

基于EIO-LCA模型的中国1992—2012年 碳排放结构特征研究

许红周 计军平[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

[†] 通信作者, E-mail: jackyji@pku.edu.cn

摘要 构建非竞争型投入产出表, 计算1992—2012年中国碳排放数据, 利用EIO-LCA方法对排放结构特征进行分析。结果表明: 我国碳排放总体上呈快速上升趋势。从部门结构来看, 隐含排放量最多的为建筑业。从类型结构来看, 1992—2012年我国碳排放增长的主要原因在于投资活动、出口及城镇居民消费规模的大幅增长。投资活动占最终需求总增量的55.83%, 其隐含排放主要在部门28(建筑业)。出口占最终需求总增量的24.38%, 其隐含排放主要集中在制造业, 我国出口隐含碳排放总体上较高。城镇居民消费占最终需求总增量的14.99%, 其隐含排放主要集中在部门25(电力、热力的生产和供应业)。1992—2012年间, 部门28, 17(通用、专用设备制造业)和35(其他服务业)的增幅最明显, 三者共占总增量的60.45%; 部门22(其他制造业), 2(煤炭开采和洗选业), 5(非金属矿采选业), 3(石油和天然气开采业)和8(纺织业)的碳排放保持下降趋势。

关键词 环境投入产出分析; 碳排放; 直接排放; 隐含排放

Carbon Emissions by Chinese Economy in 1992–2012: An Assessment Based on EIO-LCA Model

XU Hongzhou, JI Junping[†]

Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; [†] Corresponding author, E-mail: jackyji@pku.edu.cn

Abstract This paper constructs a non-competition input-output table, calculates the carbon emission data in China from 1992 to 2012, and analyzes the structural characteristics of its emissions using the EIO-LCA method. The results show that, in general, China's carbon emission shows a fast rising trend. From the view of department structure, in 1992–2012, the main reason for the growth of carbon emissions in China was the large increase in investment activities, exports and the consumption of urban residents. Investment activities accounted for 55.83% of the total increment of the final demand, and the embodied emissions were mainly in the sector 28 (Construction). Exports accounted for 24.38% of the total final demand. The embodied emissions were mainly concentrated in the manufacturing industry. In general, China's exports contain higher carbon emissions. The consumption of urban residents accounted for 14.99% of the total increment of the final demand. The embodied emissions were mainly concentrated in sector 25 (Production and distribution of electric power and heat power). In 1992–2012, the growth rate of sector 28, 17 (Manufacture of general and special purpose machinery) and 35 (Other services) was the most obvious, and the three accounted for 60.45% of the total increment. In addition, the carbon emissions of sector 22 (Other manufacturing), 2 (Mining and washing of coal), 5 (Mining and processing of nonmetal ores), 3 (Extraction of petroleum and natural gas) and 8 (Manufacture of textiles) maintained a downward trend.

Key words EIO-LCA; carbon emissions; direct emission; embodied emission

过去40年间,随着中国经济的快速增长,碳排放总量迅速增加。2016年,中国碳排放总量已达9123.00 Mt CO₂-eq, 占世界总量的27.3%, 比2015年下降0.7%^[1]。我国计划在2030年前后达到二氧化碳排放峰值, 并努力尽早达峰^[2]。研究我国碳排放增长的结构特征, 对我国制定科学的减排对策、尽早实现碳排放峰值具有重要意义。

中国快速增长的二氧化碳排放引起许多学者的研究兴趣。一些研究侧重对中国的碳排放清单进行精确计算^[3-6]; 另一些研究则侧重对碳排放总量进行分解, 试图找到碳排放快速增长的原因。其中, 有部分学者采用主成分分析(PCA)或其改进型(SPCA, CDPKA)方法对碳排放量进行分解分析^[7-8]。但是, 采用主成分分析会将部门整合, 生成的主成分大多没有对应的部门分类, 结果缺乏现实意义, 因此这类方法已较少采用。

碳排放量计算主要采用IPCC清单法^[9]。由于IPCC的测算基于地理维度, 而一国的经济活动往往与地理范围不一致(如GDP), 且IPCC的测算以生产为基准, 忽视消费引发的隐含碳排放, 从而导致碳泄漏的问题^[10], 因此越来越多的学者开始关注基于消费端的隐含排放^[11-13]。由于IOT(投入产出表)能较好地表现各部门生产的相互关联^[14], 在此基础上的EIO(经济投入产出方法)能够更好地探究部门的隐含排放^[15-16], 因此目前常采用EIO法计算分析隐含碳排放。

EIO法由Leontief^[17]首先提出, 作为一个较为成熟的研究方法, EIO在许多温室气体的研究中被采用^[18-22]。通过对投入产出方法加以改进, EIO可以更好地测算各个部门的隐含排放^[17], 因此大量文献采用该方法对世界各国的碳排放进行分析。根据研究范围的不同, 主要分为SRIO和MRIO两种。SRIO只对单一国家或地区的各部门碳排放进行分析^[20,23-24], MRIO则侧重于不同国家或同一国家不同地区之间碳排放的相互影响^[25-27]。两种方法在本质上差异不大, 只是由于MRIO以多地区的投入产出表为基础, 因此对数据的要求更高, 使用条件苛刻。

许多学者采用EIO研究中国各年份碳排放数据。在国家层面, 分别以中国1992—2002年^[28]、1992—2007年^[29]、2007年^[30]以及2007—2012年^[31]的投入产出表为基础, 对中国碳排放量进行分析。在国际贸易层面, Pan等^[32]采用中国2001—2006年

投入产出表, Yan等^[33]采用1997—2007年投入产出表, Zhang等^[27]采用41个国家35个部门1995—2007年数据, 对中国在国际贸易中的碳排放进行研究。也有学者对中国国内各区域间的碳排放关系进行研究^[34-35]。

