



低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析

齐绍洲 付 坤

摘 要:我国各省市自治区经济结构和能源消费结构差异大,且适合于核算碳排放量的基础数据有限。因此,为了准确核算省级区域能源消费碳排放量,必须研究适合省级层面的碳排放核算方法。湖北省作为全国的低碳试点省和碳交易试点省,其省级碳排放核算方法具有一定的代表性。

关键词:能源消费;碳排放量;二次能源;排放因子

近年来,应对气候变化和向低碳经济转型日益受到我国政府的高度重视,2007年国务院颁布了《中国应对气候变化国家方案》,2009年11月国务院公布了我国温室气体减排目标即到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降40%~45%。2011年12月,在国务院发布的《“十二五”控制温室气体排放工作方案》中,确定了2015年全国单位国内生产总值二氧化碳排放比2010年下降17%的目标,并将这个目标分解成“十二五”各省市自治区单位国内生产总值二氧化碳排放下降指标。

编制碳排放清单是应对气候变化、向低碳经济转型以及建立碳交易市场的一项基础性工作,因此2008年我国启动了2005年国家温室气体清单的编制工作,并于2010年启动了7个试点省份编制温室气体排放清单工作,2011年批准了在北京、天津市、上海市、重庆市、深圳市、湖北省及广东省启动碳排放权交易试点工作。然而,我国各省市自治区经济结构和能源消费结构差异大,且适合于核算碳排放量的基础数据有限。因此,为了准确核算省级区域能源消费碳排放量,必须研究适合省级层面的碳排放核算方法。本文从能源消费角度,在理论上比较了不同碳排放核算方法,分析了现有文献中核算方法的不足,提出新的二次能源(电力和热力)碳排放核算方法,并对2006年—2010年湖北省能源消费碳排放量进行了核算分析。

一、碳排放基本核算方法

目前,关于碳排放核算方法可分为:系统核算法和非系统核算法。其中,系统核算法主要包括生命周期法和模型法;非系统核算法主要包括实测法、物料平衡法和清单法。

(一) 生命周期法

生命周期法基本思路是在对某一活动碳排放分析时,不仅要评价活动本身或投入物料直接产生的排放问题,而且还要考虑与活动或所有物料相关的伴随效应。因此,该方法研究的是产品从生产、消费至最终废弃物处理的全碳排放链,对每个环节进行碳排放的定

性和定量分析。目前,主要应用在建筑^①、煤电^②、出口贸易^③等领域。

(二) 模型法

模型估算方法分为宏观模型法和生态模型法两种。

宏观模型法主要包括 MARKAL 模型^④、LEAP 模型^⑤、Logistic 模型和系统动力学模型^⑥,这些模型主要应用于对未来碳排放量的预测。

生态模型法认为,人类从事的生产和生活活动、气候、区域等因素会共同的影响森林和土壤的碳排放。因此,该方法主要通过环境生态模型来模拟森林和土壤系统的碳排放过程。主要代表模型:PRO-COMAP 模型、CO₂FIX 模型、CENTURY 模型和 ROTH 模型^⑦。但是,由于很多环境生态过程难以通过设置参数方式进行模拟,所以基于生态模型碳排放核算方法的计算结果值得怀疑^⑧。

(三) 实测法

实测法主要通过监测手段或国家有关部门认定的连续计量设施,测量排放气体的流速、流量和浓度,用主管部门认可的测量数据来计算气体的排放总量。实测法进一步可分为抽样分析法和在线实时监测法。其中,抽样分析法需要样本具备代表性,否则计算的数据缺乏真实性;而在线实时监测法理论上可以准确计算碳排放量,并保证数据的客观性,但我国目前尚未建立起国家(区域)碳排放量核算体系,无法为在线实时监测法提供必要的技术支持。

