
上海财经大学中国产业发展研究院专题报告

上海工业能源消费碳排放研究报告： 效率测度、影响因素与减缓对策

姓名：邵帅

单位：上海财经大学财经研究所

职称：副研究员

学位：博士

通讯地址：上海武东路 321 号

联系电话：18621838918

电子邮箱：shao.shuai@mail.shufe.edu.cn

2013 年 12 月

内容提要

随着工业化和城市化进程的快速推进,中国的能源消费量和二氧化碳排放量迅速攀升。同时,作为中国经济发展的典型代表,上海能否成功实现经济转型与节能减排目标不仅关系到上海经济的可持续发展,而且也将很大程度上对整个中国经济产生带动和示范效应。

有鉴于此,本报告对上海 1994~2011 年各工业行业的能源消费碳排放进行了准确估算,构建上海工业行业碳排放的面板数据库;进而采用数据包络分析(DEA)对上海工业部门不同时期、不同行业的全要素碳排放效率进行了科学准确地测算和分解,构建动态面板数据模型并采用系统广义矩估计(SYSGMM)方法对上海工业碳排放效率的影响因素开展了经验考察;最后,结合上海宏观经济的现实特点并借鉴国外经验,为上海工业的低碳发展提出合理可行的优化路径与政策建议。

分析结果显示,技术进步对上海市碳排放效率增长都具有重要作用。诸如电子信息制造这类对技术创新依赖度高的行业,其碳排放效率增长较快,且对生产可能性边界的扩张具有推动作用。工业部门整体碳排放效率的变化很大程度上取决于重化工行业能否兼顾产出增长与环境保护。重化工行业是经济增长的重要推动力,同时也是环境污染物排放大户,政策的制定和执行应该特别关注重化工业部门。为此,上海工业低碳发展的政策思路包括:构建推动工业低碳经济发展的法律体系;制定科学合理的工业低碳经济发展战略规划,并建立和完善目标管理机制;积极推进工业产业结构优化调整;大力发展清洁能源,优化能源消费结构等。

目录

一、引言.....	1
二、上海工业能源消费碳排放的估算及特征分析.....	8
(一) 上海工业能源消费碳排放的估算.....	8
(二) 上海工业能源消费碳排放的演变趋势及结构特征.....	11
(三) 小结.....	21
三、上海工业能源消费碳排放效率的测算及分解.....	22
(一) 方法与数据.....	22
(二) 碳排放效率测算及分解结果与讨论.....	23
(三) 小结.....	28
四、上海工业能源消费碳排放效率的影响因素考察.....	29
(一) 计量模型设定.....	29
(二) 数据说明.....	32
(三) 估计结果及讨论.....	32
(四) 小结.....	36
五、上海工业低碳发展的政策思路.....	37
参考文献.....	45

一、引言

随着工业化和城市化进程的快速推进，中国的能源消费量和 CO₂ 排放量迅速攀升。中国二氧化碳排放在 20 世纪六七十年代还比较低，与德国、日本相差无几，但在改革开放以后显著上升，甩开了德国、日本和印度，开始不断逼近美国。根据 IEA（2009）统计数据显示，2007 年中国的 CO₂ 排放量达到 60.7 亿吨，已经超过美国的 57.7 亿吨成为全球第一大碳排放国。而且，中国的二氧化碳排放不仅是总量大，增量也很大。2007 年中国的二氧化碳排放总量是 2000 年的两倍，占同期世界排放增量的 64%。尽管 2008 年的金融危机对短期经济产生了很大影响，但中国经济发展势头良好，能源需求与碳排放^①仍然继续增长（Lin 等，2010）。这无疑给中国的碳减排带来了更大的国际压力。

作为世界上最大的发展中国家，中国有责任也有义务为“后哥本哈根”时代全球的碳减排做出贡献。实际上，在国际社会普遍要求减缓碳排放的背景下，中国的碳排放问题已经成为了国内外学界和各国政府共同关注的焦点。转变增长模式的内在诉求和控制温室气体排放的大势所趋促使中国政府于 2009 年正式提出了控制温室气体排放行动目标，即到 2020 年，单位 GDP 碳排放较 2005 年下降 40-45%，并将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。这是中国首次提出 CO₂ 减排的量化指标，也是世界主要国家中第一个把碳减排与 GDP 指标挂钩的国家。作为这一目标的阶段性分解指标，中国“十二五”规划又明确提出了单位 GDP 碳排放较 2010 年降低 17% 的约束性指标。中国在应对气候挑战上的表率作用不但赢得了国际社会的好评，而且

^① 为便于表述，如无特殊说明，本章中的“碳排放”即指 CO₂ 排放量。

以碳强度作为相对减排指标也充分考虑到了中国作为发展中国家发展仍然是第一要务的国情，符合低碳经济的发展方向，有利于形成助推中国经济转型的倒逼机制和长效机制（陈诗一，2011a）。节能减排目标的提出既为中国未来的经济发展提出了挑战，同时也成为了中国各地区经济转型的重要杠杆和机遇。

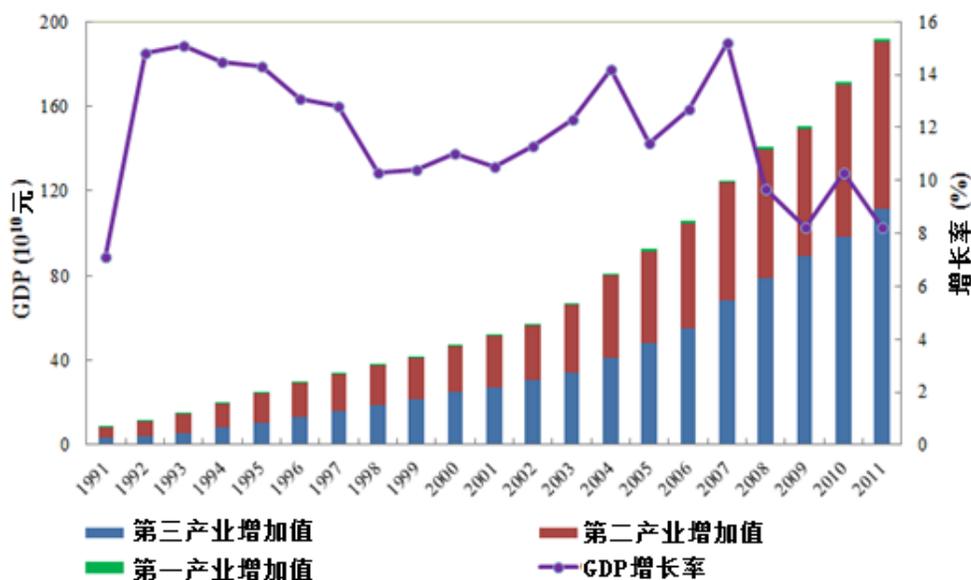


图 1 上海的 GDP 及其产业结构走势图 (1991-2011)

数据来源：作者根据《上海统计年鉴》数据计算整理。

上海作为中国的经济中心城市，其经济发展过程可以被视为中国近三十多年来经济快速发展的一个缩影，同时上海也应该成为未来中国经济转型发展的探路者，尤其需要在气候变化缓解与适应行动方面发挥表率作用。事实上，自 2001 年《上海市国民经济和社会发展第十个五年计划纲要》明确提出国际经济、金融、贸易和航运“四个中心”建设起，上海的产业转型已经在中国率先开展。近些年，上海的第二产业和第三产业比重分