尽管EIO能够计算各部门的隐含排放量, 但是不能说明隐含排放在生产链各部门中的分布情况。Hendrickson等^[36]提出的经济投入产出生命周期分析方法(EIO-LCA)可以很好地解决这个问题^[37], 目前已有大量学者运用该方法对环境问题进行研究^[30-31,38-41]。其中, 有学者分别从国家层面^[30-31]和省级层面^[40-41]对碳排放在生产链中各部门的分布进行分析。

对中国2005年^[7,33]和2007年^[4,30,42]的温室气体清单已有深入研究, 但仅基于单个年份的排放因素分解, 未研究多年间的动态变化。本文根据中国1992, 1997, 2002, 2007和2012年能源平衡表和投入产出表, 制定这5个年度的详细碳排放清单, 并分别从生产端和消费端对碳排放数据进行分析, 探讨20年间中国碳排放的结构特征。

1 方法与数据

1.1 EIO-LCA 分析法

EIO-LCA方法由EIO方法改进而来, 两者的不同之处在于排放系数矩阵。在传统的环境投入产出法中, 某种污染物的排放系数是一个行向量, 而在EIO-LCA中, 这个系数是一个对角矩阵^[30], 这一变化可将由最终需求引起的环境影响分解到生产链的各个部门。传统的LCA分析方法揭示产品从生产到消费各个阶段完整的环境影响, 能够清晰地阐释各部门碳排放量之间的相关联系; EIO-LCA则解决传统生命周期分析中数据较难获得的问题, 部门覆盖全面, 没有遗漏, 同时计算过程也大为简化, 并且可以根据需要将研究对象细化^[25]。建立基本的投入产出模型, 表达式如下:

$$X=AX+Y-X^m, \quad (1)$$

其中, X 为一个列向量, 表示各个部门的总产出; A 为一个 $N \times N$ 的矩阵, 其中的元素 A_{ij} 表示为部门 j 对部门 i 的直接投入系数; AX 表示中间使用; Y 为最终消费; X^m 为一个列向量, 表示各部门进口产品。

将 X 改写成 $N \times N$ 的矩阵, 对角线上元素分别表示各个部门总产出, 其余元素均为0。由于缺少进口产品的碳排放强度数据, 通行做法是假设进口产

品与国内产品的排放强度相同^[43], 可得到下式^[35]:

$$\varepsilon X = \varepsilon AX + E, \quad (2)$$

其中, ε 为一个行向量, 其元素 ε_i 表示部门 i 的完全排放强度; E 表示直接碳排放。由式(2)可得完全排放强度表达式:

$$\varepsilon = E((I-A)X)^{-1} = EX^{-1}(I-A)^{-1} = \varepsilon^d(I-A)^{-1}, \quad (3)$$

其中, ε^d 是一个行向量, 表示直接排放强度; I 为单位矩阵。

参考已有方法^[33], 国内产品生产的碳排放可表示为 $EEP=E$, 进口产品碳排放(EEI)和出口产品碳排放(EEE)分别表示为

$$EEI = \varepsilon^d X^m, \quad (4)$$

$$EEE = \varepsilon^d X^e, \quad (5)$$

国内消费(EEC)和国际排放平衡(EEB)分别表示为

$$EEC = EEP + EEI - EEE, \quad (6)$$

$$EEB = EEE - EEI. \quad (7)$$

为了建立 EIO-LCA 模型, 将 ε 和 ε^d 改写成对角矩阵的形式, 由式(3)可得

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^d(I-A)^{-1}, \quad (8)$$

其中, $\bar{\varepsilon}$ 为对角矩阵, 其对角元素 $\bar{\varepsilon}_i$ 为部门 i 的完全碳排放强度; $\bar{\varepsilon}^d$ 也是一个对角矩阵, 其对角元素 $\bar{\varepsilon}_i^d$ 为部门 i 直接碳排放强度, 则部门碳排放量为

$$B = \bar{\varepsilon} \bar{Y} = \bar{\varepsilon}^d(I-A)^{-1} \bar{Y}, \quad (9)$$

其中, \bar{Y} 为各部门产量的对角矩阵。 B 的元素为 b_{ij} (i 为产品生产或服务提供部门的序号, j 为产品或服务使用部门的序号, $i, j=1, \dots, n$, n 为投入产出表中的部门数)。 b_i 为 B 第 i 行的行向量, b_j 为 B 第 j 列的列向量, 列向量 B_{direct} 由 B 各行行元素之和组成。行向量 B_{embodied} 由 B 各列列元素之和组成。研究消费碳排放数据时, 可将消费量作为 \bar{Y} 导入式(9), 得

出相应结论。

1.2 二氧化碳气体排放数据

根据 Peters 等^[44]的测算方法, 本文对中国 1992, 1997, 2002, 2007 和 2012 年二氧化碳清单进行测算, 各年碳排放总量的测算结果如表 1 所示。其中, 1992 年能源平衡表数据取自《中国能源统计年鉴 1991—1996》, 1997 年数据取自《中国能源统计年鉴 2009》, 2002, 2007 和 2012 年数据取自《中国能源统计年鉴 2014》。由于历年部门分类和投入产出表分类不同, 因此依据投入产出表对能源消费量的部门重新进行分类(见附录表格)。燃料的实际排放因子以《中国温室气体清单研究》^[4]中最新数据为主, 其他能源的排放因子根据能源平衡表中数据得出。碳排放因子采用 IPCC 推荐数值^[7]。

1.3 可比价投入产出表

我国目前编制的投入产出表均以当年价为基准, 为使得各年之间具有可比性, 需要将当年价格表调整为可比价格表。1992, 1997 和 2002 年可比价投入产出表引自刘起运等^[45]。2007 和 2012 年可比价投入产出表是根据刘起运等^[45]的方法, 在《中国投入产出表 2007》^[46](135 产品部门)的基础上编制而成。部门价格指数来自历年《中国统计年鉴》, 以 2000 年为价格基年。