(四) 物料平衡法

物料平衡法基本原理是质量守恒定律,即输入系统的物料质量必定等于该系统输出物料的质量。该方法是把工业排放源的碳排放量、生产工艺和资源(原材料、能源)的综合利用结合起来,系统地、全面地研究生产过程中碳排放的一种科学有效的计算方法。物料平衡法既适用于整个生产过程,也适合于局部生产过程。目前,该方法可以应用于那些将化石能源既作为燃料又作为生产原料的行业。比如,化工行业,钢铁行业。该方法最大劣势在于需要搜集详细的工业生产过程数据,仅适合数据基础较好的行业(企业)采用。

(五) 清单法

清单法是按照 IPCC 国家温室气体清单指南的要求编制温室气体清单。报告范围包括:能源活动、工业过程和产品使用、农业、林业和其他土地利用、废弃物等。碳排放主要来源于能源消费活动,而能源部分的碳排放产生主要是由于富含碳的化石燃料燃烧,因此碳排放可以根据燃料的数量和不同燃料的排放因子确定。对于燃烧产生的二氧化碳,燃烧条件(燃烧效率、在矿渣和炉灰等物中的碳残留)相对不重要。因此,排放因子主要取决于燃料的碳含量。计算公式如下:

$$\text{能源消费碳排放量} = (\text{燃料消费量(热量单位)} \times \text{单位热值燃料含碳量}) \times \text{燃料燃烧过程中的碳氧化率} \quad (1)$$

清单法与其他方法比较优势在于碳排放核算所需的基础数据要求不高,一般使用国家统计局年鉴、能源统计年鉴和省市自治区统计年鉴中的数据就可以对国家和区域的能源消费碳排放进行核算,因此国

①张智慧、尚春静、钱 坤:《建筑生命周期碳排放评价》,载《建筑经济》2010年第2期,第44~46页。

②夏德建、任玉珑、史乐峰:《中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量》,载《统计研究》2010年第8期,第82~89页。

③G Machado, R Schaeffer, E Worrell, "Energy and Carbon Embodied in the International Trade of Brazil: An Input-Output Approach", *Ecological Economics* 2001, 39(3), pp. 409~424.

④陈文颖、吴宗鑫:《未来中国的 SO₂ 和 CO₂ 排放控制对策》,载《清华大学学报(自然科学版)》2002年第10期,第1320~1323页。

⑤王 克、王 灿、吕学都、陈吉宁:《基于 LEAP 的中国钢铁行业 CO₂ 减排潜力分析》,载《清华大学学报(自然科学版)》2006年第12期,第1982~1986页。

⑥秦 钟、章家恩、骆世明、叶延琼:《我国能源消费与 CO₂ 排放的系统动力学预测》,载《中国生态农业学报》2008年第4期,第1043~1047页。

⑦N. H. Ravindranath, M. Ostwald, *Carbon Inventory Methods*, Berlin: Springer 2007, pp. 201~214.

⑧D. D. Baldocchi, K. B. Wilson, "Modeling CO₂ and Water Vapor Exchange of a Temperate Broadleaved Forest Across Hourly to Decadal Time Scales", *Ecological Modeling* 2001, 142(1-2), pp. 155~184.

内许多学者将我国碳排放量的研究主要集中在基于能源消费的碳排放上^{①②③}。本文采用清单方法对省级层面能源消耗碳排放情况进行核算。

二、省级能源消费碳排放核算基础数据选取

(一) 能源消费数据的选取

我国省级层面能源消费数据统计主要来源于各省市自治区统计年鉴和《中国能源统计年鉴》。其中,各省市自治区统计年鉴一般会提供全社会综合能源平衡表,但由于该表中的数据均以吨标准煤为单位,而各省市自治区存在显著的能源消费结构差异,这必然使得标煤的碳排放系数无法统一,最终导致碳排放核算结果误差较大。《中国能源统计年鉴》提供了分地区的能源平衡表(实物量),地区能源平衡表中提供了能源加工转换投入产出量数据、损失量数据和终端消费量数据,基于这些数据可以建立地区能源消费流程图,并最终确定用于计算碳排放的能源消费数据。能源消费流程图见图 1:

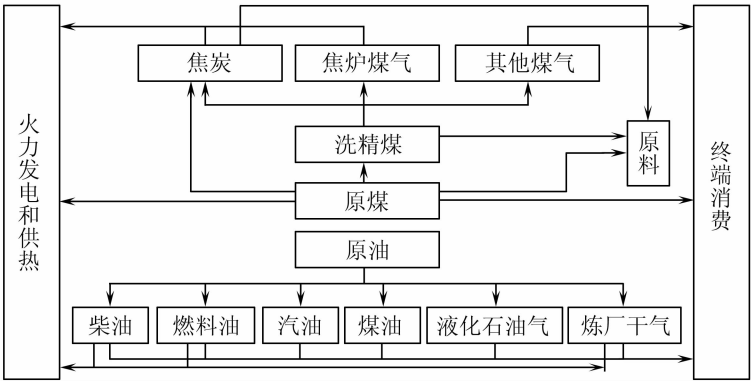


图 1 能源消费流程图

注:图 1 中剪头表示能源品种流动方向。

由能源消费流程图可知,化石能源进行火力发电与供热产生了碳排放,其消费量应该计入能源消费碳排放核算中;而在终端消费量中用作工业原料、材料的能源消费由于未直接燃烧产生碳排放,其消费量应在核算碳排放时予以扣除。

(二) 能源碳排放因子的选取

1. 化石能源排放因子

目前,国内研究者大多直接采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中推荐的因子,但该因子主要存在以下三个问题:第一,IPCC 化石能源品种分类和我国能源品种分类不完全一致;第二,IPCC 提供的化石能源品种单位燃料含碳量和低位热值不符合我国实际情况;第三,IPCC 默认所有化石能源完全燃烧即氧化率为 100%,这也和实际不符。以上三个问题叠加在一起会对我国化石能源品种的实际排放因子产生较大影响,因此需要选取符合我国实际化石能源品种的单位燃料含碳量、燃烧氧化率和低位热值。国家发改委在 2011 年 5 月制定了《省级温室气体清单编制指南(试行)》,在指南中提供了基于我国化石能源品种实际的参数值。本研究中各化石能源品种单位燃料含碳量和燃烧氧化率均选取《省级温室气体清单编制指南(试行)》中的相关数据,化石能源的低位热值取自《中国能源统计年鉴》。具体化石能源品种排放相关参数如下表 1。

2. 二次能源(热力和电力)排放因子

热力和电力是两种重要的二次能源,热力和电力消费的碳排放核算方法不尽相同。由于热力在生产阶段就核算了碳排放,热力消费的碳排放一般不予核算,而对于电力消费碳排放处理方法主要分为两

①陈诗一:《能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展》,载《经济研究》2009 年第 1 期,第 41~55 页。
②郭彩霞、邵超峰、鞠美庭:《天津市工业能源消费碳排放量核算及影响因素分解》,载《环境科学研究》2012 年第 2 期,第 232~239 页。
③张雷、黄园浙、李艳梅、程晓凌:《中国碳排放区域格局变化与减排途径分析》,载《资源科学》2010 年第 2 期,第 211~217 页。

种:第一种,由于电力的碳排放已经在电力部门发电时核算过一次,为了避免重复计算,将电力消费视作零排放;第二种,电力碳排放因子直接参考国家发展和改革委员会应对气候变化司定期公布的每年中国区域电网基准线排放因子。这两种电力消费的碳排放核算方法都存在明显的不合理之处:一方面,若将电力消费视作零排放,将无法直接核算电力消费端的碳排放,不利于整体上控制温室气体排放;另一方面,国家发改委公布的中国区域电网基准线排放因子是为中国清洁发展机制重点领域的 CDM 项目而计算出来的,将其直接用于区域层面、行业层面和企业层面的碳排放核算是不准确的。本研究提出可根据二次能源(电力和热力)当量值^①(Energy Calorific Value)和等价值^②(Energy Equivalent Value),将二次能源(电力和热力)生产过程中的碳排放放在生产端和消费端之间进行分担,这样既避免了碳排放的重复计算,又核算了二次能源(电力和热力)消费的碳排放,充分体现出二次能源生产端和消费端“共同但有区别的责任”原则。