别呈现出逐渐降低和增加趋势，自 1999 年起，第三产业比重已超过 50%，开始确立优势地位。此后其比重虽然略有波动，但总体上呈上升势头，且一直保持在 50% 以上，近几年更是达到接近 60% 的水平（见图 1）。可见，上海已经呈现出后工业化时期产业发展的阶段性特征，进入了发展转型的重要时期，产业结构调整与优化升级也面临战略性转变（李伟，2011）。同时，上海已进入世界银行划分的高收入组，人均收入已逼近中等发达经济体水平，并率先感受到经济增长减速的问题。

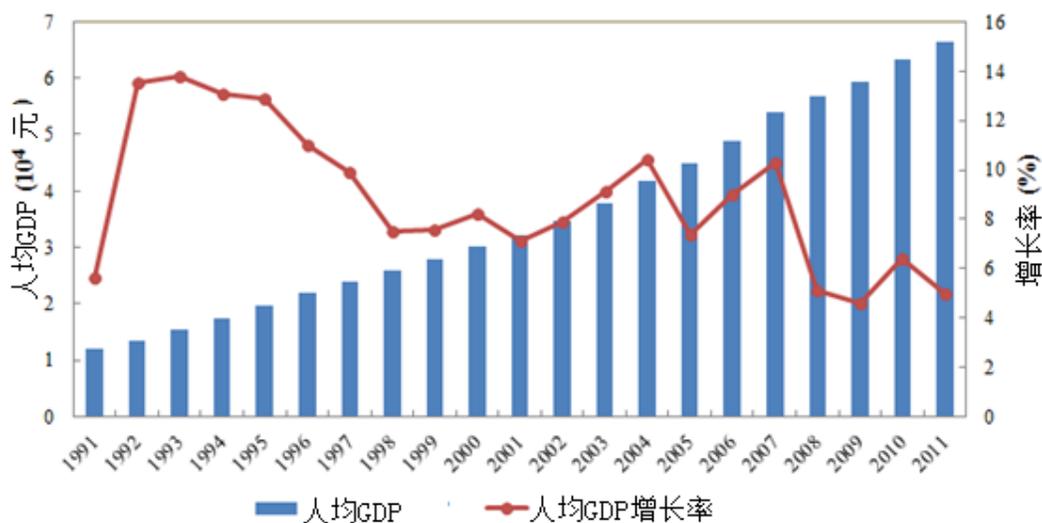


图 2 上海人均 GDP 及其增长率走势图（1991-2011）

数据来源：根据《上海统计年鉴》数据计算整理。

《上海统计年鉴》数据显示，自 1992 年起，上海 GDP 连续 16 年保持了两位数的增长，年均增幅为 12.63%，但 2008 年以后其增长速度明显放缓，已回落至 9% 左右（见图 1）。而人均 GDP 增长率的变化趋势与 GDP 基本一致，并且下降趋势更为明显（见图 2）。从 20 世纪 90 年代初至今

大体上呈现出曲折下降的趋势,平均增长率已由 20 世纪 90 年代的 10.31% 下降至 21 世纪初的 7.74%, 2008 年以后更是跌落至 5% 左右。

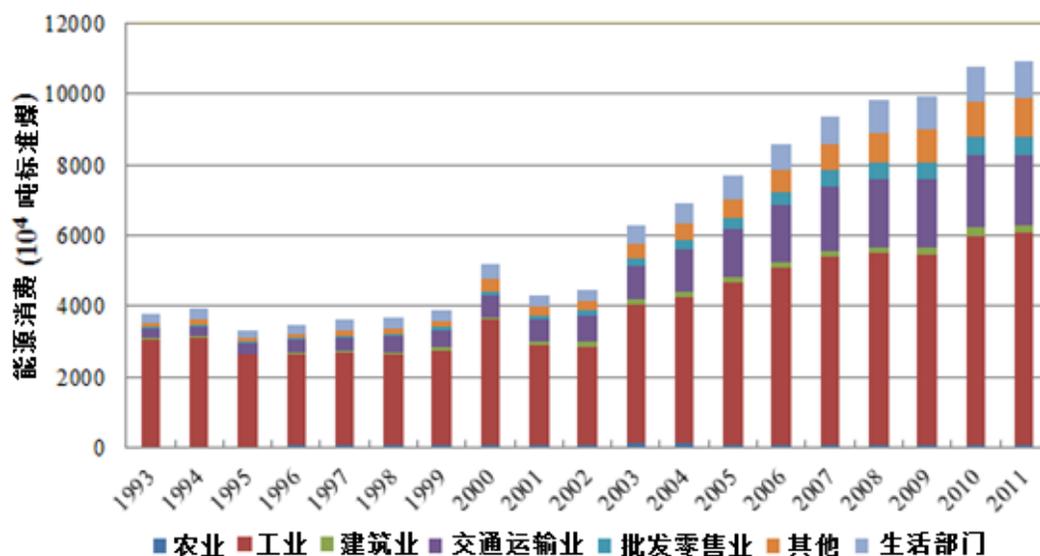


图 3 上海终端能源消费总量及其产业结构走势图 (1993—2011)

数据来源: 根据《上海工业能源交通统计年鉴》数据计算整理。

在经济增长步伐放缓的同时,与我国总体情况一样,上海面临的节能减排压力也与日俱增。如图 3 所示,上海的终端能源消费量总体上呈现出明显的上升趋势,已由 1993 年的 3 786.58 万吨标准煤增加到 2011 年的 10 943.46 万吨标准煤,年均增长幅度达到 10.5%。尤其是在 2003 年后一路飙升,至 2010 年已突破 1 亿吨标准煤。与此同时,上海的碳排放^①也随着能源依赖程度的增加而呈现出明显的递增趋势(见图 4),已由 1993 年的 5 691.92 万吨增加至 2011 年的 13 964.68 万吨,平均增长率为 8.1%,同样在 2003 年后表现出明显的上升趋势,于 2005 年突破 1 亿吨大关。面对不容乐观的节能减排形势,上海市政府已经出台了一系列政策措施,以

^① 本文中上海的碳排放数据均由作者按照 IPCC (2006) 方法计算而得,后文将对此进行具体说明。

积极应对的姿态响应着中国节能减排目标政策的实施。《上海市节能和应对气候变化“十二五”规划》已经明确提出了单位 GDP 碳排放较 2010 年下降 19%、较 2005 年下降 35% 以上的约束性指标。但随着一批重大项目的落地建设、国际航运中心建设的加快推进、居民生活质量的进一步提高，以及经济的进一步快速发展，上海在推进节能减排和低碳发展方面面临着严峻的压力和挑战。无疑，作为中国经济发展的典型代表，上海能否成功实现经济转型与节能减排目标不仅关系到上海经济的可持续发展，而且也将很大程度上对整个中国经济产生带动和示范效应。

