

中国行业供应链碳足迹的来源分解分析

——基于投入产出的生命周期评价模型

田成诗 张诗雅*

摘要:行业供应链碳排放的测度与评估对我国制定科学有效的碳减排政策至关重要。为此,本文建立了基于投入产出的生命周期评价模型,利用二项展开式法将我国行业供应链的碳足迹来源分解为六个层次,计算各层次的碳排放量并阐述其实际含义,进而对各层各行业的碳排放占比和行业的碳排放总量作出详细分析,找出碳排放量最大的层级。研究显示,绝大多数的碳足迹产生于电力、热力的生产和供应以及石油、炼焦产品和核燃料加工;行业之间供应链的生产和消费产生的间接碳排放量明显高于其直接碳排放量,且第六层间接碳排放量最大;生活消费的碳排放量位居行业第十,其碳排放量在前五层不明显,在第六层最大,这与城乡居民生活消费水平提高密切相关。对此,本文提出优化能源结构,把工业生产中产生的能量进行多次利用,研发节能建筑及汽车,大力发展低碳行业等政策建议。

关键词:碳足迹;碳排放;行业供应链;生命周期评价;分层分析

一、引言

在我国成为世界第二大经济体的同时,经济增长与环境保护之间的矛盾也日益加剧,减排的任务艰巨,与煤炭密切相关的生产和消费行业显然是节能减排的重点。除此之外,部分行业(如生活消费行业)的直接碳排放量虽然较少,但其间接碳排放量即隐性碳排放量大(秦昌才、刘树林,2013),在减排中也不容忽视。在国民经济体系中,一个行业会把其他行业的产品作为中间投入,或利用其他行业的服务销售产品,同时自己的产品也被其他行业作为生产要素等进行加工使用,这种行业间形成的交织性的供需网络就是行业供应链。行业间错综复

*田成诗,东北财经大学统计学院,邮政编码:116025,电子邮箱:sctian71@163.com;张诗雅,东北财经大学统计学院,邮政编码:116025,电子邮箱:736115262@qq.com。

本文系国家自然科学基金重大课题“基于增加值率的中国经济增长质量研究”(14ZDB130)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家提出的建设性修改意见,文责自负。

杂的供需关系,使得分析行业间的碳排放关系的难度加大。

对于当前碳排放的研究,大多文献利用投入产出法追踪产品或服务的生产与消费,进而来追踪整个经济系统的直接和间接碳排放,主要集中于国家和区域层面或某些行业层面。国家碳排放核算层面,Lenzen(1998)、Yabe(2004)、Sanchez-Choliz和Duarte(2004)、Mongelli等(2006)、Weber和Matthews(2008)以及Chen和Zhang(2010)使用投入产出法分别分析了澳大利亚、日本、西班牙、意大利、美国和中国的碳排放情况;李新运等(2014)用RAS法更新了2010年投入产出表,采用两级分解平均法对我国2007-2010年行业碳排放量的四个组成部分进行因素分解,发现间接碳排放占我国碳排放总量的80%左右。区域碳排放核算层面,唐建荣和李焯(2013)基于中国2007年地区经济投入产出表及EIO-LCA模型,从直接排放和隐性排放视角分析了江浙沪三地的部门碳排放分布结构,发现上海为碳排放净输出地区,江苏为碳排放净输入地区;吴常艳等(2015)采用EIO-LCA方法对江苏省产业的直接和间接碳排放进行测算,并构建碳减排潜力模型模拟产业结构调整引起的减排潜力;Zhang等(2017)通过投入产出分析和结构路径分析,将中国经济从能源开采到最终消费的整个供应链联系起来,发现原煤是中国主要的能源类型;Duan等(2018)将多区域投入产出分析和生态网络分析相结合,评估中国的碳流量,并确定空间异质性背景下的关键区域和部门,结果表明西北地区是中国大部分地区最大的控制者,中国其他地区的大部分碳排放都是由东部的最终需求和大量消费引起的;Wang等(2019)使用投入产出模型计算了2002-2012年京津冀三地的城乡居民消费的直接和间接碳排放,利用结构分解分析发现碳排放强度和居民消费水平是影响居民消费间接碳排放的主要因素,其中碳排放强度在北京和天津产生负面影响、对河北产生积极影响,住宅消费水平在三个区域均起到了积极作用。

行业碳排放核算层面,Matthews等(2008)界定了行业直接碳排放与完全碳排放,并使用投入产出法对碳排放足迹进行测度,得出行业直接碳排放量平均只占供应链的碳排放总量的14%;曹淑艳和谢高地(2010)以2007年投入产出数据对52个行业的直接碳排放和间接碳排放进行测算,对各行业的碳流入和流出特征进行了评估,发现产业部门再分配过程产生的碳排放占完全碳排放的83.3%;秦昌才和刘树林(2013)通过定义直接排放系数和完全排放系数,基于2007年中国投入产出数据建立了产业完全碳排放分析框架,得出建筑业碳排放量最大,通信设备、计算机及其它电子设备业的碳排放强度最大;关军(2014)改进了基于投入产出的混合生命周期评价模型(IO-HLCA),提出基于敏感性分析的重要能量路径分离方法,用于测算建筑能耗与碳排放;杨顺顺(2015)基于修正的投入产出模型和RAS法,对中国工业部门的碳排放转移路径进行预测,发现其碳排放的转移主要沿能源转化部门、采掘业、流程制造业和离散制造业路径移动;万宇等(2017)采用EIO-LCA模型对比了中国2007年和2012年八大行业的直接碳排放和间接碳排放量,发现制造业间接碳排放量有所下降,而服务业间接碳排

放量有所上升;Xing等(2018)将EIO-LCA模型和DEA模型相结合,发现电力生产和供应部门是最大的能源使用、二氧化碳排放和废气排放部门,而建筑部门是对环境间接影响最大的部门;Wang等(2018)采用生命周期评估(LCA)方法分析中国燃煤发电对环境的影响,利用相关成本理论将影响值量化为具体金额,研究发现环境成本高的排放来自煤、二氧化硫、化学需氧量和锅炉灰,且发电阶段的环境成本最高,达到50.24美元。

从已有文献看,当前研究大多利用生命周期-投入产出法(IO-LCA)从碳排放强度等方面对行业直接碳排放和间接碳排放进行比较分析,也有部分研究从行业能量结构路径角度分析行业的碳排放流动路径,但对各层级各行业间接碳排放比重的详细分析和处理仍较少。从行业供应链的角度出发,具体分析行业间的间接碳排放情况,能够简化行业供应中的碳排放关系、明确行业的碳排放产生环节,为研究碳排放转移提供一种新思路——间接碳排放量高的行业为需求行业,反之为供给行业,行业间的碳排放转移主要由供给行业向需求行业移动。

基于上述因素,本文以详细分析行业间接碳排放为切入点,利用完全消耗系数矩阵的二项展开式的经济含义——行业间产品或服务的直接消耗量和间接消耗量,将行业供应链的碳排放分为直接碳排放和五层间接碳排放,建立六个基于投入产出的生命周期评价模型追踪中国行业供应链中碳排放的足迹。通过分层梳理行业供应链各层供求产生的碳排放,突出重要的碳排放环节,以确定不同层次供应链中的高碳排放行业及其在供应链中所占份额,细化各层次行业供应链间的碳足迹分布情况,为决策者有针对性地制定减排政策、监控减排效果提供参考。