由于我国目前编制的投入产出表均为竞争型投入产出表, 中间使用和最终使用时不对国内产品和进口产品进行区分, 因此在计算国内直接排放时, 需要在投入产出表中将进口产品剥离, 采用非竞争型投入产出表进行计算。根据 Peters 等^[44]的方法, 假定进口产品在各部门间的使用比例与国内产品在各部门间的使用比例相同, 从而构建进口使用矩阵, 最后从各部门的中间使用和最终使用产品中减去进口产品, 得到国内产品使用的投入产出表。

表 1 1992—2012 年中国碳排放量和碳排放强度
Table 1 1992–2012 China's carbon emissions and carbon emission intensity

年份	碳排放量/Mt CO ₂ -eq			碳排放强度/(Mt CO ₂ -eq·万元 ⁻¹)	碳排放量 5 年间增幅/%
	燃料燃烧	工业生产	总量		
1992	1853.45	337.48	2190.94	1.85	
1997	2504.35	507.44	3011.79	1.53	37.47
2002	3015.63	666.84	3682.47	1.20	22.27
2007	5514.16	1479.72	6993.35	1.14	89.91
2012	6864.37	2095.80	8960.17	0.92	28.12

最后,为了使投入产出表与温室气体排放数据的部门分类相对应,依据《国民经济行业分类与代码》(GB/T 4754—2002)对部分部门进行合并,调整后共有35个部门(见附表),为便于表述,下文图表中使用附表中的序号代表相应的部门。

2 结果与分析

2.1 基于生产视角的部门直接碳排放

如表1所示,我国1992—2012年的碳排放总量由2190.94 Mt CO₂-eq增加到8960.17 Mt CO₂-eq,20年间增长3倍,2002—2007年直接碳排放量激增89.91%,远超其他年份。直接碳排放强度也呈现下降的趋势,2012年比基准年(1992年)下降50.30个百分点。

图1显示1992—2012年主要部门直接排放数值。按部门来看,在直接碳排放中部门25,14和15占主要部分。特别是部门25(电力、热力的生产和供应业)的排在2002年后增长迅速,这是由于1997年金融危机之后,我国经济较早从衰退中恢复过来,电力需求上升,导致2002年后部门25的直接排放迅速增长。

由于部门25属于基础性部门,其最终排放主要是满足其他行业生产的需求,因此将部门25的直接碳排放量按照其满足其他部门的最终需求进行分解(图2),可以发现其碳排放主要是为了满足部门17,28和35的最终需求。其中,部门28占比不断上升,

由1992年的15.42%上升至2012年的27.27%,引起的隐含排放量也由120.18 Mt CO₂-eq上升到1083.87 Mt CO₂-eq。特别是2002—2012年间,由于我国对于建筑部门的大量投资,使得该部门最终消费引起的部门25的直接排放迅速增长。

2.2 基于需求视角的隐含碳排放

2.2.1 完全碳排放强度

总体而言,各部门20年间完全碳排放强度均有不同程度的下降(表2)。绝大部分部门的完全碳排放强度降幅超过50%,但不高于90%。个别部门的下降幅度较小,如部门3(0.96%)和部门8(13.12%)。这些部门的排放强度原本就很低,因此变化不大。原本强度较高的部门(如部门25,14和15),其完全碳排放强度不仅下降的比例大,减少的数值也大,如部门25由1992年的42.02 Mt CO₂-eq/万元下降至2012年的20.08 Mt CO₂-eq/万元,减少52.21个百分点。

2.2.2 部门隐含排放

1992—2012年间,隐含碳排放总量整体上呈增长趋势,只有部门2,3,5,8,15,22和30减少。部门5隐含碳排放量相对于1992年减少91.11%,减少率最高;部门2隐含碳排放量减少12.69 Mt CO₂-eq,减少的数值最大。各年份区间内,大部分部门的隐含碳排放量呈现波动状况,只有部门10,16,18,19,20,25,28,29和31的隐含碳排放量持续上升。其中,部门12的隐含排放增长率最高,为1553.96%,

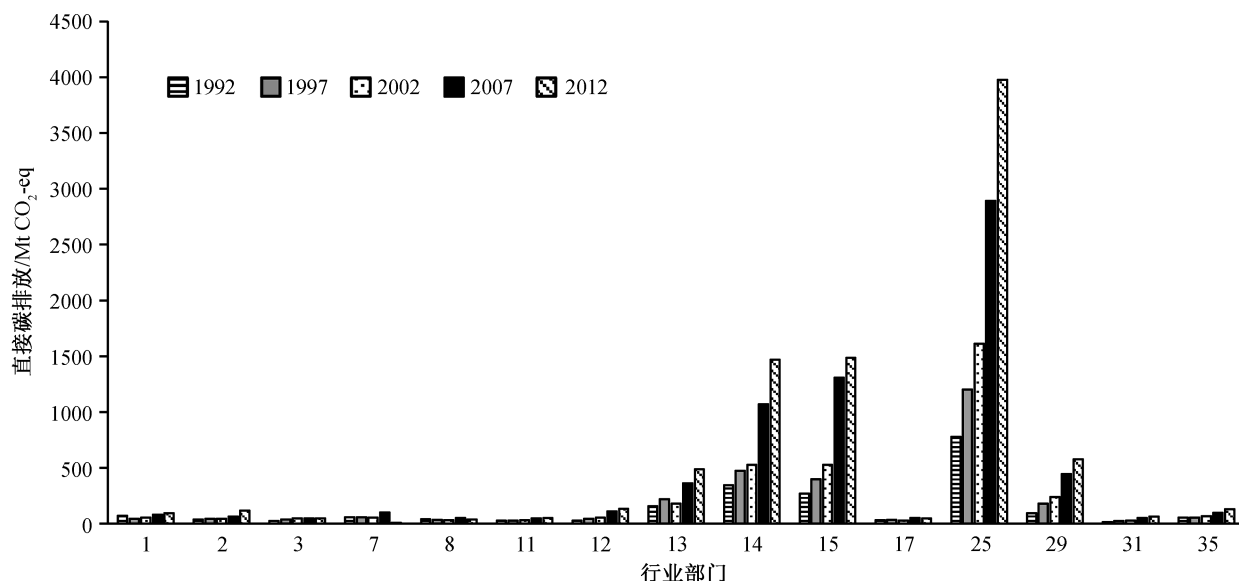


图1 1992—2012年主要部门直接碳排放
Fig. 1 Direct carbon emissions of major sectors in 1992—2012