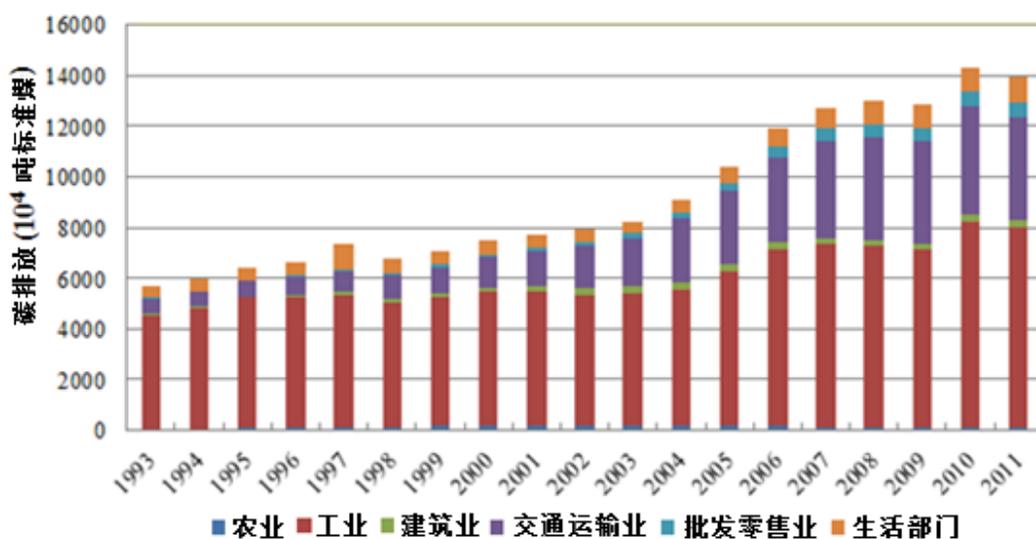


图 4 上海能源消费碳排放及其产业结构走势图 (1993-2011)

数据来源：根据《上海工业能源交通统计年鉴》数据计算整理。

众所周知，自十九世纪中期工业革命以来，工业部门的快速发展引致了人类对化石能源消费的巨大需求，从而成为了包括碳排放在内的温室气体排放大幅攀升的罪魁祸首。作为最大的能源消费部门，工业部门的能源

消费量占全球能源消费总量的比重达 40% 以上，而全世界工业部门^①的碳排放比重高达 61% (IEA, 2009)。自 1978 年改革开放以来，中国逐渐进入高速工业化时代，工业部门的迅猛发展驱动着整个国民经济的快速增长。据《中国统计年鉴》数据显示，1981-2011 年的三十年间，中国 GDP 平均增长率达到 10.2%，而工业增加值的年均增长更是达到了 11.9%，并且工业增加值占 GDP 的比重在大多数年份均保持在 40% 以上，在各大产业部门中高居首位。

总体而言，中国经济正处于以能源快速消耗为主要特征的工业化加速进程阶段，工业化的快速发展对能源的刚性需求在短期内难以降低，能源和污染排放密集型的钢铁、水泥和化工等行业在可以预见的将来仍然会在经济中发挥不可替代的基础作用。已有研究表明，改革开放以来，平均占全国 GDP 约 40% 的工业增加值伴随着占全国 84.2% 的碳排放，特别是本世纪以来，随着工业再次重型化，工业二氧化碳排放 (ICE) 占全国排放的比例更是高达 90% 以上 (陈诗一, 2011a)。

《中国能源统计年鉴》数据也显示，2011 年中国工业能源终端消费占能源消费总量的比重接近 70%，上海工业能源消费占能源消费总量的比重约为 55%，而同期来自于工业能源消费的碳排放占上海各大产业部门^②能源消费碳排放总量的比重则超过 61%。可见，无论对于全球、中国，还是上海市而言，工业部门均是能源消费和碳排放的“第一大户”，因此也不可避免地成为了节能减排的首要对象，该部门的碳排放形势及减排效率，对于整体碳减排目标最终能否实现具有举足轻重的影响。因此，对上

^① 按我国产业划分标准将电力和热力供应业也包括其中。

^② 各大产业部门指农业、工业、建筑业及第三产业。

海工业部门能源消费碳排放效率及其影响因素进行深入透彻地理解,有助于抓住碳排放问题的主要矛盾,也应该是合理制定并有效实施减排政策措施的关键所在。

然而,目前专门针对上海工业部门的碳排放情况(尤其是分行业情况)而开展的研究十分稀少,仅见谌伟等(2010)、邵帅等(2010)、Zhao等(2010)和 Shao等(2011)四篇文献开展了一些相关实证考察。其中前三篇文献均采用了计量分析方法。谌伟等(2010)采用了协整检验、VAR模型以及脉冲冲击和方差分解等计量方法,对上海工业碳排放总量与碳生产率的关系进行了动态分析。邵帅等(2010)首次基于改进的 STIRPAT模型和广义矩估计(GMM)对1994-2008年上海工业行业能源消费碳排放的影响因素进行了实证分析,结果显示煤炭消费对碳排放均具有显著的促进作用。Shao等(2011)对上述研究进行了扩展和改进,基于其提出的 ICE-STIRPAT模型和系统 GMM法对1994-2009年上海工业的碳排放的决定因素进行了经验分析,结果显示碳排放与劳均产出之间均呈现出具有两个拐点的倒 N型曲线关系。长期来看,工业增长和煤炭消费是驱动工业碳排放的两个最显著因素,而能源效率和研发强度对于碳排放均具有明显的抑制效应。

与上述三篇文献不同,Zhao等(2010)直接采用了 LMDI分解法对1996-2007年上海工业部门的碳排放进行了因素分解研究,研究发现工业产出是上海工业碳排放的主要驱动力量。容易看出,虽然以上研究对上海工业能源消费碳排放的影响因素开展了一些探索性研究,但现有研究的数据样本最晚更新至2009年,未能对2010年后近几年的相关情况予以反映,因此现有研究还缺乏在近期的经济和政策环境条件下,对上海工业碳排放

的影响因素所开展的详细考察，从而在一定程度上缺乏政策支持的时效性。此外，上述文献主要关注于对上海工业碳排放的测算及影响因素的考察，而对上海工业行业碳排放效率及其影响研究所开展的经验研究尚未见报道。

有鉴于此，本报告以上海工业部门为考察对象，在 1994-2011 年这样一个相对较长的时间跨度范围内，采用 IPCC（2006）的参考方法对上海历年各工业行业的能源消费碳排放进行了准确估算，构建上海工业行业碳排放的面板数据库；进而，采用数据包络分析（DEA）中前沿的考虑非期望产出的 Malmquist-Luenberger 指数法，对上海工业部门不同时期、不同行业的全要素碳排放效率进行了科学准确地测算和分解，进而构建动态面板数据模型并采用被广泛用于处理内生性问题的系统广义矩估计（SYS-GMM）方法，对上海工业碳排放效率的影响因素开展了经验考察；最后，基于经验研究的主要结论，结合上海宏观经济的现实特点并借鉴国外经验，为上海工业的低碳发展提出合理可行的优化路径与政策建议。

本报告旨在通过系统而严谨的实证考察，全面掌握和了解上海工业部门碳排放效率及其演变背后的驱动力量，识别上海碳排放问题的主要矛盾和政策关键点，为上海有的放矢地制定并实施节能减排政策、加速经济转型进程，进而最终实现低碳经济发展目标提供实践指导和政策参考。