二、方法框架

(一)基于投入产出的生命周期评价模型

生命周期评价法(LCA)常用于评估产品的整个生命周期对环境的影响,包括原材料提取、设计生产、分配、使用和生命周期结束五个阶段,故LCA碳足迹评价具有周期性和整体性,能从整体和部分层面对区域产品或服务的碳足迹影响进行系统评估。LCA模型有过程LCA(P-LCA)、投入产出LCA(IO-LCA)和混合LCA(H-LCA)。其中IO-LCA结合了投入产出法与生命周期评价法的优点,具有完整的系统边界,使用公开数据,消耗时间与成本少。它还考虑了供应链在地区、国家或全球范围内的流程和影响,揭示行业间生产和消费的联系,量化行业间的完全消耗关系,消除了截断误差,其计算结果体现了行业对环境影响的平均水平,适用于宏观研究。

1970年,Leontief提出了IO模型,由此将投入产出分析应用到环境问题(Leontief, 1970)。它的基本假设是: n 个行业组成一个经济体系,每个行业生产一种产品或服务,某一行业以其他行业的产品或服务为原材料生产产品或服务,同时其产品或服务又作为生产原料投入生

产,部门之间通过生产与消费紧密联系并相互影响。一个行业的IO模型构建如下(Miller & Blair, 2009):

$$x = [(I - A)^{-1}]f \quad (1)$$

其中, x 为行业总产出向量, I 为单位矩阵, f 为最终需求向量, A 为行业间的直接消耗系数矩阵, 表示第 k 个行业增加 1 个单位的最终需求时所需要的 i 行业的产出。直接消耗系数为:

$$a_{ik} = \frac{b_{ik}}{X_k} (i, k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

这里, b_{ik} 为行业 k 生产过程中直接消耗行业 i 所生产产品的数量, X_k 为第 k 个行业的产出总量。 $(I - A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵, 反映经济的中间投入产出结构及生产技术水平。一旦逐行业的模型已建立且 x 向量被列入表格, 那么可通过各行业的总经济产出 x_i 乘以环境乘数矩阵 D 得到总的环境影响(直接和间接的碳排放量), 则IO-LCA模型的环境总产出向量 E 可表示为(Blackhurst et al., 2010):

$$E = D_x = D[(I - A)^{-1}]f \quad (3)$$

上式中, E 为最终需求对整体可持续性影响的环境总产出向量, 即行业碳排放总量矩阵。根据秦昌才和刘树林(2013), D 为行业的碳排放强度, 是一个主对角线矩阵, 其对角线元素 d_k 为:

$$d_k = \frac{C_k}{X_k} = \frac{\sum_{i=1}^m \delta_i \gamma_i q_{ik}}{X_k}, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, m 为部门使用的能源的种类数, q_{ik} 为 k 部门所消耗的第 i 种能源的数量, γ_i 为第 i 种能源折算成标煤的系数, δ_i 为第 i 种能源的碳排放系数, C_k 为 k 部门的碳排放总量, X_k 为 k 部门的产出总量。

(二)碳排放的分层分析

IO-LCA模型通过考虑每个部门作为另一个部门的潜在供应商, 提供关于相互依赖的经济部门中多层次供应链的定量测度。在国民经济各部门之间, 各种产品在生产过程中除有直接的生产联系外, 还有间接联系, 这使得各产品间的相互消耗除了直接消耗外, 还有间接消耗。如工业部门生产钢, 需要直接消耗电力、生铁等, 而生产生铁又需要消耗电力, 这就是生产钢对电力的第一次间接消耗, 以此类推。层分析将行业的供应链划分为若干层次, 以研究不同层次的经济效益与环境影响份额。

对列昂惕夫逆矩阵 $(I - A)^{-1}$ 进行级数展开得式(5):

$$(I - A)^{-1} = I + A + A^2 + A^3 + \dots + A^k + \dots \quad (5)$$

列昂惕夫逆矩阵也可表示为 $(I+B)$, 矩阵 B 为完全消耗系数矩阵, 其代表某一部门每提供 1 个单位的最终产品, 需要直接和间接消耗各部门的产品或服务的数量。由此得到 B 的级数展开式为:

$$B = (I - A)^{-1} - I = A + A^2 + A^3 + \cdots + A^k + \cdots \quad (6)$$

其中, 矩阵 A 的元素 a_{ik} 表示第 k 产品部门对第 i 产品部门的直接消耗量, A^2 的元素表示第 k 产品部门对第 i 产品部门的第一轮间接消耗量, A^3 表示第二轮间接消耗量, A^4 为第三轮间接消耗量, 以此类推, A^k 为第 $k-1$ 轮间接消耗量。由此对行业供应链进行分层, 第一层是行业对其生产要素的直接消耗, 第二层是行业对其生产要素的第一轮间接消耗, 第三层是行业对其生产要素的第二轮间接消耗, 以此类推, 而第六层是行业对其生产要素的其余所有间接消耗。在一个由 N 个行业组成的经济体系中, 一个行业在其供应链中理论上有 N 层, 行业间供求关系和二氧化碳的产生可由图 1 表示, 其中 S 表示供应链上的物质和服务流量, E 表示供应链上的能源流量。

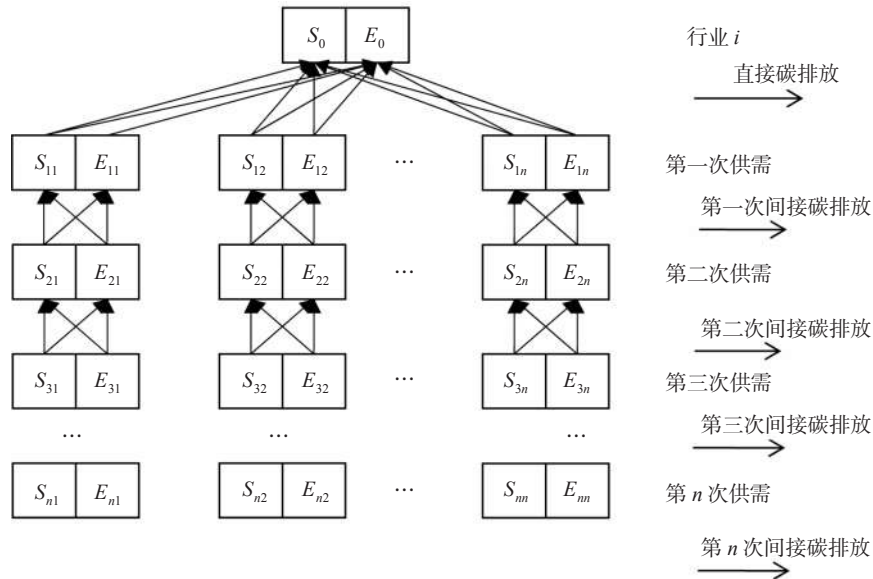


图1 行业供应链供求与碳排放

类似地, 产品或服务的直接消耗和间接消耗这两个过程伴随的碳排放分别称为直接和间接碳排放。由于实际生活中, 各行业的供应链长度不一, 为了统一研究且保证供应链的长度具有研究的实际意义, 在 IO-LCA 研究中使用六层是一种常见的做法, 例如 Kucukvar 等 (2015) 和 Onat 等 (2014), 故本文设定研究的所有行业的供应链长度均为 5, 即六层 IO-LCA 模型。基于完全消耗系数矩阵的级数展开得到公式 (7)–(12), 获得特定层的碳排放量 E_i , 其中 E_1 是行业的直接碳排放量, $E_2 - E_6$ 是行业的各层间接碳排放量 (Miller & Blair, 2009):