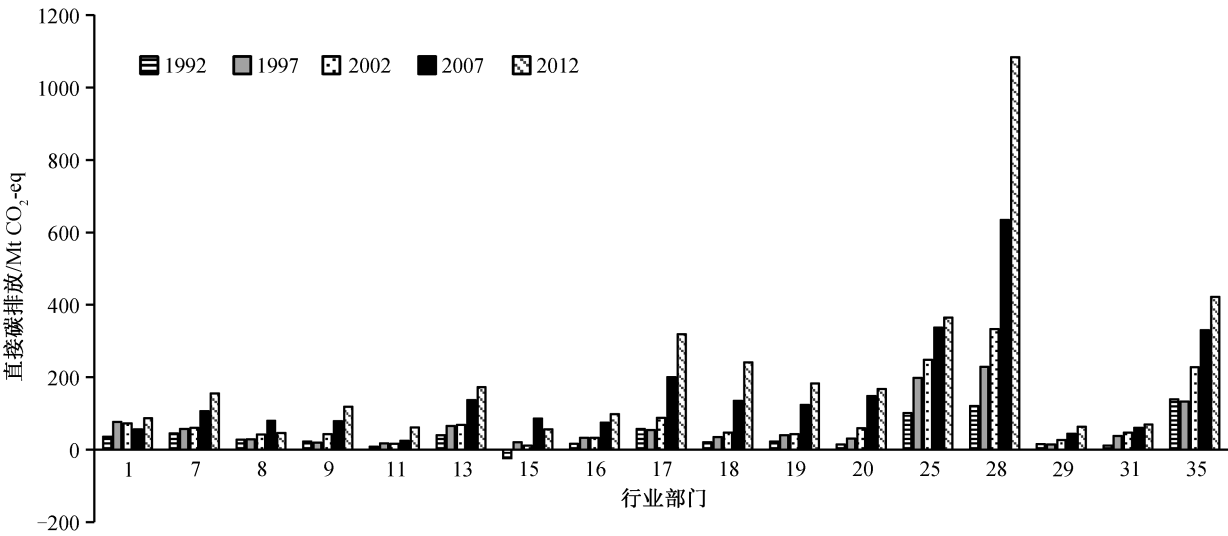


图2 1992—2012年间电力部门为满足其他部门最终需求的碳排放
Fig. 2 Carbon emission of electricity sector for meeting the final demand of other sectors in 1992–2012

表2 主要部门2012年完全排放强度、相对1992年的下降数值(Mt CO₂-eq /万元 GDP)和幅度
Table 2 Total emission intensity of the main sectors in 2012, relative decline (Mt CO₂-eq/10⁴ GDP) and magnitude to 1992

部门	完全排放强度	下降数值	下降幅度/%	部门	完全排放强度	下降数值	下降幅度/%
3	2.31	0.02	0.96	25	1.40	21.94	52.21
8	2.13	0.32	13.12	26	1.83	8.19	84.08
14	2.34	12.85	58.97	30	20.15	4.52	71.61
15	8.18	13.12	70.05	33	1.63	1.97	71.97
20	5.55	6.51	81.76	34	0.67	1.73	70.68
21	2.64	5.66	74.90				

部门28的隐含碳排放量增长数值最大,20年间增长2609.40 Mt CO₂-eq, 达到3071.32 Mt CO₂-eq。

各年份主要部门隐含碳排放量如图3所示,部门28和35的隐含排放量占比稳居前两位。其中部门28的比重持续上升,20年间上升13.19个百分点,在2002—2007年间上升幅度较大,达到106.76%。部门35的比重保持下降趋势,最终下降4.96个百分点,但仍然排名第二。自2002年后,部门25的隐含排放迅速增加,这是由于我国的基础设施建设在2002年后得到较大发展导致。

为了探究部门28的隐含碳排放在生产链中的分布,将部门28的最终需求按其引起的其他部门排放量进行分解(图4)。部门28的最终需求主要导致部门14,15和25的碳排放量上升,在2002—2007年间,其引起的部门14,15和25的直接碳排放增长率分别为123.95%,94.87%和93.48%。由于我国近年来大力推进城镇化,部分城市在基础设施建设上盲目跟风,造成大量资源浪费,因此要控制上

述部门的直接碳排放不仅要从行业本身着手,更应该从部门28的最终需求出发,扎实有序地推进城市基础设施建设,控制碳排放的增长。

2.2.3 各类最终需求隐含排放

从需求的类型来看,1992—2012年我国碳排放增长的主要原因在于投资活动、出口及城镇居民消费规模的大幅增长,三者共占最终需求总增量的95.20%,达到6722.73 Mt CO₂-eq(图5)。

投资活动变动占最终需求总增量的55.83%。投资活动隐含碳排放主要在部门28,达到2591.22 Mt CO₂-eq,占比为69.3%(表3)。其原因主要在于20年间我国大力进行城镇化建设,对建筑业进行大量投资,导致部门28的碳排放快速增长。

出口变动占最终需求总增量的24.38%。出口隐含排放主要集中在制造业,包括部门20,19,13和17等(表3)。我国总体上出口隐含碳排放较高,这是因为我国出口产品相对低端,仍然以能源资源密集型为主。