二、上海工业能源消费碳排放的估算及特征分析

（一）上海工业能源消费碳排放的估算

1. 碳排放的估算方法与数据来源

本报告选择利用历年《上海工业能源交通统计年鉴》中的工业分行业能源终端消费表所报告的化石能源消费相关统计数据来进行碳排放估算。涉及到的能源种类包括原煤、洗精煤、焦炭、焦炉煤气、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、其他石油制品、其他焦化产品等 15 种。鉴于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》是目前世界各国进行温室气体排放核算的重要依据，本报告采用其在第二卷（能源卷）所提供的参考方法和参数结合我国已公布的相关参数来进行估算。具体的计算公式如下：

$$C = \sum_{i=1}^{15} C_i = \sum_{i=1}^{15} E_i \times NCV_i \times CC_i \times COF_i \times 44/12 \quad (1)$$

其中， $i=1,2,\dots,15$ ，表示能源种类； C 表示能源消费 CO_2 排放总量，单位为万吨； E 为能源消费量，单位为万吨或亿立方米； NCV 为平均低位发热量，即转换因子，单位为千焦/千克或千焦/立方米； CC 为碳含量，表示单位热量的含碳水平，单位为千克/ 10^6 千焦； COF 表示碳氧化因子，即能源燃烧时的碳氧化率，理想状态完全氧化时取值为 100%；44 和 12 分别为 CO_2 和 C 的分子量。我们将 $NCV_i \times CC_i \times COF_i \times 44/12$ 定义为 CO_2 排放系数。公式（1）中各变量、参数的具体定义、单位即数据来源见表 1。碳排放估算所需参数的具体取值见表 2。

表 1

式 (1) 中主要变量和参数描述

变量和参数	符号	单位	含义	数据来源
能源消费量	E	万吨或亿立方米	—	《上海工业能源交通统计年鉴》
低位发热量	NCV	千焦/千克或千焦/立方米	—	《中国能源统计年鉴 2012》附录 4
碳含量	CC	千克/10 ⁶ 千焦	单位热量的含碳水平	IPCC (2006)
碳氧化因子	COF	%	碳的氧化率	《中国温室气体清单研究》

表 2

碳排放估算相关参数取值

能源种类	平均低位发热量	碳含量	碳氧化因子	CO ₂ 排放系数
原煤	20 908	26.052	91.625 6	1.830 0
洗精煤	26 344	25.8	98.0	2.442 3
焦炭	28 435	29.2	92.8	2.825 2
焦炉煤气	16 726	12.1	99.0	7.346 6
其他煤气	16 726	12.1	99.0	7.346 6
原油	41 816	20.0	97.9	3.002 1
汽油	43 070	18.9	98.0	2.925 1
煤油	43 070	19.6	98.6	3.052 0
柴油	42 652	20.2	98.2	3.102 2
燃料油	41 816	21.1	98.5	3.186 6
液化石油气	50 179	17.2	98.9	3.129 8
炼厂干气	46 055	15.7	98.9	2.622 1
天然气	38 931	15.3	99.0	21.621 9
其他石油制品	40 200	20.0	98.0	2.889 0
其他焦化产品	33 453	22.0	92.8	2.504 2

（二）上海工业能源消费碳排放的演变趋势及结构特征

1. 演变趋势

我们将 1994-2011 年上海 32 个行业的碳排放估算结果报告于表 3。我们考虑的 32 个行业分别为为农副食品加工业（S1）、食品制造业（S2）、饮料制造业（S3）、烟草制品业（S4）、纺织业（S5）、纺织服装、鞋、帽制造业（S6）、皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业（S7）、木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业（S8）、家具制造业（S9）、造纸及纸制品业（S10）、印刷业和记录媒介的复制（S11）、文教体育用品制造业（S12）、石油加工、炼焦及核燃料加工业（S13）、化学原料及化学制品制造业（S14）、医药制造业（S15）、化学纤维制造业（S16）、橡胶制品业（S17）、塑料制品业（S18）、非金属矿物制品业（S19）、黑色金属冶炼及压延加工业（S20）、有色金属冶炼及压延加工业（S21）、金属制品业（S22）、通用设备制造业（S23）、专用设备制造业（S24）、交通运输设备制造业（S25）、电气机械及器材制造业（S26）、通信设备、计算机及其他电子设备制造业（S27）、仪器仪表及文化、办公用机械制造业（S28）、其他制造业（包括工艺品及废弃资源和废旧材料回收加工业）（S29）、电力、热力的生产和供应业（S30）、燃气生产和供应业（S31）、水的生产和供应业（S32）。

表 3

上海 32 个工业行业碳排放估算结果 (1994-2011) (单位: 万吨)

分组	行业	1994	1995	1996	1997	1998	1999
高排放组	S20	2363.32	2824.16	2584.59	2536.98	2872.19	3733.1
	S13	63.86	119.56	153.26	158.18	213.84	233.01
	S14	400.19	421.62	480.24	392.05	317.95	279.72
	S16	648.78	565.64	575.15	575.48	587.12	666.63
	S19	205.95	277.16	302.67	258.78	252.36	194.87
	S5	139.52	160.48	127.78	107.35	112.02	97.06
中高排放组	S23	210.43	58.38	46.90	76.53	55.36	48.64
	S25	56.44	54.76	48.3	51.22	38.04	42.75
	S10	30.31	39.98	37.35	39.89	48.45	37.63
	S22	40.59	37.98	30.64	31.80	48.77	41.00
	S17	39.58	64.02	59.03	45.69	62.27	41.31
	S15	40.22	61.62	113.86	42.15	44.48	36.62
中排放组	S29	188.45	194.56	172.83	179.43	10.80	11.01
	S18	46.34	15.74	15.44	17.64	22.22	25.25
	S21	26.06	28.45	31.65	29.59	22.32	21.91
	S2	19.92	37.54	38.61	43.03	37.99	28.14
	S26	25.12	35.85	38.51	37.64	27.53	22.54
	S24	53.24	46.47	44.66	38.49	29.58	28.78
中低排放组	S27	17.36	18.45	26.48	24.39	20.45	22.06
	S1	7.41	26.64	15.72	13.13	30.93	28.73
	S6	4.68	11.64	4.52	7.75	15.9	17.37
	S30	89.60	10.50	32.51	55.05	5.30	130.25
	S8	18.30	12.30	20.60	17.55	10.43	21.47
	S3	12.34	17.74	10.73	12.16	10.30	8.96
低排放组	S31	35.38	1.54	71.62	85.15	0.93	21.89
	S12	6.38	6.97	16.02	11.39	8.04	7.70
	S11	2.98	2.86	7.65	5.96	4.75	3.88
	S7	5.3	4.78	2.53	2.00	3.51	4.5
	S9	3.33	1.92	3.33	3.42	4.47	4.6
	S28	6.00	4.55	7.74	6.95	2.45	2.96
	S4	3.42	3.08	4.70	3.32	2.17	2.99
S32	0.88	0.18	4.62	0.74	0.57	0.82	
总计	-	4811.66	5167.10	5130.23	4910.91	4923.49	5868.14

