结构中较为合理的部门。

3 结论与政策建议

第一,社会经济系统中煤炭资源流动与资源利用、环境效应之间密切相关,与外部的物质交换能够提高社会经济发展水平,但是对生态环境和资源也造成巨大环境负荷,影响环境发展的可持续性;对煤炭资源在社会经济系统内的输入、加工转化、输送、输出等一系列过程进行追踪、量化结果表明,碳排放途径主要包括开采和洗选环节的生产排放,加工转换环节的锅炉燃烧和煤化工生产排放,运输环节的燃料燃烧排放以及终端消费排放等。

第二,不同层级对应的煤炭资源部门按利用方式分为能源利用和工业过程与产品利用两大类,从总体上看,煤炭资源碳排放具有部门集中的特点,主要用来发电、供热、炼焦、制气、直接燃烧和作为工业原料等,而且部门间碳排放效率差异性表现显著。一方面应该改进生产工艺,提高煤炭资源转换与利用效率,以资源环境生态红线为约束,推进电力、建材、冶金、化工等重点部门绿色高效低碳发展。另一方面,在降低能耗、去产能的同时,可以尝试冲破部门局限,整合原本各自独立的生产过程,将能源利用和化工生产结合起来,按照生态产业的思路和物质流分析的启示,发展能源化工多元联合生产。

第三,我国煤炭资源流动碳排放分布不均衡,具有部门集中的特点,碳排放效率的部门差异也十分显著;根据碳效应特征,把煤炭利用各部门划分为高碳、中碳、低碳排放3种类型;进一步,将影响力系数、感应度系数和碳效率的计算结果按降序排列,从煤炭资源流动合理性角度来看,低碳排放部门是我国煤炭资源利用结构最合理的部门。减排政策需要有针对性。高碳排放部门节能减排潜力较大,应制定严格的碳排放规制政策,控制发展规模,提高碳效率,抑制碳排放的快速增长;对其中低碳效率且产业影响力系数较小的行业部门,可以进行限产甚至停产;对于若干高碳排放的基础产业可以立足改进技术通过实施反映低碳经济的行业标准加强低碳转型。对于中碳排放部门,淘汰落后产能,改进生产工艺和部门技术,提高碳效率是减排政策的着力点;注重对其中经济效益好、产业关联度大、但碳效率小的行业部门转型力度的控制。总之,在煤炭利用减排分类型分部门实施的基础上,充分发挥减排政策倒逼机制所引发的引领效应,加强对煤炭资源纵向流动过程的整体管控,推进煤炭资源利用方式向高效、清洁、绿色、低碳转变。

[参考文献]

- [1] 常征. 基于能源利用的碳脉分析[D]. 上海:复旦大学,2012.
- [2] 陈效速,乔立佳. 我国经济—环境系统的物质流分析[J]. 自然资源学报,2000,15(1):18-23.
- [3] 徐明,张天柱. 我国经济系统中化石燃料的物质流分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(9):1 166-1 170.
- [4] 刘征. 我国磷资源产业物质流分析[J]. 现代化工,2005,25(6):1-7.
- [5] 王军,刘西林,肖芬. 煤炭企业物质流分析的实证研究[J]. 现代制造工程,2009(11):21-24.
- [6] 马林,魏静,王方浩,等. 基于模型和物质流分析方法的食物链氮素区域间流动:以黄淮海区为例[J]. 生态学报,2009,29(1):475-483.
- [7] 赖敏,王伟力. 社会经济系统氮素流动及其环境负荷:以长江中下游城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(12):15-24.
- [8] 仇方道,佟连军,李博. 煤炭城市生态经济系统物质输入输出及影响因素:以阜新市为例[J]. 自然资源学报,2009,24(1):115-122.
- [9] 刘伟,鞠美庭,李智,等. 区域(城市)环境—经济系统能流分析研究[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(5):59-63.
- [10] 刘伟,鞠美庭,楚春礼,等. 区域环境—经济系统物质流与能流分析方法及实证研究[J]. 自然资源学报,2011,26(8):1 435-1 445.
- [11] 徐增让,成升魁. 不同省区内部煤炭产业流动及资源环境效应[J]. 经济地理,2009,29(3):425-430.
- [12] 黄松林,吴健生,彭建,等. 基于 MFA 的深圳市生态可持续评价[J]. 地理科学进展,2010,29(9):1 107-1 114.
- [13] 彭建,王仰麟,吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展与展望[J]. 资源科学,2006,28(6):189-195.
- [14] 王红. 基于物质流分析的我国减物质化趋势及循环经济成效评价[J]. 自然资源学报,2015,30(11):1 811-1 822.
- [15] 王晓华. 基于模型的北京市物流发展对节能减排影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [16] 黄建. 煤炭清单与减排政策研究[D]. 上海:复旦大学,2011.
- [17] WOLMAN A. The metabolism of the city[J]. Scientific American,1965,213(6):179-190.
- [18] IPCC/IGES. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [19] 徐国泉,刘则渊,姜照华. 我国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995-2004[J]. 中国人口·资源与环境,2006,16(6):158-161.
- [20] ZHANG Z X. The economics of energy policy in China: implications for global climate change[M]. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Limited, 1998.

[责任编辑:丁 蓉]