表 1 能源品种排放相关参数

能源类别	单位热值含碳量 (kgC/GJ)	碳氧化率 (%)	低位热值 (kcal/kg 或 kcal/m ³)	排放因子 (kgCO ₂ /kg 或 kgCO ₂ /m ³)
原煤	26.4	94	5000	1.9027
洗精煤	25.4	93	6300	2.2855
其他洗煤	25.4	93	2497	0.9059
型煤	33.6	90	4200	1.9498
焦炭	29.5	93	6800	2.8640
其他焦化产品	29.5	93	9100*	3.8327
焦炉煤气	12.1	99	4145	0.7623
高炉煤气	70.8	99	900	0.9684
其他煤气	12.1	99	4830	0.8882
天然气	15.3	99	9310	2.1649
原油	20.1	98	10000	3.0240
汽油	18.9	98	10300	2.9827
煤油	19.6	98	10300	3.0372
柴油	20.2	98	10200	3.0998
燃料油	21.1	98	10000	3.1744
液化石油气	17.2	98	12000	3.1052
炼厂干气	18.2	98	11000	3.0119
其他石油品	20.0	98	8400	2.5275

数据来源:《省级温室气体清单编制指南》、《2006 年 IPCC 国家温室气体排放清单指南》和《中国能源统计年鉴》; * 表示其他焦化产品低位热值来源于《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南》(世界资源研究所)。

二次能源(电力或热力)的排放因子计算过程如下:

$$EEV_y = \frac{\sum_i (FC_{i,y} \times R_i)}{EG_y}$$

(2)

$$K_y = \frac{EEV_y - ECV}{EEV_y}$$

(3)

$$EF_y = \frac{\sum_i (FC_{i,y} \times EF_{CO_2,i})}{EC_y}$$

(4)

式中:

- EEV_y 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)的等价值(kgce/kW·h 或 kgce/MJ);
- ECV 是二次能源(电力或热力)的当量值(kgce/kW·h 或 kgce/MJ);
- FC_{i,y} 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)生产中燃料 i 的消耗量(kg 或 m³);
- R_i 是燃料 i 的折算标准煤系数(kgce/kg 或 kgce/m³);
- EG_y 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)生产量(10⁸ kW·h 或 10¹⁰ kJ));

① 当量值又称理论热值(或实际发热值),是指某种能源本身所含热量,按热量的多少可以折算成标煤。

② 等价值是指为了得到一个单位的二次能源(或载热工质)实际需要一次能源的消耗量。

K_y 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)生产端承担比率;

EF_y 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)碳排放因子($\text{tCO}_2/10^4\text{kW}\cdot\text{h}$ 或 $\text{tCO}_2/10^6\text{kJ}$);

EF_{CO_2} 是燃料 i 的碳排放因子(kgCO_2/kg , 或 kgCO_2/m^3);

EC_y 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)消费量($10^8\text{kW}\cdot\text{h}$ 或 10^{10}kJ);

i 是第 y 年省级区域二次能源(电力或热力)生产中消耗的化石燃料种类。

我国在《中国能源统计年鉴》中公布了电力和热力当量值,具体值如下表 2。

表 2 电力和热力当量值

电力当量值(ECV)(kgce/kW·h)	热力当量值(ECV)(kgce/MJ)
0.1229	0.0341

数据来源:《中国能源统计年鉴》(2006—2011)