分组	行业	2000	2001	2002	2003	2004	2005
高排放组	S20	2968.72	2833.84	2678.80	2418.15	2408.48	2692.45
	S13	253.64	980.72	1156.08	1221.89	1450.44	1834.79
	S14	381.67	474.15	385.31	454.67	384.64	401.51
	S16	811.28	25.34	22.32	23.85	14.08	11.81
	S19	231.73	223.76	204.32	220.81	246.55	270.21
	S5	129.35	131.37	119.27	117.79	132.79	117.75
中高排放组	S23	47.30	47.72	52.25	58.47	89.67	84.86
	S25	46.84	49.04	45.56	62.08	60.93	57.97
	S10	41.35	41.38	40.31	40.43	37.13	69.29
	S22	41.44	46.51	38.05	39.39	57.9	54.76
	S17	47.50	42.13	43.45	54.48	60.57	74.60
	S15	34.45	58.86	46.99	46.23	44.86	37.07
	S29	9.11	6.94	6.36	3.76	5.38	6.43
中排放组	S18	22.44	32.64	33.12	34.38	32.89	44.45
	S21	27.65	23.65	24.48	28.67	36.56	33.96
	S2	28.55	33.78	26.67	27.73	35.90	39.05
	S26	26.66	29.93	23.05	28.72	34.64	46.39
	S24	27.64	20.07	11.43	14.80	27.74	14.91
	S27	30.18	31.14	45.51	42.11	46.25	46.68
中低排放组	S1	22.81	26.6	27.52	26.93	25.76	25.09
	S6	17.90	31.48	28.68	28.19	36.98	37.75
	S30	12.04	6.11	4.05	4.45	3.16	20.29
	S8	17.18	40.95	30.46	40.18	19.36	13.25
	S3	12.35	14.22	11.56	13.56	20.56	23.21
	S31	2.01	14.27	0.75	0.79	0.79	3.35
低排放组	S12	11.41	10.54	8.86	11.71	10.57	12.47
	S11	4.62	5.10	5.10	6.20	10.93	9.35
	S7	4.55	3.87	3.89	5.15	9.78	5.43
	S9	2.75	2.34	2.00	1.79	4.33	4.75
	S28	2.21	2.64	1.85	2.01	2.43	2.04
	S4	2.70	3.03	1.57	1.42	1.50	2.36
	S32	0.33	0.35	0.39	0.36	0.45	0.53
总计	-	5320.37	4811.66	5294.49	5130.03	5354.00	6098.80

分组	行业	2006	2007	2008	2009	2010	2011
高排放组	S20	2805.89	3019.18	3013.47	2398.64	3181.01	3289.35
	S13	1878.94	1794.32	1770.28	1667.77	1786.02	1704.93
	S14	1162.87	1286.7	1245.27	1391.67	1817.29	1574.9
	S16	7.59	15.63	6.25	21.85	4.23	4.82
	S19	265.15	242.76	247.60	149.72	421.91	361.88
	S5	106.69	102.93	114.70	90.27	114.31	97.61
中高排放组	S23	97.08	108.19	108.30	118.87	71.41	72.02
	S25	64.53	70.50	71.92	65.34	86.58	96.37
	S10	75.87	76.53	79.40	46.20	123.86	122.70
	S22	60.47	57.80	59.71	63.28	85.15	87.10
	S17	61.09	56.21	54.68	13.00	48.20	44.28
	S15	49.37	42.92	32.54	93.16	27.84	27.16
	S29	7.30	7.30	7.97	10.01	10.38	9.14
中排放组	S18	47.82	42.81	51.32	63.20	69.97	70.94
	S21	44.93	40.88	39.50	100.95	39.20	40.34
	S2	33.64	34.20	34.72	35.36	37.20	35.66
	S26	46.85	33.73	31.81	31.39	27.07	26.61
	S24	13.76	14.34	21.73	23.85	46.85	60.08
	S27	44.37	28.60	16.21	20.70	14.64	16.02
中低排放组	S1	19.97	29.52	29.63	26.00	27.65	28.82
	S6	30.24	34.99	34.79	17.12	32.52	45.44
	S30	7.27	8.43	6.37	7.81	9.48	8.01
	S8	13.16	9.86	10.17	7.50	10.09	13.03
	S3	20.05	19.79	22.01	19.96	19.03	15.99
	S31	2.89	1.21	1.76	16.60	3.75	8.30
低排放组	S12	10.69	9.99	11.41	6.90	8.59	9.22
	S11	8.37	8.79	9.82	18.63	16.81	21.38
	S7	3.63	4.89	4.01	4.43	2.74	3.16
	S9	4.55	4.84	4.59	9.10	5.49	5.57
	S28	2.03	2.28	2.18	2.13	2.10	1.82
	S4	0.95	0.92	1.02	0.84	0.98	1.47
	S32	0.26	0.39	0.48	1.02	0.38	0.59
总计	-	6998.25	5081.13	7211.43	7145.61	6543.27	7904.72

图 5 报告了 1994-2011 年历年上海工业部门整体能源消费碳排放规模及强度的演变趋势。可以看出，工业碳排放整体上呈迂回上升走势，1995、1999、2007 和 2010 年为四个排放高峰；相反，碳排放强度则在波动中呈现出总体下降趋势，仅在 1996、1999 和 2008 年三个年份有小幅反弹。碳排放强度的总体下降意味着碳生产率的提高，说明上海在相对规模上的工业碳减排在近二十年来是卓有成效的，上海的工业化实际上正处于碳排放效率逐渐改善的进程中。

上述结果，在一定程度上表明，上海工业的碳减排过程存在着一定的回弹效应，即指技术进步理论上虽然能够提高资源的利用效率而节约资源，但技术进步与资源利用效率的提高同时也会拉动经济加速增长，从而引致更多的资源需求和消费，最终导致技术和效率改进所节约的资源被额外的资源消费部分或完全抵消（见 Berkhout 等，2000；Greening 等，2000）。

一些文献（如 Ouyang 等，2010；Lin 和 Liu，2012；邵帅等，2013）已经通过经验研究证明，中国的节能减排过程中也存在着明显的回弹效应。为便于观察，我们按照年均排放量以 90、45、25 和 10 万吨为界限，将各行业分为高、中高、中、中低和低排放组五组。

图 6 反映了 32 个行业的分组碳排放演变趋势情况。在各分行业中，黑色金属冶炼及压延加工业的碳排放走势与工业部门整体走势最为接近，同样在 1995、1999 和 2007 年出现了三个高峰，表明黑色金属行业的碳排放走势对工业部门整体的碳排放趋势的形成具有最为关键的影响。

其他大部行业的碳排放呈现出平稳上升态势，而少数几个行业出现了大幅波动的情况，如化学纤维制造业、其他制造业、电力、热力、燃气生产和供应业等。其中化学纤维制造业的碳排在 2000 年后突然大幅下降，由 811.28 百万吨突降至 0.253 4 百万吨，这与其行业规模由 2000 年的 160.7 亿元降至 2001 年的 509 万元有直接关系。而其他制造业、电力、热力、燃气生产和供应业碳排放的大幅波动可主要归因于其能源消费量的大幅波动，比如其他制造业的能源消费量由 1997 年的 95.6 万吨标准煤大幅缩减至 1998 年的 8.6 万吨标准煤，后两者也同样在相应年份出现了能源消费量剧烈变动的情况。