$$E_1 = d(A)^1 f \quad (7)$$

$$E_2 = d(A)^2 f \quad (8)$$

$$E_3 = d(A)^3 f \quad (9)$$

$$E_4 = d(A)^4 f \quad (10)$$

$$E_5 = d(A)^5 f \quad (11)$$

$$E_6 = E - (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5) \quad (12)$$

$$E = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6) \quad (13)$$

三、数据来源和处理

基于中国的电力生产大多来源于火力发电,为避免电力和煤炭消费产生的碳排放量被重复计算,故本文在选择能源品种时把电力去除(赵巧芝、闫庆友,2017)。据《中国能源统计年鉴》中的分行业能源消费数据,选取我国各行业消耗的八种主要能源:煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气。在实际消费中,各种能源以实物量计量,不同品种间的计量单位不同,故在测算中先将它们统一计量标准,把各种能源消费量折算成标准煤消费量,标煤转换系数来自于《中国能源统计年鉴2016》的附录四(国家统计局能源统计司,2016)。各能源的碳排放系数根据中国温室气体排放清单研究中的相关排放因子数据和IPCC的排放因子数据综合考虑后确定。碳排放系数和折标煤系数如表1所示。

表1 能源的标准煤转换系数和碳排放系数

能源种类	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
折标煤系数 γ_i	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.3300
碳排放系数 δ_i	0.682	0.765	0.676	0.620	0.616	0.657	0.717	0.523

注:标准煤转换系数中天然气的转换单位为千克标煤/立方米(kgce/m³),其它能源品种的转换单位均为千克标煤/千克(kgce/kg);碳排放系数的计量单位是吨碳/吨标煤(tC/tce)。

模型所需要的其他数据来自于2007年135部门的《中国投入产出表》、2012年139部门的《中国投入产出表》(国家统计局国民经济核算司,2015)、《中国能源统计年鉴2009》和《中国能源统计年鉴2016》。由于投入产出表和能源统计年鉴对行业部门的划分有一定区别,本文基于《中国能源统计年鉴2016》中的分行业能源消费表,将投入产出表中的部门进行合并,得到两个43个行业的投入产出表。从该表可直接获取各行业消费数量 b_{ij} 、行业产出总量 X_k 和行业最终需求向量 f 。各行业2012年的能源消费数据 q_{ik} 来源于《中国能源统计年鉴2016》,但由于能源消费数据不易统计,年鉴中个别行业的某项能源消费数据缺失,对于2000-2015年

数据均无的行业能源消费本文统一作 0 处理,对于 2012 年数据缺失的则取前后两年的平均值作近似替代,详情可见表 2。各行业 2007 年的能源消费数据 q_{ik} 来源于《中国能源统计年鉴 2009》,处理类似 2012 年数据。此外,由式(2)可得到直接消耗系数矩阵 A ,式(3)可得到行业碳排放总量 E ,式(4)可得到行业碳排放强度 d_k ,式(7)–(12)可得到行业各层次碳排放量 E_i 。

表 2	2012 年行业能源消费数据缺失的处理			(单位:亿立方米,万吨)	
行业	焦炭	原油	煤油	燃料油	天然气
农、林、牧、渔产品和服务业		0			
煤炭采选产品		0.04	0.02		
石油和天然气开采业	0				0.05
有色金属矿采选业		0			
非金属矿及其他矿采选业	0	0	0		
食品制造业		0.01	0.01		
烟草制品业	0	0			
纺织业		0.01			
木材加工品和木、竹、藤、棕、草制品业	1				
家具制造业		0.01			
印刷品和记录媒介复制品业	1				
化学纤维制造业		5	0.02		
计算机、通信和其他电子设备制造业		0.02			
仪器仪表制造业		0.01			
其他制造业		0.01			
废弃资源综合利用业		0			
金属制品、机械和设备修理业		0.01			
电力、热力生产和供应业	7.5				
燃气生产和供应业		0.2	0.01		
水的生产和供应业	0	0	0.01	0.02	
建筑业		2			
交通运输、仓储和邮政业	2				
批发、零售业和住宿、餐饮业		0.1			
其他行业		0			
生活消费		0		0	

四、结果和分析

本文利用 MATLAB 分别从分层和总体层面测算行业碳足迹的分布,即从 43 个行业的直接和五层供应链间接碳排放份额以及供应链整体碳排放量的各层份额。2007 年和 2012 年的各行业生产现场产生的直接碳排放份额 E_1 、供应链层次的间接碳排放份额 $E_2 - E_6$ 以及行业

碳排放总量份额 E 如表3所示。

表3 43个行业2007年和2012年在每个层次的碳排放比重 (单位:%)