三、湖北省能源消费碳排放核算

湖北省作为全国的低碳试点省和碳交易试点省,其省级碳排放核算方法具有一定的代表性。下面,我们以湖北省为例,来考察如何应用上面的核算方法。湖北省能源消费数据来源《中国能源统计年鉴》(2007—2011)中湖北省能源平衡表(实物量)。

(一) 湖北省二次能源(电力和热力)碳排放因子

根据公式(2),湖北省电力和热力的等价值计算结果如表 3。

表 3 湖北省电力和热力等价值

年份	电力等价值(kgce/kW·h)	热力等价值(kgce/MJ)
2006	0.4092	0.0525
2007	0.3889	0.0542
2008	0.3885	0.0617
2009	0.3417	0.0692
2010	0.3535	0.0761

根据公式(3),湖北省电力和热力生产过程中碳排放生产端的承担比率计算结果如表 4。

表 4 湖北省电力和热力生产过程中碳排放生产端的承担比率

年份	电力生产端的承担比率	热力生产端的承担比率
2006	0.6996	0.3505
2007	0.6840	0.3704
2008	0.6837	0.4468
2009	0.6404	0.5066
2010	0.6523	0.5517

根据公式(4),湖北省电力和热力消费的碳排放因子计算结果如表 5。

表 5 湖北省电力和热力消费的碳排放因子

年份	电力排放因子 ($\text{tCO}_2/10^4\text{kW}\cdot\text{h}$)	热力排放因子 ($\text{tCO}_2/10^6\text{kJ}$)
2006	2.0698	0.0694
2007	2.1128	0.0695
2008	1.6559	0.0703
2009	1.7043	0.0672
2010	1.9911	0.0674

比较国家发改委公布的中国区域电网基准线排放因子与表 5 中电力排放因子可知,若采用前者核算电力消费碳排放量必然导致严重的重复计算问题。具体电力排放因子的比较结果^①见表 6。

^①国家发改委公布的电力排放因子是按照我国区域电网来划分的,而湖北省电网属于华中电网,因此表 6 中是将华中电网排放因子和本文表 5 中计算的电力排放因子进行比较。

表 6 电力排放因子比较

年份	湖北电网基准线排放因子 (tCO ₂ /10 ⁴ kW · h)	排放因子绝对差* (tCO ₂ /10 ⁴ kW · h)	排放因子相对差**
2006	12.899	10.8292	83.95%
2007	12.783	10.6702	83.47%
2008	11.255	9.5991	85.29%
2009	10.871	9.1667	84.32%
2010	10.297	8.3059	80.66%

注：* 为湖北电网基准线排放因子减去表 5 计算电力排放因子；** 为排放因子绝对差除以湖北电网基准线排放因子。

(二) 湖北省能源消费碳排放量

1. 总体碳排放情况

根据能源消费核算 2006—2010 年的湖北省总体 CO₂ 排放, 总体绝对排放量呈上升趋势, 年复合增长率为 10.15%, 增长率总体呈现 U 型, 2008 年增长率最低为 4.25%。碳生产率年复合增长率为 7.32%。详见图 2。