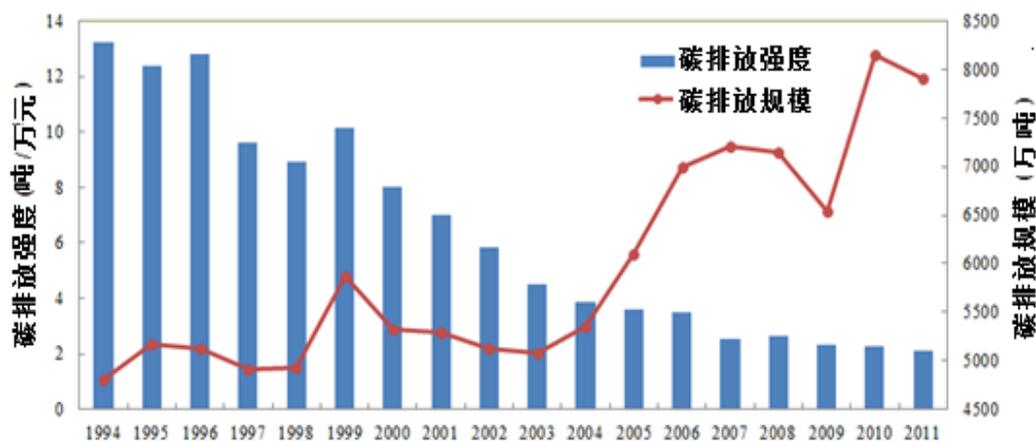


图 5 上海工业部门碳排放规模及强度

数据来源：作者自行计算。

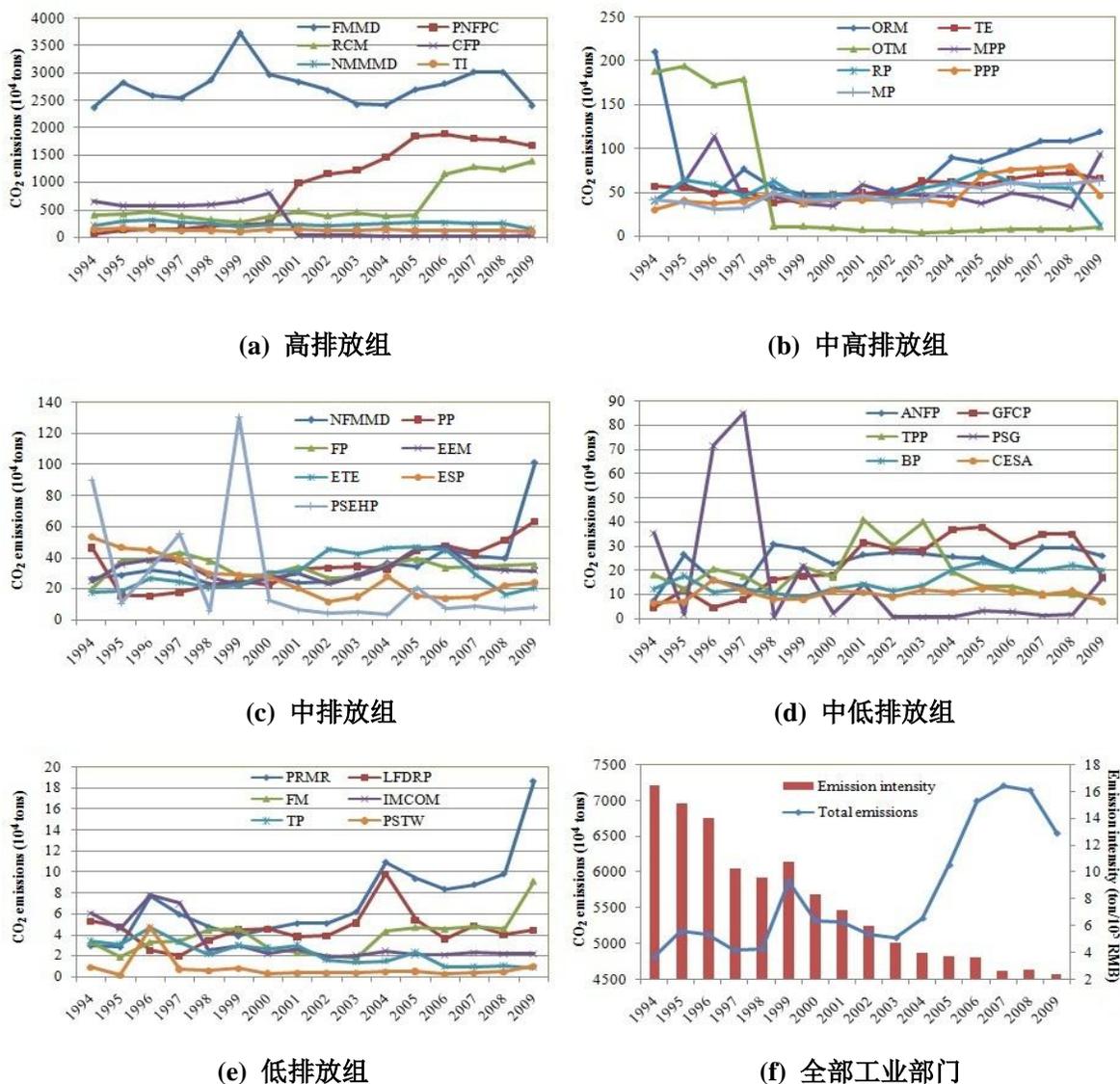


图 6 上海工业行业分组碳排放及全部工业部门碳排放总量逐年走势

2. 结构特征

本报告将考虑的全部 15 种能源消费分为煤炭类、石油类和天然气三大类，图 7 反映了工业行业分组及工业部门整体的三大类能源消费碳排放结构及其逐年演变趋势。

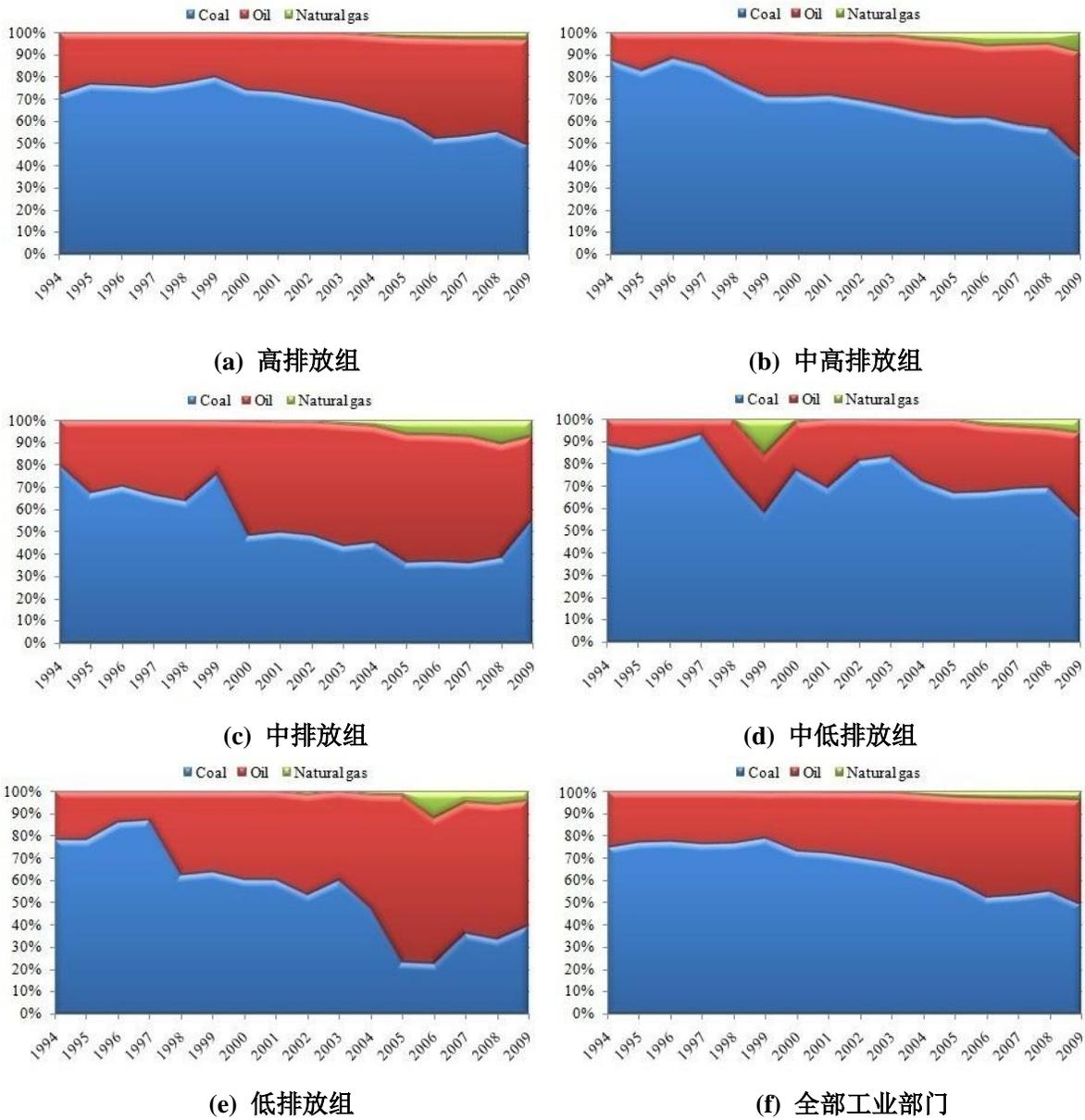


图 7 上海工业行业分组及全部工业部门能源消费碳排放结构

数据来源：作者自行计算。

从 (f) 图反映的工业部门整体情况来看，煤炭类能源消费是工业碳排放的最主要来源，除 2009 年外其比重始终保持在 50% 以上，1999 年最高，达到 78.8%。但从 1999 年开始，煤炭类能源消费碳排放呈现出明显的总体下降趋势，尽管 2006 年至 2008 年间存在小幅的上升。石油类能源

消费作为第二大排放源，其碳排放比重介于 20% 与 48% 之间，并在 1999 年前后分别 呈现出下降和上升趋势，在 2009 年达到 47.4% 的峰值。天然气消费的碳排放比重非常低，在 1999 年之前几乎均接近于 0，1999 年后才开始逐年增加，但比重最高的 2009 年也仅为 3.69%。

高排放组的能源消费碳排放结构在数值和变化趋势上与工业部门整体情况均非常接近，除 2009 年外，其煤炭类能源消费的碳排放也一直在 50% 以上，并于 1999 年达到 79.8% 的峰值，随后开始逐年下降，2006 年至 2008 年间又有小幅上升，其石油类能源消费和天然气消费的碳排放比重与走势也与工业部门相应情况基本一致。这表明工业部门整体碳排放结构的形成在很大程度上取决于高排放组的能源消费碳排放结构。

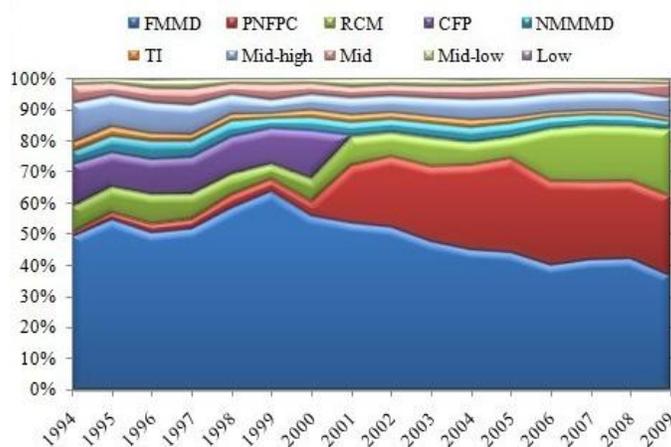


图 8 上海工业行业分组碳排放结构

数据来源：作者自行计算。

中高排放组和中低排放组的碳排放也主要来源于煤炭类能源消费，历年比重均超过 55% (除中高排放组 2009 年比重为 43% 外)，其峰值分别为 1996 年的 88.2% 和 1997 年的 93.1%。中排放组和低排放组的煤炭类能源消费碳排放比重分别于 2001 年和 2004 年后降至 50% 以下，石油类能