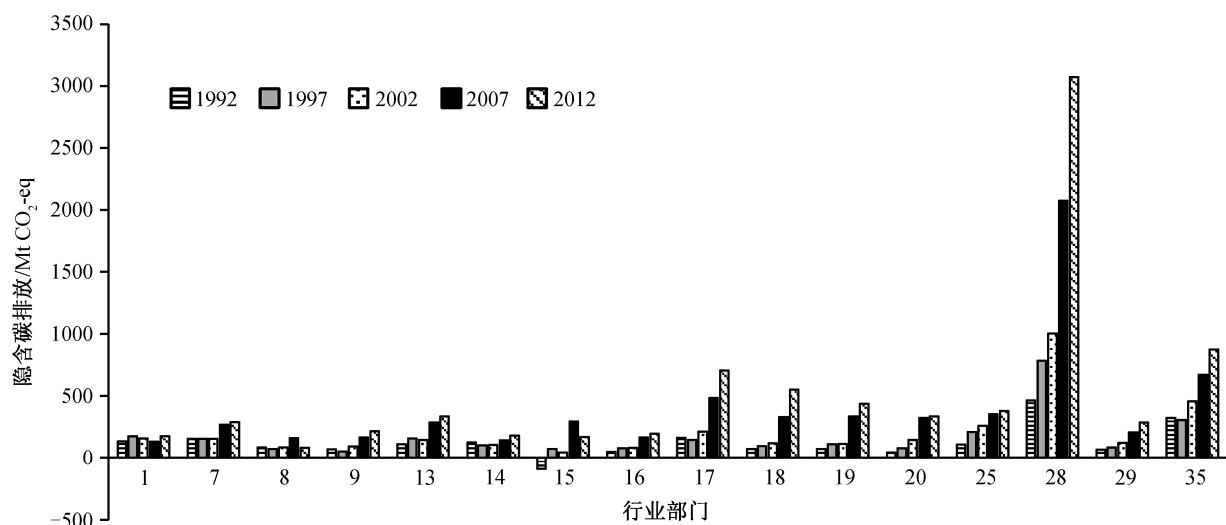


图3 各年份主要部门隐含碳排放
Fig. 3 Embodied carbon in major sectors in each year

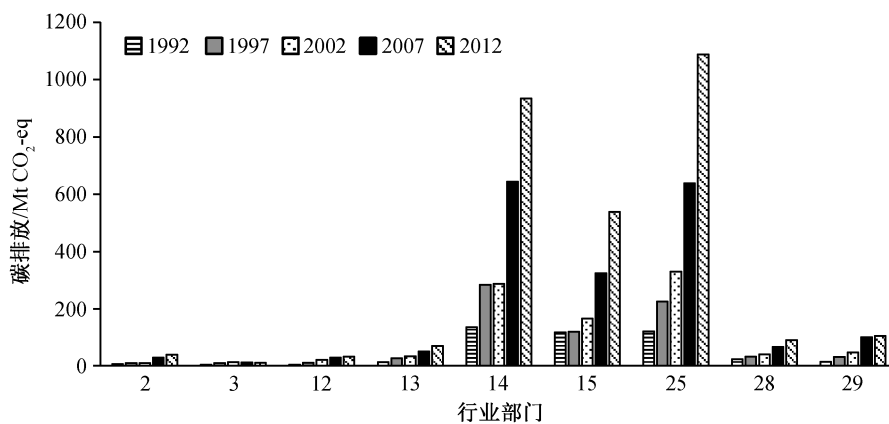


图4 1992—2012年建筑业引起的其他部门碳排放分解
Fig. 4 Carbon emission of other sectors for meeting the final demand of construction sector in 1992–2012

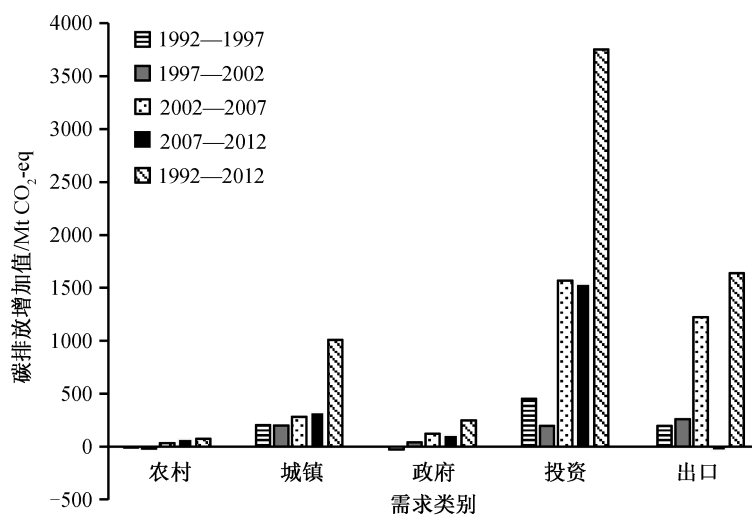


图5 1992—2012年最终需求引起的碳排放变化量
Fig. 5 Changes in carbon emissions caused by final demand in 1992–2012

表3 1992—2012年主要部门最终需求规模变化引起的碳排放变化量

Table 3 Changes in carbon emissions caused by the changes in the scale of final demand in major sectors in 1992–2012

部门代码	农村	城镇	政府	投资	出口	部门合计
28	0.00	0.00	0.00	2591.22	18.18	2609.40
17	-0.26	2.49	0.00	366.50	173.11	541.84
35	34.79	168.98	216.39	64.48	38.19	522.82
18	5.78	76.18	0.00	320.11	76.18	478.26
19	7.65	28.85	0.00	138.18	188.75	363.43
20	-1.68	7.38	0.00	19.95	268.22	293.87
25	47.18	226.46	0.00	0.00	0.84	274.48
15	-0.42	-0.33	0.00	134.44	129.43	263.13
29	4.63	69.45	25.65	26.74	92.02	218.49
13	-15.86	65.81	0.00	-17.19	185.11	217.87
7	35.18	109.88	0.00	0.16	5.36	150.57
16	-9.50	0.67	0.00	64.69	87.60	143.46
需求类别合计	107.51	755.82	242.04	3709.27	1262.99	6077.63
占需求总增量的比重/%	144.29	75.02	97.46	98.82	77.06	90.40