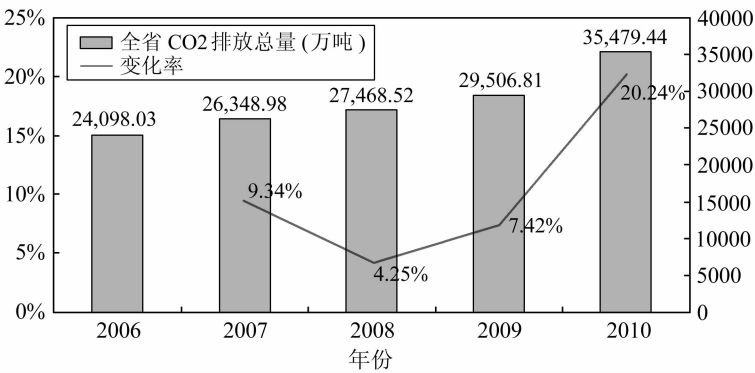


图 2 湖北省 2006-2010 年碳排放总量与排放变化率

2. 湖北省分部门碳排放分析

从细分部门来看, 湖北省整体可分为农林牧渔业、工业、建筑业、交通运输仓储邮政业、批发零售住宿餐饮业、生活和其他等 7 大部门, 此外也将能源生产与加工转换(火电和供热)视作 1 个部门核算其碳排放量。湖北省 2006—2010 年分部门碳排放情况详见表 7。

表 7 湖北省 2006—2010 年分部门碳排放量(单位:万吨)

年份		2006	2007	2008	2009	2010
能源生产与加工转换(火电和供热)		4593.5139	4943.5183	4325.2718	4096.2810	5934.9326
终端消费	农林牧渔	689.3376	716.4729	740.3366	809.1301	793.6994
	工业	14347.1283	15379.0646	16189.4995	17618.2675	20493.1288
	建筑业	324.8870	380.3469	382.0983	465.7347	608.1968
	交通运输、仓储邮政	2066.5743	2264.7501	2664.3923	2546.0469	2716.2530
	批发、零售、住宿、餐饮	397.7353	510.6954	751.0879	1354.7054	1889.1415
	生活	1545.5644	1776.2260	2036.3732	2146.1085	2408.6623
	其他	133.2913	377.9049	379.4619	470.5354	635.4225

数据来源:根据《中国能源统计年鉴》(2007-2011)整理计算。

从 2006—2010 年湖北省分部门终端能源消费的碳排放情况可以看出, 工业部门的碳排放量最大, 但占比始终在 60% 以下, 且保持比率逐年下降趋势; 其次是能源生产与加工转换(火电与供热)的排放量占 15% 左右; 而交通运输、仓储与邮政业和生活消费, 比重均稳定在 7%—10% 之间; 农林牧渔业所占的份额仅为 2.5% 左右, 具体变化趋势如图 3。

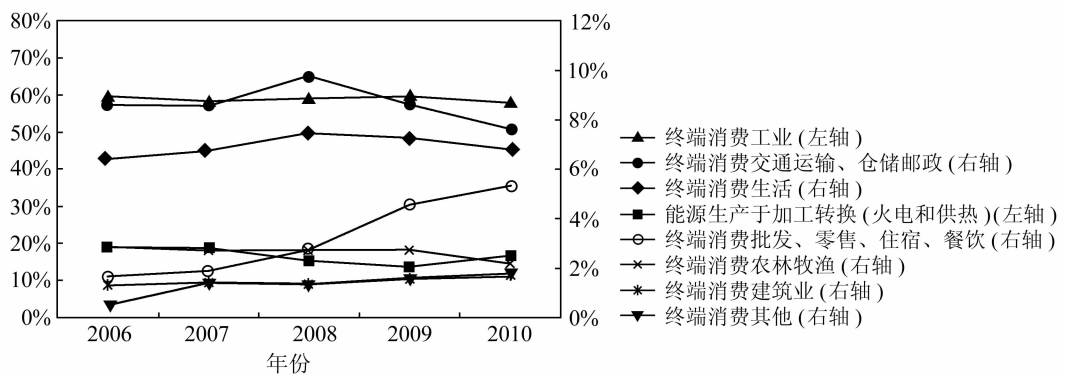


图 3 2006—2010 湖北省分部门碳排放占比趋势图

3. 湖北省工业分行业碳排放分析^①

根据行业分类,工业又可进一步分为 39 个二位数行业,其中排放前十的工业行业碳排放总和占全湖北省规模以上工业行业排放总量的 90% 以上^②,占全省能源消费碳排放量 40% 以上。本研究对 39 个工业行业的碳排放情况进行了核算,2006—2010 年湖北省前十个工业行业的碳排放^③具体情况见图 4 至图 8。