源消费碳排放比重也由此升至 50% 以上，成为了此后碳排放的主要来源。天然气消费的碳排放比重虽然依然较小，但与其他三组相比有所提高，其中中排放组于 2008 年达到 11%，而低排放组于在 2006 年达到 12%。

最后，我们还对工业行业分组的碳排放结构进行了统计观察（见图 8）。考虑到高排放组各自的碳排放比重均比较大，为便于分析，我们将其分开与其他四组行业进行了并列报告。

可以看出，整个高排放组的排放比重优势非常显著，基本保持在 80% 以上，在 2000 年达到 89.8% 的峰值，之后一直在 86%-90% 之间小幅波动。其中，黑色金属冶炼及压延加工业的碳排放比重明显高于其他行业，除 2009 年外始终保持在 40% 以上，于 1999 年达到 63.6% 的峰值。石油加工、炼焦及核燃料加工业的碳排放比重在 2000 年前一直在 5% 以下，但 2000 年后开始急剧上升，在 2005 年一度达到 30% 的峰值水平，之后尽管有小幅下降，但也一直保持在 24% 以上，成为了仅次于黑色金属行业的又一“排放大户”。与之演变趋势相反的是化学纤维制造业，其碳排放比重在 2001 年保持在 11% 以上，在 2000 年一度达到 15.3%，但 2001 年却急剧下降至 0.48%，之后呈总体下降趋势，在 2008 年其比重甚至减至 0.09%，这主要可能归因于 2000 年后上海工业产业结构调整政策的实施。上海在 2000 年开始实施了优先发展高技术产业和先进制造业的产业战略和政策，同时对一些产能过剩的产业进行了限制增长政策，这些政策是出台和实施直接引起了包括化学纤维制造业在内的一些传统产业的大范围衰退。此外，导致化学纤维制造业碳排放比重大幅减少的另一个原因是其煤炭类能源消费比重的明显下降。

化学原料及化学制品制造业的排放比重基本走势与石油加工行业比较相似，但变动趋势较之更加平缓，2005年前其比重在4.5-9.5%之间波动，此后其比重呈现出上升趋势，在2009年达到21.3的峰值。非金属矿物制品业与纺织业的排放比重一直比较稳定，分别在2-6%和1.3-3.2%之间波动，而中排放组和中低排放组的情况与之类似，分别稳定在2.8-5.8%和1.3-3%之间。中高排放组的排放比重大体呈下降-上升-下降的趋势，转折点出现在1999年和2004年，峰值和谷值分别为1994年的12.6%和1999年的4.4%。低排放组的排放比重非常小，一直稳定在0.28-0.6%之间。