行业名称	2007年							2012年						
	现场排放	供应链碳排放					总排放	现场排放	供应链碳排放					总排放
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E
农、林、牧、渔产品和服务业	0.93	0.72	0.55	0.45	0.39	0.96	0.75	0.86	0.70	0.54	0.45	0.39	1.00	0.74
煤炭开采和洗选业	1.79	4.62	5.24	5.65	5.93	4.37	4.29	2.14	7.15	8.94	9.99	10.65	7.67	7.12
石油和天然气开采业	0.41	1.33	1.93	2.07	2.11	1.36	1.39	0.43	0.88	1.38	1.52	1.57	1.07	1.04
黑色金属矿采选业	0.06	0.24	0.22	0.20	0.19	0.13	0.16	0.04	0.39	0.38	0.32	0.28	0.17	0.24
有色金属矿采选业	0.02	0.09	0.11	0.11	0.10	0.07	0.08	0.01	0.11	0.14	0.14	0.14	0.09	0.10
非金属矿及其他矿采选业	0.21	0.30	0.22	0.18	0.17	0.12	0.20	0.17	0.44	0.39	0.47	0.51	0.34	0.36
农副食品加工业	0.36	0.24	0.18	0.15	0.14	0.47	0.30	0.57	0.35	0.28	0.24	0.21	0.77	0.47
食品制造业	0.13	0.05	0.03	0.03	0.02	0.53	0.19	0.18	0.07	0.05	0.04	0.03	0.69	0.25
酒、饮料和精制茶制造业	0.20	0.12	0.09	0.08	0.08	0.27	0.17	0.23	0.13	0.10	0.09	0.08	0.39	0.20
烟草制品业	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
纺织业	0.85	0.51	0.35	0.27	0.23	0.77	0.58	0.66	0.45	0.33	0.27	0.23	0.37	0.42
纺织服装、鞋、帽制造业	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.16	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.16	0.06
皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.07	0.03
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	0.19	0.11	0.07	0.06	0.05	0.07	0.10	0.19	0.10	0.07	0.06	0.05	0.06	0.10
家具制造业	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01
造纸及纸制品业	0.99	1.24	1.03	0.87	0.79	0.59	0.91	0.87	1.07	0.94	0.82	0.75	0.59	0.83
印刷业和记录媒介的复制业	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
文教体育用品制造业	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02
石油加工、炼焦和核燃料加工业	18.98	24.0	24.27	23.89	23.36	17.86	21.32	17.11	23.11	23.64	23.37	23.06	20.30	21.25
化学原料和化学制品制造业	5.78	8.14	7.67	6.93	6.40	5.55	6.62	5.79	7.25	7.73	7.75	7.66	6.41	6.89
医药制造业	0.34	0.10	0.04	0.03	0.03	0.13	0.13	0.45	0.13	0.05	0.03	0.03	0.23	0.19
化学纤维制造业	0.30	0.36	0.35	0.29	0.25	0.19	0.28	0.13	0.19	0.19	0.17	0.15	0.12	0.15
橡胶和塑料制造业	0.26	0.27	0.18	0.15	0.14	0.20	0.22	0.28	0.22	0.18	0.17	0.16	0.17	0.20
非金属矿物制品业	11.96	3.71	2.02	1.60	1.49	1.98	4.24	12.66	4.45	2.35	1.74	1.55	2.02	4.64
黑色金属冶炼和压延加工业	21.00	14.53	11.57	10.44	10.12	10.18	13.40	24.93	15.50	11.24	9.44	8.74	7.35	13.44
有色金属冶炼和压延加工业	1.24	1.25	1.11	1.03	1.00	0.83	1.07	1.88	2.06	1.92	1.78	1.70	1.20	1.72
金属制品业	0.21	0.13	0.10	0.09	0.09	0.17	0.15	0.23	0.13	0.10	0.08	0.08	0.16	0.14
通用设备制造业	0.39	0.28	0.24	0.23	0.22	0.51	0.35	0.32	0.22	0.17	0.15	0.14	0.52	0.30
专用设备制造业	0.13	0.08	0.08	0.08	0.08	0.45	0.19	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.25	0.10
交通运输设备制造业	0.27	0.17	0.14	0.12	0.11	0.46	0.25	0.22	0.11	0.08	0.06	0.06	0.47	0.21
电气机械和器材制造业	0.10	0.05	0.04	0.04	0.04	0.14	0.08	0.17	0.08	0.06	0.06	0.06	0.22	0.13
计算机、通信和其他电子设备制造业	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.17	0.11	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04	0.12	0.08
仪器仪表制造业	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
其他制造业	0.09	0.05	0.04	0.04	0.04	0.24	0.11	0.16	0.09	0.07	0.06	0.06	0.18	0.12
废品废料	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03
电力、热力的生产和供应业	22.22	31.0	36.91	40.09	41.78	33.51	32.66	19.36	27.98	33.23	35.81	37.00	29.21	28.91
燃气生产和供应业	0.24	0.28	0.31	0.31	0.30	0.47	0.33	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.29	0.15
水的生产和供应业	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
建筑业	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	1.10	0.31	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	1.04	0.29
交通运输、仓储和邮政业	7.62	4.35	3.62	3.34	3.21	5.93	5.13	6.81	4.74	3.91	3.51	3.31	6.31	5.20
批发、零售业和住宿、餐饮业	0.54	0.31	0.25	0.23	0.22	0.84	0.48	0.74	0.44	0.35	0.31	0.29	1.13	0.64
其他行业	1.27	0.81	0.67	0.62	0.60	1.98	1.16	1.58	0.97	0.80	0.73	0.70	2.22	1.35
生活消费	0.57	0.23	0.19	0.18	0.17	7.01	2.12	0.36	0.14	0.11	0.10	0.10	6.46	1.83

由表3可见,2007年电力、热力的生产和供应业是碳排放总量最高的行业,占总排放量的32.66%。同时它也是直接碳排放量最多的行业,占直接碳排放量的22.22%。根据各层碳排放量可知,电力、热力的生产和供应业所产生的直接碳排放量明显小于其间接碳排放量,即此行业在生产产品或服务时,对其他行业产品或服务的需求产生的碳排放量大于其直接生产产生的碳排放量。例如以我国火力发电为主,燃烧煤炭产生的二氧化碳为直接碳排放,运输煤炭的过程中产生的二氧化碳为一次间接碳排放,这些煤炭开采过程中生成的二氧化碳为二次间接碳排放,以此类推。根据计算,电力、热力的生产和供应业的五次间接碳排放的总量是大于该行业的直接碳排放量的。同时电力、热力也被广泛使用于其他行业的生产中,这与我国制造业的快速发展息息相关。此外,碳排放总量次多的行业是石油、炼焦产品和核燃料加工业,其次是黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业、交通运输、仓储和邮政业、煤炭开采和洗选业。这六个行业的碳排放量占我国碳排放总量的绝大比重,达83.42%,占直接排放量的77.39%,占间接排放量的84.94%。他们是行业供应链中的高碳排放需求行业,碳排放由供给行业向它们转移,在减排中应该给与重视。

2012年,电力、热力的生产和供应业仍是碳排放总量最高的行业,但排放占比相较于2007年有所下降,占总排放量的28.91%,且直接碳排放量最多的行业为黑色金属冶炼和压延加工业,占直接碳排放量的24.93%,排放占比相较于2007年最高值有所上升,这于该段时期我国金属制造业的快速发展密切相关。此外,碳排放总量前六的行业不变且有所下降,占比达82.81%,占直接排放量的76.14%,这表明该阶段我国的减排政策有着较好的执行效果,但煤炭开采和洗选业的排放量大幅上升,碳排放总量占比由4.29%上升至7.12%,应当重点关注。

(一)行业生产现场和供应链排放结果分析

由于2007年和2012年各行业的碳排放量均不同,为统一研究,下文中的二氧化碳排放量前十大行业均以2012年碳排放量前十的行业为基准,以2007年的数据去配合分析。

1. 现场碳排放

行业生产现场的碳排放(直接排放)是行业在生产产品或服务中直接产生的碳排放量,主要来自涉及使用石油燃料和天然气等能源从事生产,以及使用化石燃料如煤和石油燃烧来支持工业流程操作的行业。从生产现场的角度分析行业碳排放,可以发现产品或服务的生产以化石燃料为主要生产要素的行业,从而有针对性地对行业进行能源结构和生产技术等方面的创新改进。本文的层分析法将行业生产现场直接产生的碳排放作为第一层,并将行业供应链的间接碳排放作为其余五层。第一层二氧化碳排放量前十大行业的碳排放占比如图2所示。

由图2可见,2012年黑色金属冶炼和压延加工业的碳排放量超过2007年电力、热力的生产和供应业的碳排放量,是直接碳排放的最大排放贡献者,占有24.93%的份额,其次是电力、