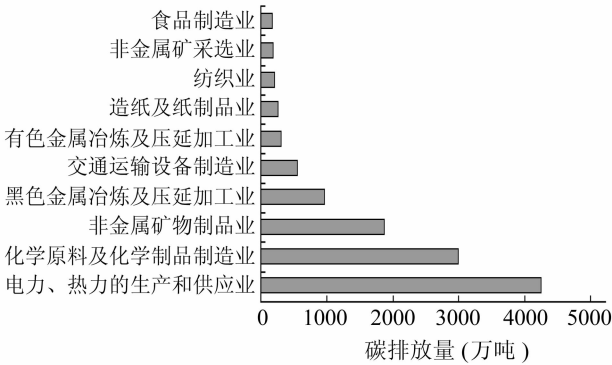


图 4 2006 年湖北省碳排放量前十位工业行业

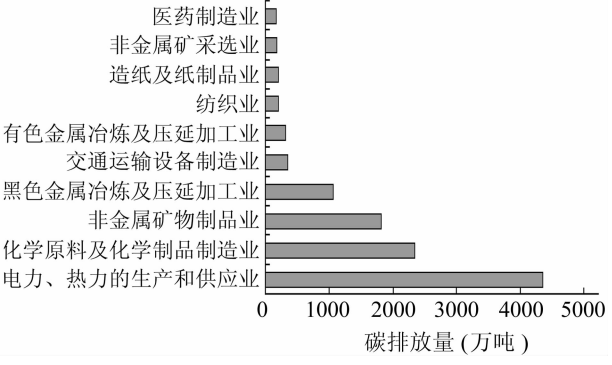


图 5 2007 年湖北省碳排放量前十位工业行业

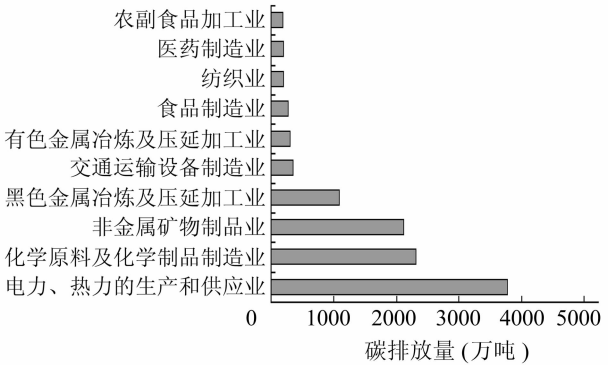


图 6 2008 年湖北省碳排放量前十位工业行业

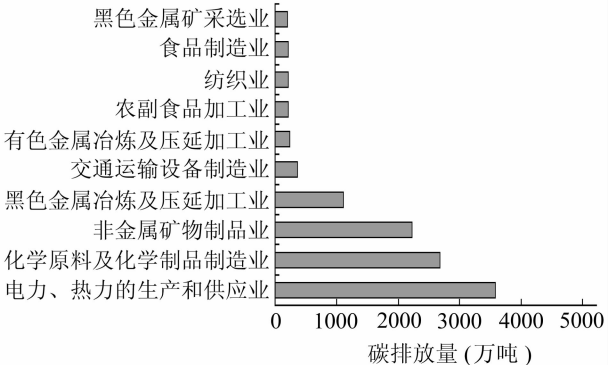


图 7 2009 年湖北省碳排放量前十位工业行业

①湖北省工业分行业碳排放分析基础数据来源于《湖北省统计年鉴 2011》。
②由于《湖北省统计年鉴》(2007—2011)中,工业行业能耗数据仅统计了规模以上工业分行业的数据,因此这里实际上分析的是湖北省规模以上工业行业二氧化碳排放情况。
③由于《湖北省统计年鉴 2011》分行业能源消费统计,仅包含原煤,汽油,柴油和电力等四种能源消费数据,因此图 4 至图 8 湖北省工业行业碳排放核算是基于原煤,汽油,柴油和电力数据。