城镇居民消费的变动占最终需求总增量的14.99%。城镇居民消费隐含排放的增长主要集中在部门25、35和7等，这些部门与居民生活密切相关(表3)，其快速上升的主要原因在于城镇人口和居民生活水平的增长。今后，随着我国新型城镇化的深入，城镇人口和居民生活水平持续增加，城镇居民消费隐含排放将会继续保持增长。

从需求引起的部门排放来看，1992—2012年，部门28、17和35的增幅最大，三者共占总增量的60.45%(图6)，达到3674.06 Mt CO₂-eq。此外，部

门22、2、5、3和8的碳排放变化幅度虽然不大，但保持下降趋势。这是由于我国加强能源资源行业的监督管理，同时提高相关行业的生产效率，使得碳排放量下降。

3 结论与不足

本文基于中国1992—2012年的投入产出表，分别从部门结构和类型结构两个角度对隐含碳排放量进行分析。

从部门结构来看，隐含碳排放量最多的为建筑

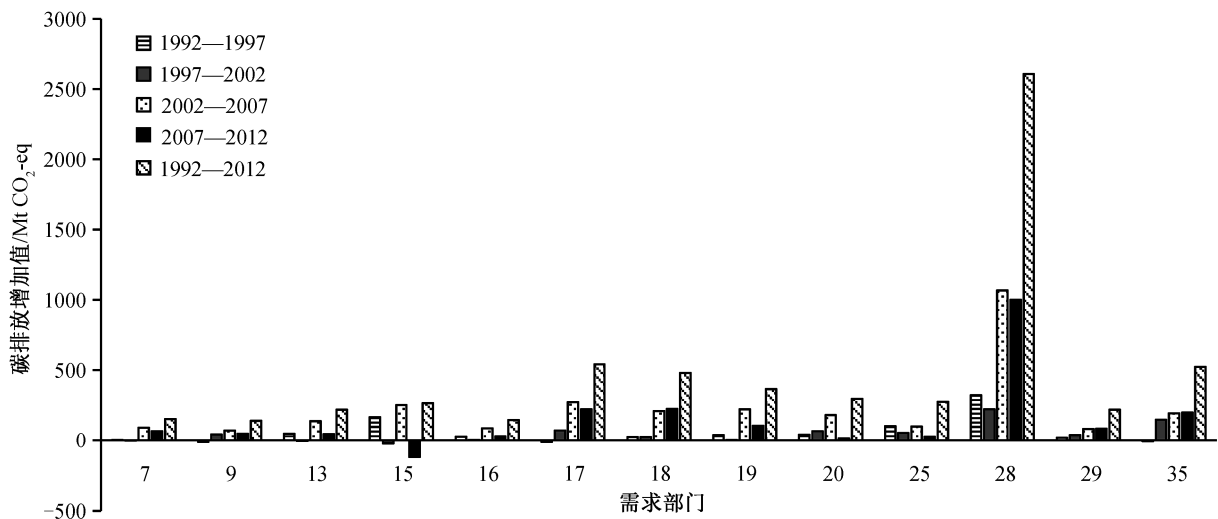


图6 1992—2012年最终需求结构变化引起的主要碳排放变化量

Fig. 6 Changes in carbon emissions caused by changes in the structure of final demand in major sectors in 1992–2012

业,在20年间增长543.91%,达到2964.30 Mt CO₂-eq。由于我国对建筑部门的大量投资,使得该部门最终消费引起的其他部门直接碳排放量迅速增长。另外,电力部门的直接碳排放主要是为了满足其他部门(尤其是建筑业)的最终需求,因此在20年间增长较快。

从类型结构看,1992—2012年我国碳排放增长的主要原因在于投资活动、出口及城镇居民消费的大幅增长。投资活动占最终需求总增量的55.83%,其隐含碳排放主要在部门28。出口占最终需求总增量的24.38%,其隐含碳排放集中在制造业,总体上我国出口隐含碳排放较高。城镇居民消费占最终需求总增量的14.99%,其隐含碳排放集中在部门25, 35和7等与日常生活密切相关的部门。从需求的结构影响来看,1992—2012年,部门28, 17和35的增幅最明显,三者共占总增量的60.45%。此外,部门22, 2, 5, 3和8的碳排放保持下降趋势。

由于本文采用的35个部门的分类较粗略,因此在分析部门排放时不够详尽。对于20年间变化产生的原因没有进行细致的探讨,缺乏数理分析。国际贸易中采用的“进口产品与出口产品排放强度相同”的假设过于严格,不太符合实际情况。在今后的研究中可以从更详细的多部门MRIO表着手,采用SDA分解方法,探讨单个或多个国家(或地区)的生产、消费碳排放变化原因。