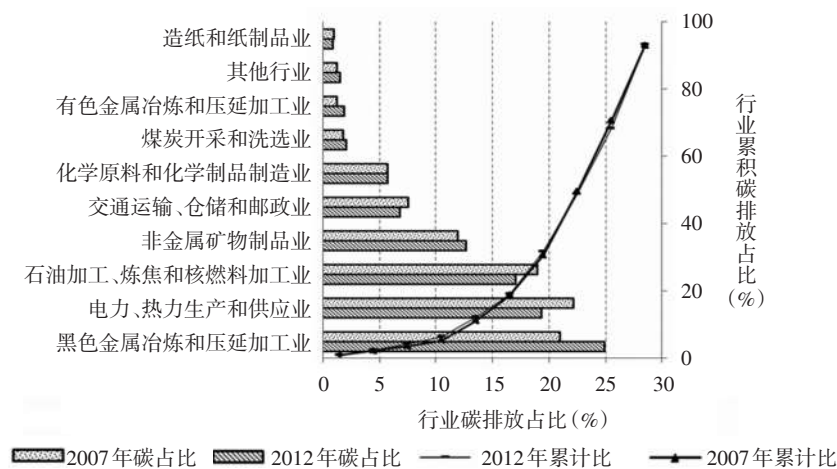


图2 第一层二氧化碳排放前十行业份额对比

热力的生产和供应业、石油、炼焦产品和核燃料加工业及非金属矿物制品业分别占比为19.36%、17.11%和12.66%，且电力、热力的生产和供应业与石油、炼焦产品和核燃料加工业的碳排放量占比同2007年相比均有所下降，这意味着我国针对这些行业现场生产的减排工作取得了一个较好的效果。造纸和纸制品业的直接碳排放占比0.87%，位居前十，一方面说明我国对纸制品的需求量较大，另一方面也能看出造纸现场中产生的碳排放量较大，应引起重视。2007年和2012年碳排放量前十的行业的排放总量均占第一层排放总量的92.8%以上。可以看出，这些直接碳排放量高的行业在生产中，使用了大量的化石燃料，同时他们大多是我国工业发展的基础行业，为工业的发展提供原材料和动力，不可缺少。此外，2007年和2012年的行业累积碳排放占比曲线基本吻合，说明五年间这十个高碳排放行业的现场生产产生的二氧化碳占比总体结构并未发生明显变化，即虽然部分行业的碳排放占比发生变化，但是排放占比的总累积效应未变。

2. 行业供应链间产生的间接碳排放量

各行业之间供应链的需求是由第二层到第六层间接碳排放量的构成基础。本文根据完全消耗系数矩阵的二项展开分析将整个供应链排放分为五层排放，用以追踪行业之间供应链排放源的更多细节。对比发现，电力、热力的生产和供应业和石油、炼焦产品和核燃料加工业是每层间接碳排放量的前两名，这表明二者对生产要素的间接需求产生的碳排放居行业前二，同时他们为各行业每层次产品或服务的生产提供了能源基础。

(1)第二层碳排放：本层表示行业对供应链的需求的第一轮间接消耗产生的碳排放情况。由图3可见，2007年和2012年第二层排名前十位行业的碳排放量占碳排放总量的比例近乎持平，约达到94.28%，同时2012年行业累积碳排放占比积累较快，反映了前十行业中排名较后的行业的碳排放占比相较2007年都有所提升。在2012年的行业碳排放中，电力、热力的

生产和供应业贡献率最高,石油、炼焦产品和核燃料加工业次之,且较2007年相比都有所下降,黑色金属冶炼和压延加工业达15.50%。其他行业分别是化学原料和化学制品制造业、煤炭开采和洗选业、交通运输、仓储和邮政业、非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、造纸和纸制品业等。造纸对纸浆和电力等要素的需求是生产的直接消耗,而纸浆的生产需要消耗木材、电力等,此次电力的需求是造纸的第一次间接消耗,该过程产生的碳排放计入本层。故造纸和纸制品业的碳排放占比在本层上升,表明该行业对其他行业供应链的需求增加,即对原材料的间接需求增加或者产出增加,从而导致其第一次间接碳排放量增加。其他行业的分析类似。

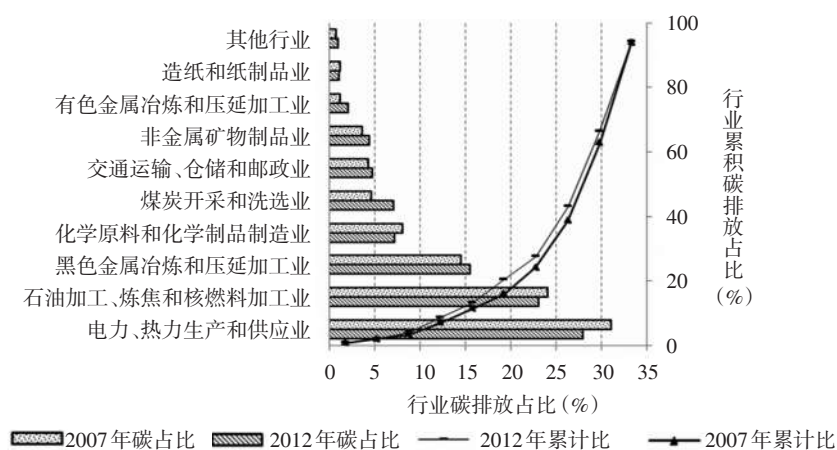


图3 第二层二氧化碳排放前十行业份额对比

(2)第三层碳排放:由图4可见,2007年和2012年该层排名前十位的行业的碳排放量占比差距更小,同时较第二层排放份额有所上升,碳排放占比近似为95.3%,说明本层各行业对供应链需求的第二轮间接消耗产生的碳排放份额增加。天然气的开采需要工具管道和电力,工具管道的生产需要钢和电力,钢的生产需要铁和电力,这就是开采业对电力的第二次间接消耗,由此产生的碳排放计入本层。其他行业的分析类似。2012年行业累计碳排放占比在初始阶段基本重合、中段积累较快、最后又接近持平,反映了碳排放量较低的行业碳排放占比相较于2007年变化不大,煤炭开采和洗选业的碳排放占比相较于2007年提升较快,碳排放量高的行业碳排放占比相较于2007年有所下降。电力、热力的生产和供应贡献率仍然最高,且较上层占比明显增加,达33.23%。2012年石油和天然气开采业替换了其他行业作为该层的高碳排放行业之一。这表明,由行业间的需求供给导致石油和天然气的开采力度加大,其对能源、材料等的需求量增大,原材料生产所需的材料也增大,进而间接碳排放量增大。第三层次排名前十的其他行业与第二层次相同,碳排放占比变化幅度不大,同时结合表3发现,从第三层开始到第五层,行业碳排放总量呈现显著逐层递减。

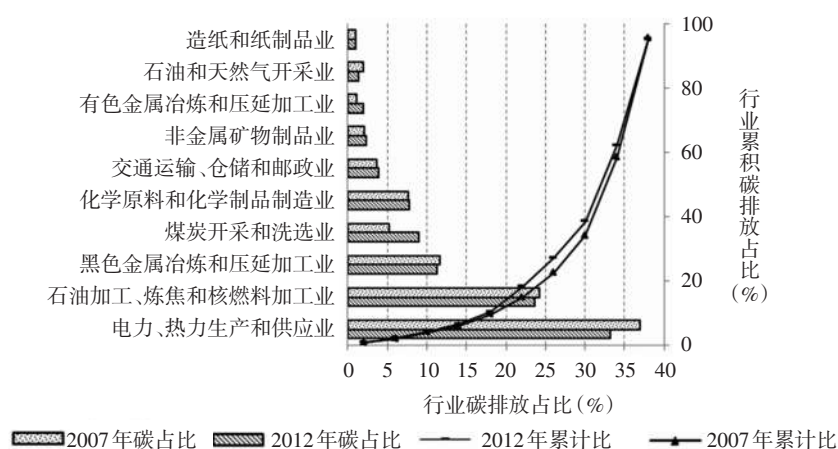


图4 第三层二氧化碳排放前十行业份额对比

(3)第四层碳排放:由图5可见,2012年在第四层排放量中,排名前十的行业共占95.74%,较第三层排放份额略有所上升,碳排放量占比的范围从0.82%~35.81%。本层的碳排放量排名前十的行业与第三层次相同,排放量占比最高的仍然是电力、热力的生产和供应业,且较上层占比继续增加,排放量占比最低的仍然是造纸和纸制品业。这表明,第三层、第四层行业之间供应链的需求基本相似,只是各行业碳排放量占比小幅度上下波动,行业碳排放总量显著减少,即本层各行业对供应链的需求的第三轮间接消耗产生的碳排放量减少。