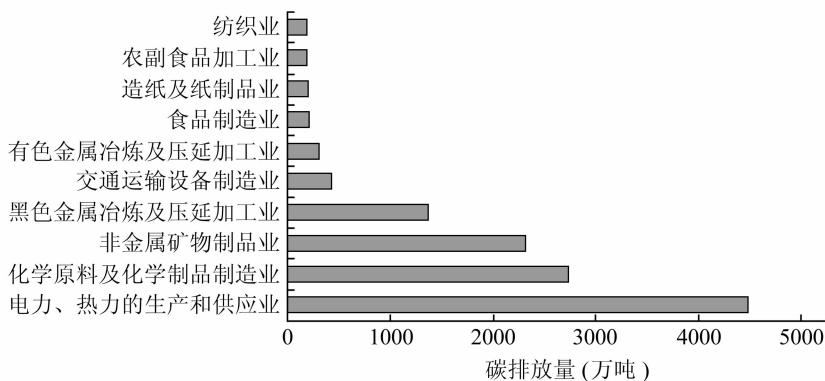


图8 2010年湖北省碳排放量前十位工业行业

从图4—图8可以看出,湖北省工业行业中,2006—2010年碳排放量前六位行业是一致的,分别是:电力、热力的生产和供应业、化学原料及化学制品制造业、非金属矿物制品、黑色金属冶炼及压延加工业、交通运输设备制造业和有色金属冶炼及压延加工业。这六个工业行业的碳排放量占全省规模以上工业排放的80%以上,占全省能源消费碳排放量37%以上。

四、结 论

本研究比较了不同的碳排放核算方法,并结合我国现有的统计体系,对省级层面能源消费碳排放核算得出以下几点结论:

第一,基础数据的质量直接决定了碳排放核算的准确程度。为了避免化石能源碳排放的重复计算,省级层面能源消费数据应采用《中国能源统计年鉴》中地区能源平衡表(实物量)的数据,同时须选取符合我国化石能源品种实际情况的碳排放参数,包括单位热值含碳量、碳氧化率和低位热值。

第二,由于我国电力市场是受政府管制的,发电企业不能够将原料成本直接转嫁给下游消费端,因此电力生产端和消费端应该共同承担电力生产过程中的碳排放,而电力生产端和消费端各自的碳排放承担比率可以根据不同省市自治区的电力的等价值和当量值来确定,进而计算出电力的排放因子。需要指出的是本文根据此方法计算出来的湖北省电力碳排放因子仅仅只有国家发改委公布的相应数据的1/5左右,所以直接采用后者来核算省级层面能源消费碳排放会出现严重的重复计算问题。

本文在省级层面核算碳排放情况时存在几点不足之处:第一,本文仅从能源消费角度核算,而根据IPCC国家温室气体清单的编制要求,全面评估碳排放情况应当包括能源活动、工业生产过程(建材产品、化工产品、金属产品)、农业、土地利用变化和林业与废弃物五个方面;第二,本文在计算省级层面电力排放因子时,未考虑我国各区域电网之间的调入和调出情况,这必将使基于本文提出的方法计算出的电力排放因子不确定性增加。我们将对上述问题进行进一步的研究,并把此方法进一步应用到全国各省区的碳排放计算中去,从而可以更好地根据各个省区的实际情况,制定出更加符合各地区实际的低碳经济转型政策,并为建立全国性的碳交易市场提供基础数据参考。

■作者简介:齐绍洲,武汉大学经济与管理学院教授、博士生导师;湖北 武汉 430072。

付 坤,武汉大学经济与管理学院博士生。

■基金项目:教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(10JZD0018)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0646)

■责任编辑:刘金波