参考文献

- [1] British Petroleum. BP statistical review of world energy. London: BP, 2017
- [2] Net X. U.S.-China Joint Announcement on Climate Change [EB/OL]. (2014-11) [2017-11-09]. https://www.fmprc.gov.cn/web/ziliao_674904/zt_674979/ywzt_675099/2014zt_675101/fzshyxxghd_675199/zxxx_675201/t1210034.shtml
- [3] Zhang Bo, Chen Guoqian. China's CH₄ and CO₂ emissions: bottom-up estimation and comparative analysis. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 112-122
- [4] Chen Guoqian, Zhang Bo. Greenhouse gas emissions in China 2007: inventory and input-output analysis. *Energy Policy*, 2010, 38(10): 6180-6193
- [5] Liu Zhu, Guan Dabo, Wei Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 2015, 524: 335-338
- [6] 国家气候变化对策协调小组办公室. 中国温室气体清单研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2007
- [7] Zhang Bo, Chen Guoqian, Xia Xiaohua, et al. Environmental emissions by Chinese industry: exergy-based unifying assessment. *Energy Policy*, 2012, 45: 490-501
- [8] Xia Xiaohua, Huang Guitian, Chen Guoqian, et al. Energy security, efficiency and carbon emission of Chinese industry. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3520-3528
- [9] Agency I E. 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC, 2006
- [10] Peters G P, Hertwich E G. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption. *Climatic Change*, 2007, 86(1/2): 51-66
- [11] Peters G P, Hertwich E G. Pollution embodied in trade: the Norwegian case. *Global Environmental Change*, 2006, 16(4): 379-387
- [12] Munksgaard J, Pedersen K A. CO₂ accounts for open economies: producer or consumer responsibility?. *Energy Policy*, 2001, 29(4): 327-334
- [13] Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories. *Ecological Economics*, 2008, 65(1): 13-23
- [14] Leontief W W, Leontief W. Input-output economics. Oxford: Oxford University Press, 1986
- [15] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 211-222
- [16] Miller R E, Blair P D. Input-output analysis: foundations and extensions. Cambridge: Cambridge University Press, 2009
- [17] Leontief W. Environmental repercussions and economic structure: an input-output approach. *Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(3): 262-271
- [18] Zhang Bo, Chen Guoqian, Li Jiashuo, et al. Methane emissions of energy activities in China 1980-2007. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 11-21
- [19] Butnar I, Llop M. Structural decomposition analysis and input-output subsystems: changes in CO₂ emissions of Spanish service sectors (2000-2005). *Ecological Economics*, 2011, 70(11): 2012-2019
- [20] Lenzen M. Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input-output analysis. *Energy Policy*, 1998, 26(6): 495-506

- [21] Labandeira X, Labeaga J M. Estimation and control of Spanish energy-related CO₂ emissions: an input-output approach. *Energy Policy*, 2002, 30(7): 597–611
- [22] Zhang Yuejun, Bian Xiaojuan, Tan Weiping, et al. The indirect energy consumption and CO₂ emission caused by household consumption in China: an analysis based on the input-output method. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 69–83
- [23] Andrew R, Forgie V. A three-perspective view of greenhouse gas emission responsibilities in New Zealand. *Ecological Economics*, 2008, 68(1): 194–204
- [24] Su Bin, Ang B W. Multiplicative decomposition of aggregate carbon intensity change using input-output analysis. *Applied Energy*, 2015, 154: 13–20
- [25] Lenzen M, Murray J, Sack F, et al. Shared producer and consumer responsibility — theory and practice. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 27–42
- [26] Cui Lianbiao, Peng Pan, Zhu Lei. Embodied energy, export policy adjustment and China's sustainable development: a multi-regional input-output analysis. *Energy*, 2015, 82: 457–467
- [27] Zhang Wencheng, Peng Shuijun, Sun Chuanwang. CO₂ emissions in the global supply chains of services: an analysis based on a multi-regional input-output model. *Energy Policy*, 2015, 86: 93–103
- [28] Peters G P, Weber C L, Guan D, et al. China's growing CO₂ emissions a race between increasing consumption and efficiency gains. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 5939–5944
- [29] Minx J C, Baiocchi G, Peters G P, et al. A “carbonizing dragon”: China's fast growing CO₂ emissions revisited. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9144–9153
- [30] 计军平, 刘磊, 马晓明. 基于 EIO-LCA 模型的中国部门温室气体排放结构研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(4): 741–749
- [31] 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. *生态经济(中文版)*, 2017, 33(9): 21–25
- [32] Pan Jiahua, Phillips J, Chen Ying. China's balance of emissions embodied in trade: approaches to measurement and allocating international responsibility. *Oxford Review of Economic Policy*, 2008, 24(2): 354–376
- [33] Yan Yunfeng, Yang Laike. China's foreign trade and climate change: a case study of CO₂ emissions. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 350–356
- [34] Chen Zhanming, Liu Yu, Qin Ping, et al. Environmental externality of coal use in China: welfare effect and tax regulation. *Applied Energy*, 2015, 156: 16–31
- [35] Chen Zhanming, Chen Guoqian, Zhou Jianbo, et al. Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in Chinese economy 2005. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1942–1965
- [36] Hendrickson C, Horvath A, Joshi S, et al. Peer reviewed: economic input-output models for environmental life-cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(7): 184A–191A
- [37] Matthews H S, Small M J. Extending the boundaries of life-cycle assessment through environmental economic input-output models. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(3): 7–10
- [38] 黄颖, 计军平, 马晓明. 基于 EIO-LCA 模型的纯电动轿车温室气体减排分析. *中国环境科学*, 2012, 32(5): 947–953
- [39] 李小环, 计军平, 马晓明, 等. 基于 EIO-LCA 的燃料乙醇生命周期温室气体排放研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 1081–1088
- [40] 吴常艳, 黄贤金, 揣小伟, 等. 基于 EIO-LCA 的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(4): 43–51
- [41] 袁长伟, 白娟, 芮晓丽, 等. 基于 EIO-LCA 模型的陕西省产业碳减排效应. *长安大学学报(社会科学版)*, 2016, 18(4): 48–55
- [42] Chen Guoqian, Chen Zhanming. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(11): 3647–3732
- [43] Weber C L, Peters G P, Guan D, et al. The contribution of Chinese exports to climate change. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3572–3577
- [44] Peters G, Weber C, Liu J. Construction of Chinese energy and emissions inventory. *Academic Medicine Journal of the Association of American Medical Colleges*, 2006, 69(9): 703–707
- [45] 刘起运, 彭志龙. 中国 1992—2005 年可比价投入产出序列表及分析. 北京: 中国统计出版社, 2010
- [46] 国家统计局国民经济核算司. 中国投入产出表 2007. 北京: 中国统计出版社, 2009