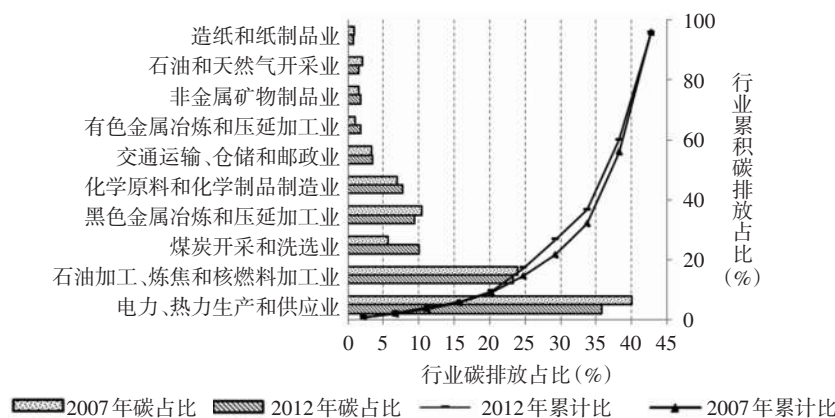


图5 第四层二氧化碳排放前十行业份额对比

(4)第五层碳排放:图6显示,2012年第五层前十大行业的碳排放量占碳排放总量的95.99%,与其它供应链层级相比,这一层的十大行业对碳排放的贡献最大。电力、热力的生产和供应业仍以37.00%的份额位居排放量第一,同时达到该行业各层碳排放占比的顶峰,相较于2017年碳排放量占比降低约5%。其次是石油、炼焦产品和核燃料加工业、煤炭开采和洗选业、黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业等。本层各行业的碳排放总量为五层间接排放量的最低点,这意味着,在本层各行业供应链的产品或服务的生产所产生的

碳排放量最少,在制定减排政策时,可适当减少对本层的关注力度。

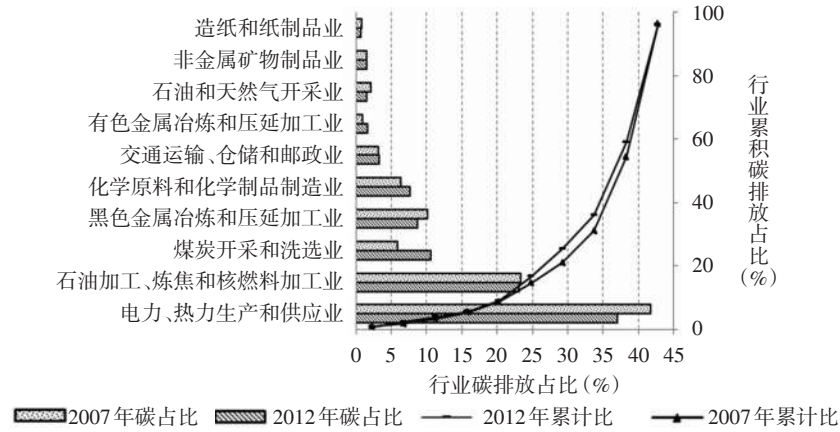


图6 第五层二氧化碳排放前十行业份额对比

(5)第六层碳排放:就最后一层而言,2017年和2012年排名前十的行业的碳排放量总份额约为89.15%,它们对碳排放的贡献占比在这六层中是最小的。图7显示,2012年这一层的最高贡献者仍是电力、热力的生产和供应业,占29.21%,其次为石油、炼焦产品和核燃料加工业,煤炭开采和洗选业,黑色金属冶炼和压延加工业,生活消费,化学原料和化学制品制造业,交通运输、仓储和邮政业,其他行业,非金属矿物制品业以及有色金属冶炼和压延加工业。生活消费的碳排放量在前五层并不显著,但在本层跃居第五,这是由于教育、娱乐、社会保障等部门都是间接消费各种能源和材料,故而其排放量不易察觉,在数层间接排放后才显现出来。此外,虽然本层各行业碳排放占比都略微下降,但行业碳排放总量为五层间接排放量的最高点,这表示行业对供应链剩余所有需求所产生的间接消耗产生的碳排放量最大。这是因为行业供应链的要素需求追踪到本层基本都是对原材料和基础能量的需求,且基础能量是产生二氧化碳的一大重要源头。此外,2007年和2012年的行业累积碳排放占比曲线在本层的