附录 部门分类
Appendix Table Sectoral classification system

1992 年			1997, 2002 和 2007 年			2012 年			重新分类	
序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称	序号		
1	农林牧渔、水利业	1	农林牧渔、水利业	1	农林牧渔、水利业	1	农林牧渔、水利业	1	农林牧渔业	
8	木材及竹材采运业									
2	煤炭采选业	2	煤炭开采和洗选业	2	煤炭开采和洗选业	2	煤炭开采和洗选业	2	煤炭开采和洗选业	
3	石油和天然气开采业	3	石油和天然气开采业	3	石油和天然气开采业	3	石油和天然气开采业	3	石油和天然气开采业	
4	黑色金属矿采选业	4	黑色金属矿采选业	4	黑色金属矿采选业	4	黑色金属矿采选业	4	金属矿采选业	
5	有色金属矿采选业	5	有色金属矿采选业	5	有色金属矿采选业	5	有色金属矿采选业			
6	非金属矿采选业	6	非金属矿采选业	6	非金属矿采选业	6	非金属矿采选业	5	非金属矿采选业	
7	其他矿采选业	7	其他采矿业	8	其他采矿业					
				7	开采辅助活动	7	开采辅助活动	6	开采辅助活动	
9	食品加工业	8	农副食品加工业	9	农副食品加工业					
10	食品制造业	9	食品制造业	10	食品制造业					
11	饮料制造业	10	饮料制造业	11	饮料和精制茶制造业			7	食品制造及烟草加工业	
12	烟草加工业	11	烟草制品业	12	烟草制品业					
13	纺织业	12	纺织业	13	纺织业			8	纺织业	
14	服装及其他纤维制品制造业	13	纺织服装、鞋、帽制造业	14	纺织服装、服饰业					
15	皮革、毛皮、羽绒及其制品业	14	皮革、毛皮、羽绒(绒)及其制品业	15	皮革、毛皮、羽绒及其制品和制鞋业			9	服装皮革羽绒及其制品业	
16	木材加工及竹、藤、棕、草制品业	15	木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	16	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业			10	木材加工及家具制造业	
17	家具制造业	16	家具制造业	17	家具制造业					
18	造纸及纸制品业	17	造纸及纸制品业	18	造纸和纸制品业					
19	印刷业、记录媒介的复制	18	印刷业和记录媒介的复制	19	印刷和记录媒介复制业			11	造纸印刷及文教用品制造业	
20	文教体育用品制造业	19	文教体育用品制造业	20	文教、工美、体育和娱乐用品制造业					
21	石油加工及炼焦业	20	石油加工、炼焦及核燃料加工业	21	石油加工、炼焦和核燃料加工业			12	石油加工、炼焦及核燃料加工业	
22	化学原料及化学制品制造业	21	化学原料及化学制品制造业	22	化学原料和化学制品制造业					
23	医药制造业	22	医药制造业	23	医药制造业					
24	化学纤维制造业	23	化学纤维制造业	24	化学纤维制造业			13	化学工业	
25	橡胶制品业	24	橡胶制品业	25	橡胶和塑料制品业					
26	塑料制品业	25	塑料制品业							

续表

1992 年			1997, 2002 和 2007 年			2012 年			重新分类		
序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称	序号	部门名称
27	非金属矿物制品业	26	非金属矿物制品业	26	非金属矿物制品业	14	非金属矿物制品业				
28	黑色金属冶炼及压延加工业	27	黑色金属冶炼及压延加工业	27	黑色金属冶炼及压延加工业	15	金属冶炼及压延加工业				
29	有色金属冶炼及压延加工业	28	有色金属冶炼及压延加工业	28	有色金属冶炼及压延加工业						
30	金属制品业	29	金属制品业	29	金属制品业	16	金属制品业				
31	普通机械制造业	30	通用设备制造业	30	通用设备制造业	17	通用、专用设备制造业				
32	专用设备制造业	31	专用设备制造业	31	专用设备制造业						
33	交通运输设备制造业	32	交通运输设备制造业	32	汽车制造业						
				33	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	18	交通运输设备制造业				
34	电气机械及器材制造业	33	电气机械及器材制造业	34	电气机械及器材制造业	19	电气、机械及器材制造业				
35	电子及通信设备制造业	34	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	35	计算机、通信和其他电子设备制造业	20	通信设备、计算机及其他电子设备制造业				
36	仪器仪表、文化、办公用机械制造业	35	仪器仪表及文化、办公用机械制造业	36	仪器仪表制造业	21	仪器仪表及文化、办公用机械制造业				
37	其他制造业	36	工艺品及其他制造业	37	其他制造业	22	其他制造业				
				39	金属制品、机械和设备修理业	23	金属制品、机械和设备修理业				
		37	废弃资源和废旧材料回收加工业	38	废弃资源综合利用业	24	废品废料业				
38	电力、蒸汽、热水的生产和供应业	38	电力、热力的生产和供应业	40	电力、热力生产和供应业	25	电力、热力的生产和供应业				
39	煤气生产和供应业	39	燃气生产和供应业	41	燃气生产和供应业	26	燃气生产和供应业				
40	自来水的生产和供应业	40	水的生产和供应业	42	水的生产和供应业	27	水的生产和供应业				
41	建筑业	41	建筑业	43	建筑业	28	建筑业				
42	交通运输、仓储及邮电通迅业	42	交通运输、仓储及邮电通迅业	44	交通运输、仓储和邮政业	29	交通运输及仓储业				
43	批发和零售贸易业、餐饮业	43	批发和零售贸易业、餐饮业	45	批发、零售业和住宿、餐饮业	31	批发和零售业				
						32	住宿和餐饮业				
44	其他服务业	44	其他服务业	46	其他服务业	33	金融保险业				
						34	房地产业				
						35	其他服务业				