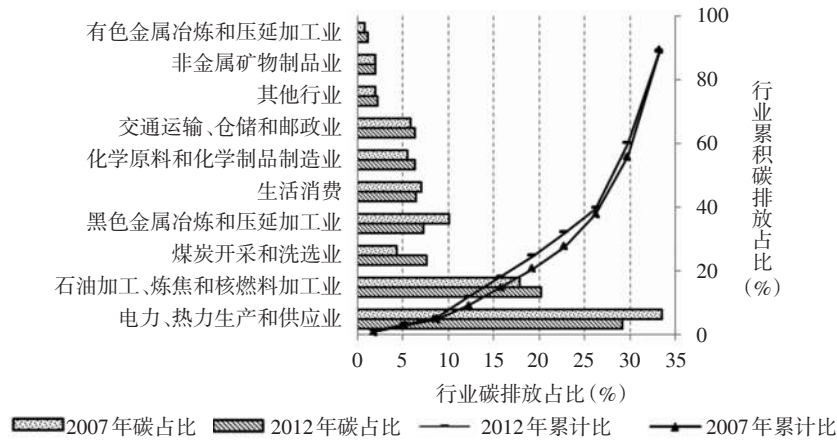


图7 第六层二氧化碳排放前十行业份额对比

吻合度也是最低的,说明2012年本层的行业碳排放占比变化较大,尤其是与煤炭相关的产业,这种现象和我国能源结构改革密切相关。

(二)行业供应链的整体分析

除了对行业供应链的各层面碳足迹的分析和解读之外,对供应链的碳足迹进行整体评估也为我们从全局考察碳排放提供参考。总体分析结果如图8和图9所示。

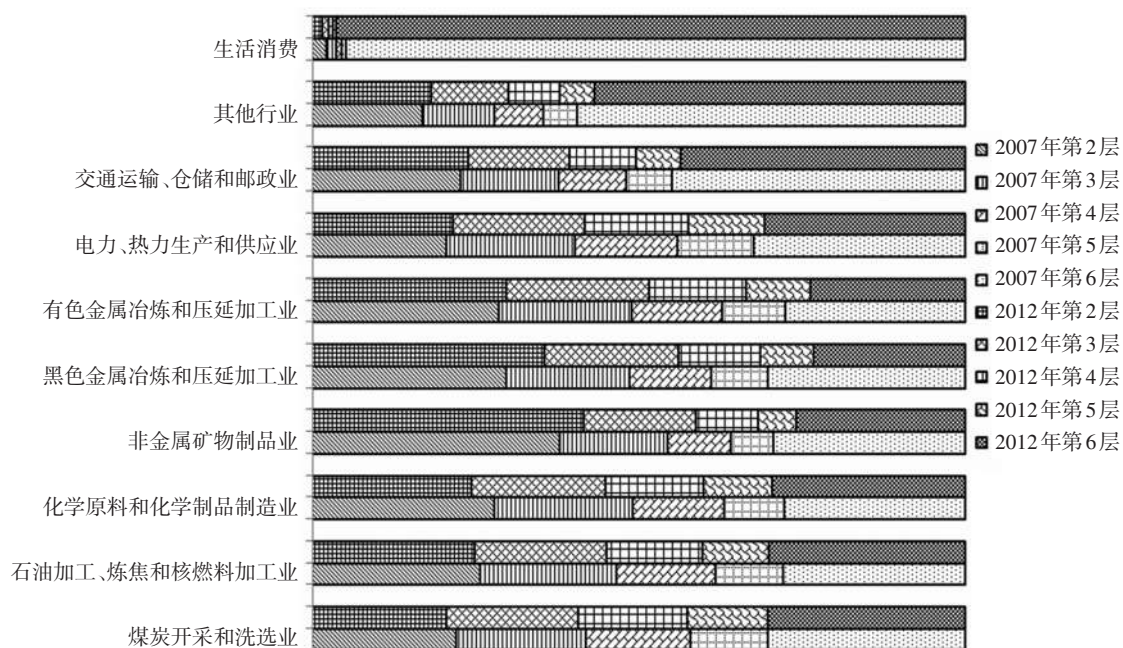
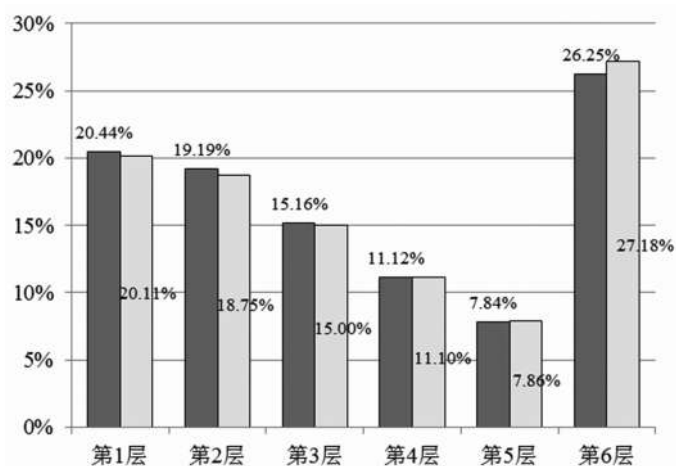


图8 部分行业的供应链在2-6层的碳排放占比

图8展示了碳排放总量排名前十的行业在2007年和2012年供应链层面碳间接排放的百分比份额,可以发现,碳排放占比最高的是第六层,说明第六层行业之间供应链的间接碳排放量最大,且2012年行业碳排放量、碳排放占比相较2007年都有所下降,这反映了我国这五年来节能减排、调整产业结构等政策成效较为显著。生活消费的绝大多数碳排放量都贡献在本层,且2012年排放占比相较2007年上涨1.65%,这与近年城乡发展迅猛以及该行业的生产消费特点密切相关。第二层是行业间接碳排放中的第二大层,在2012年碳排放占比在1.56%~41.55%,其中非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业三个行业在本层的碳排放份额是这五层中最大的,说明这三个行业在供应链第一次间接消耗中产生的二氧化碳量最多。第三、四层碳排放占比较少且均衡,第五层碳排放份额最少,即行业供应链间的生产要素在第二、第三轮间接消耗产生的碳排放量较少且排放比例相近,在第四轮间接消耗产生的碳排放量最少。



注:左边柱子表示2012年数据,右边表示2007年数据。

图9 供应链各层排放占总排放份额

结合各层和所有行业的碳排放总量,得到了行业各层碳排放量占总排放量份额。由图9可知,2007年和2012年前五层碳排放量都是逐层递减的,且两年相比占比幅度变化不大,到第六层有一个显著的提升,且该层碳排放的份额最高,2012年占比26.25%。这表明,第六层碳排放是气候变化的主要来源,这与第六层供应链间的供求要素主要是基础原材料和基础能源物质相关,也是减排的主要关注对象。第一层和第二层也可被认为是碳排放量的次大驱动力,分别拥有20.44%和19.19%的份额,说明行业生产的直接消耗和第一次间接消耗产生的碳排放也不容忽视。此外,可以看出,各行业的直接碳排放量远小于其间接碳排放量,间接排放量占据了总排放量的79.56%。这意味着间接碳排放才是各行业碳排放的主要来源,找出行业间各要素供需环节的碳排放情况,更便于减排政策的有效实施。

五、结论和建议

本文基于投入产出和生命周期评价的层分析框架,将中国行业碳排放分为六层,初始层为行业直接碳排放,其余五层是行业之间供应链间接碳排放。

研究发现,2012年绝大多数的碳足迹的产生是由于电力、热力的生产和供应,石油、炼焦产品和核燃料加工品的制作,黑色金属冶炼和压延加工品的制作,化学原料和化学制品制造,煤炭开采和洗选以及交通运输、仓储和邮政。这些行业在整个行业供应链的结构中占据较为重要的地位,是其他行业生产产品或服务的能源和物质材料基础,与我国的工业经济和民生生活密切相关,是行业六个层面二氧化碳产生的主要驱动力。从间接碳排放量看,排名前十的行业在第六层(其余所有间接排放)和第二层(第一次间接排放)的碳排放量占比最高,第三、四层碳排放占比较少且均衡,第五层碳排放份额最少。从总体碳排放量看(见图9),所有行业的直接碳

排放占比仅为20.44%,间接碳排放79.56%,且行业前四次间接碳排放量是逐层递减的,第五次间接碳排放量最高。因此,对于减排来说,行业间的供应链应承担更大的责任。

由此提出以下政策建议:

第一,引进先进技术,提高电力、热力的生产和供应业以及化学原料和化学制品制造业的节能减排效果。我国主要使用火力发电,耗能高且污染大,开发一种使用天然气等清洁能源的发电机组,是提高火力发电效率和减少碳排放的关键。此外,在化工产业生产中,利用高温高压等技术可对许多能量加以二次到多次利用,进而减少能源的使用和降低碳排放量。如水泥生产的纯低温余热发电,将煅烧窑的高温尾气用于生料烘干和预热分解,低温尾气则用于发电。同时,改进传送技术提高电力和热力的供应效率,可减少传送中的能源浪费。

第二,合理优化交通路线,加大绿色出行的宣传力度,降低交通运输、仓储和邮政行业的碳排放量。近年来,随着城市的扩张、人们收入的提升以及快递物流的迅猛发展,各种交通工具的数量显著增加,汽车尾气和电力消耗都是二氧化碳排放增加的因素。为此,应大力提倡绿色出行,合理规划公共交通路线以减少路线的重复率,继续开发使用节能环保车型,来减少运输行业的碳排放。

第三,支持和鼓励环保能源的开发和使用,优化能源生产结构,以减少石油、炼焦产品和核燃料加工业和煤炭开采和洗选业的产品使用。我国正处于经济建设的快速发展阶段,能源的使用必不可少,但传统能源主要以煤炭石油等燃料为主,污染较为严重,为减少其带来的环境压力,可对其增加适量的污染成本约束以控制发展,同时鼓励风能、势能、太阳能等环保能源的开发使用,为经济欠发展的区域主动引进和发展节能环保的绿色生产技术,促进其区域内高碳排放行业的结构调整。

第四,大力发展低碳行业,促进国民经济稳定发展。对于直接碳排放量和间接碳排放量都较低的行业,如电气机械和器材制造,计算机、通信和其他电子设备制造业,专用设备制造业,纺织服装、服饰业等,积极鼓励其发展并给与相应的政策优待,以保证各行业低碳发展的同时,我国经济仍能稳健上升。

第五,密切关注生活消费行业的碳排放情况,将节能技术引入民生。生活消费行业碳排放总量位居行业第十,且在2012年第六层的碳排放量占其总碳排放的92.48%,这与近年来我国的城镇化进程加快,人们对住房、家电、汽车、医疗、教育等物质文化需求进一步提升密切相关。对此可以提高新建居民住宅的节能技术和使用年限,大力推广高效节能的家电和汽车,推行节能产品惠民政策,加大绿色植被的种植区域,以减缓城乡快速发展阶段的碳排放。

参考文献：

- [1] 曹淑艳, 谢高地. 中国产业部门碳足迹追踪分析[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2046–2052.
- [2] 关军. 建筑业环境影响测算与评价方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [3] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [4] 国家统计局国民经济核算司. 2012年中国投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] 李新运, 吴学猛, 马俏俏. 我国行业碳排放量测算及影响因素的结构分解分析[J]. 统计研究, 2014, 31(1): 56–62.
- [6] 秦昌才, 刘树林. 基于投入产出分析的中国产业完全碳排放研究[J]. 统计与信息论坛, 2013, 28(9): 32–38.
- [7] 唐建荣, 李焯嘯. 基于 EIO-LCA 的隐性碳排放估算及地区差异化研究[J]. 工业技术经济, 2013, 4: 126–135.
- [8] 万宇, 李杨, 侯晓梅. 基于 EIO-LCA 方法的 2007 年与 2012 年中国碳排放结构比较研究[J]. 生态经济, 2017, 33(09): 21–25.
- [9] 吴常艳, 黄贤金, 揣小伟, 徐国良, 於冉, 李丽. 基于 EIO-LCA 的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 43–51.
- [10] 杨顺顺. 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究[J]. 中国工业经济, 2015, (6): 55–67.
- [11] 赵巧芝, 闫庆友. 基于投入产出的中国行业碳排放及减排效果模拟[J]. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1528–1541.
- [12] Blackhurst, B. M., C. Hendrickson, and J. S. I. Vidal. Direct and Indirect Water Withdrawals for US Industrial Sectors[J]. Environmental Science Technology, 2010, 44(6): 2126–2130.
- [13] Chen, G. Q. and B. Zhang. Greenhouse Gas Emissions in China 2007: Inventory and Input-Output Analysis[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 6180–93.
- [14] Duan, C. C., B. Chen, K. S. Feng, Z. Liu, T. Hayat, A. Alsaedi, and B. Ahmad. Interregional Carbon Flows of China[J]. Applied Energy, 2018, 227: 342–352.
- [15] Kucukvar, M., G. Egilmez, N. C. Onat, and H. Samadi. A Global, Scope-based Carbon Footprint Modeling for Effective Carbon Reduction Policies: Lessons from the Turkish Manufacturing[J]. Sustainable Production and Consumption, 2015, 1: 47–66.
- [16] Lenzen, M. Primary Energy and Greenhouse Gases Embodied in Australian Final Consumption: An Input-output Analysis[J]. Energy Policy, 1998, 26(6): 495–506.
- [17] Leontief, W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-output Approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3): 262–271.
- [18] Matthews, H. S., C. T. Hendrickson, and C. L. Weber. The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42: 5839–5842.
- [19] Miller, R. E. and P. D. Blair. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions[M]. London: Cambridge University Press, 2009.
- [20] Mongelli, I., G. Tassielli, and B. Notarnicola. Global Warming Agreements, International Trade and Energy/Carbon Embodiments: An Input-output Approach to the Italian Case[J]. Energy Policy, 2006, 35(1): 88–100.
- [21] Onat, N. C., M. Kucukvar, and O. Tatari. Integrating Triple Bottom Line Input-output Analysis into Life Cycle Sustainability Assessment Framework: The Case for US Buildings[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(8): 1488–1505.
- [22] Sanchez-Choliz, J. and R. Duarte. CO₂ Emissions Embodied in International Trade: Evidence for Spain[J].

Energy Policy, 2004, 32(18): 1999–2005.

[23] Wang, J. M., R. G. Wang, Y. C. Zhu, and J. Y. Li. Life Cycle Assessment and Environmental Cost Accounting of Coal-fired Power Generation in China[J]. Energy Policy, 2018, 115: 374–384.

[24] Wang, C., J. Y. Zhan, Z. H. Li, F. Zhang, and Y. Zhang. Structural Decomposition Analysis of Carbon Emissions from Residential Consumption in the Beijing–Tianjin–Hebei Region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1357–1364.

[25] Weber, C. L. and H. S. Matthews. Quantifying the Global and Distributional Aspects of American Household Carbon Footprint[J]. Ecological Economics, 2008, 66(23): 379–91.

[26] Xing, Z. C., J. G. Wang, and J. Zhang. Expansion of Environmental Impact Assessment for Eco-efficiency Evaluation of China's Economic Sectors: An Economic Input–output Based Frontier Approach[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 284–293.

[27] Yabe, N. An Analysis of CO₂ Emissions of Japanese Industries During the Period Between 1985 and 1995 [J]. Energy Policy, 2004, 32(5): 595–610.

[28] Zhang, B., X. Qu, J. Meng, and X. D. Sun. Identifying Primary Energy Requirements in Structural Path Analysis: A Case Study of China 2012[J]. Applied Energy, 2017, 191: 425–435.

Source Decomposition Analysis of Carbon Footprint in China's Industry Supply Chain: Based on IO-LCA Model

Tian Chengshi and Zhang Shiya

(Dongbei University of Finance and Economics, Department of Statistics)

Abstract: It is crucial to measure and assess carbon emission of industry supply chain for making scientific and effective carbon emission reduction policy in China. this paper establishes an IO-LCA model based on the life cycle assessment method for carbon emissions from supply chains in various industries in China, and decomposes the carbon footprint of the industry supply chain into six levels and calculates the carbon emissions at each level. Then a detailed analysis was made of the carbon emissions in the various industries, the top industry in total carbon emissions, and the share of total emissions in all levels of emissions. Research shows that the vast majority of carbon footprints are generated by the production and supply of electricity and heat, and petroleum, coke products, and nuclear fuel processing. The indirect carbon emissions generated by production and consumption in the supply chain of the industry are significantly higher than the direct carbon emissions produced by the industry, and the sixth floor has the largest indirect carbon emissions. The carbon emission of living consumption ranks the tenth in the industry. Its carbon emission is not obvious in the first five floors, and is the largest in the sixth floor. It is closely related to the improvement of living consumption of urban and rural residents. In this regard, this paper proposes to optimize the energy structure, use the energy generated in industrial production for multiple uses, research and develop energy-efficient buildings and automobiles, and vigorously develop low-carbon industries and other policy recommendations.

Keywords: Carbon Footprint; Carbon Emissions; Industry Supply Chain; Life Cycle Assessment; Layer Analysis

JEL Classification: C67, Q56

(责任编辑 朱静静)