（三）小结

本章基于IPCC（2006）结合我国相关参数，在全面考虑15种能源产品的条件下，对上海1994-2011年32个工业行业的能源消费碳排放进行了精确地估算，构建了上海工业行业的碳排放面板数据库，并对其演变趋势和排放结构进行了总结分析。结果显示，上海工业部门的碳排放绝大部分来自于高排放组的六大行业，而高排放组的能源消费碳排放结构也在很大程度上决定着工业部门整体碳排放结构的形成，其中黑色金属冶炼及压延加工业作为第一“排放大户”，其碳排放走势与工业部门整体走势最为接近，表明黑色金属行业的碳排放走势对工业部门整体的碳排放趋势的形成具有最为关键的影响；煤炭类能源消费一直是高排放组、中高排放组、中低排放组以及整个工业部门碳排放的最主要来源，天然气消费的碳排放比重非常小，石油类消费近年来已经逐渐成为中排放组和低排放组碳排放的最主要来源。

三、上海工业能源消费碳排放效率的测算及分解

(一) 方法与数据

本章采用 Maimquist-Luenberger 指数法对上海各年各工业行业的全要素碳排放效率增长率进行测算和分解。与前文相同，本章的研究时间跨度为 1994-2011 年的 18 年，行业样本数量为 32 个，其轻重工业分类见表 4 按照前文的分析，对碳排放效率的测算需要用到以下两类基础数据。

表 4 工业行业样本及分类

轻工业	农副食品加工业，食品制造业，饮料制造业，烟草加工业，纺织业，服装及其他纤维制品制造业，皮革、毛皮、羽绒及其制品业，家具制造业，造纸及纸制品业，印刷业、记录媒介的复制，文教体育用品制造业，医药制造业，化学纤维制造业，仪器仪表、文化办公用机械制造业、其他制造业（包括工艺品及废弃资源和废旧材料回收加工业）（共 15 个行业）
重工业	木材加工及竹、藤、棕、草制品业，石油加工及炼焦业，化学原料及化学品制造业，橡胶制品业，塑料制品业，非金属矿物制品业，黑色金属冶炼及压延加工业，有色金属冶炼及压延加工业，金属制品业，通用设备制造业，专用设备制造业，交通运输设备制造业，电气机械及器材制造业，通讯设备、计算机及其他电子设备制造业，电力、蒸汽、热水的生产和供应业，燃气生产和供应业，水的生产和供应业（共 17 个行业）

一是产出数据。本报告选取各行业的工业总产值和碳排放分别作为各行业的期望产出和非期望产出。本报告的工业产出指标使用的是工业总产值。非期望产出碳排放数据来源于本报告第二章的测算。

二是投入数据。本报告选取资本存量、劳动就业人数、能源消耗作为各行业的投入要素。

（二）碳排放效率测算及分解结果与讨论

测算及分解具体结果报告于附录 B。从各行业产出非效率测算结果来看（见图 9），平均而言有色金属冶炼及压延加工业、非金属矿物制品业离最佳生产前沿面最远， $\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t; g^t)$ 的平均值分别为 0.929 2、0.898 2，这说明在既定投入下要达到最佳生产前沿，这两个行业的产值需要分别增加 92.92% 和 89.82%，而碳排放则需要分别减少 92.92% 和 89.82%。烟草制品业和通讯设备、计算机及其他电子设备制造业表现最为优异， $\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t; g^t)$ 的平均值分别为 0.000 8、0.084 7，且 1994-2011 年 18 年间，烟草制品业和通讯设备、计算机及其他电子设备制造业分别有 17 次（1994-1998 年、2000-2011 年）、14 次（1998-2011 年）处在最佳生产前沿面上。此外，仪器仪表及文化、办公用机械制造业也有 9 次处在最佳生产前沿面上。

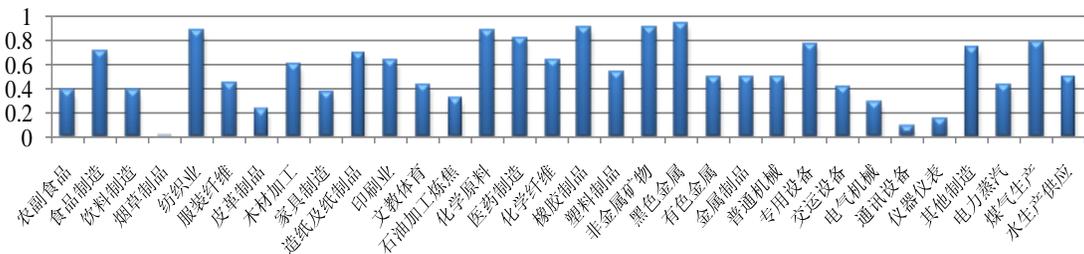


图 9 1994-2011 年各行业产出非效率均值

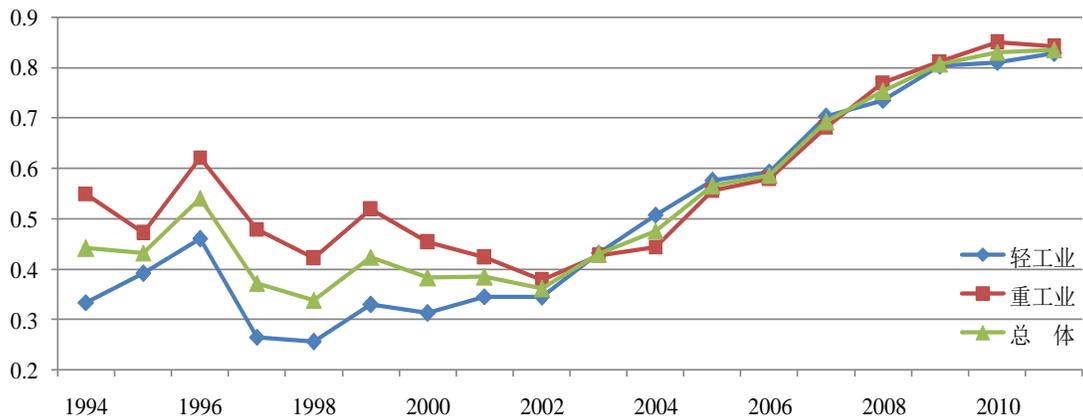


图 10 1994-2011 年轻、重工业产出非效率均值

分轻、重工业来看（如图 10 所示），整体而言，重工业 $\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t; g^t)$ 的平均值较轻工业而言更大，表明在碳排放约束的情况下，重工业离最佳生产前沿较远，产出非效率水平较高，所以重工业应是实现节能减排与工业增长双赢发展的工作重点。然而，近年来轻重工业的产出非效率情况显现出趋同特征，在产出非效率大小上趋于吻合且均呈上升、继而持稳趋势。因为 $\bar{D}^t(x^t, y^t, b^t; g^t)$ 实质是一个相对的量，其增大与决策单元自身效率水平增长过慢、甚至下降，或者生产前沿面过快向前推进有关。近年来，包括上海在内的中国对协调环境与经济发展都予以了充分的重视和实践，对经济增长及减排的目标管理是常见的政府调控手段，在这种背景下，行业整体效率水平的大幅下降的可能性似乎较小。因此，集中于少数行业（而非大多数）的技术水平的较高增长、以至于推进最佳生产前沿面以较快速度扩张是近年来行业产出非效率快速增长的主要原因，即效率的增长赶不上技术进步的速度。对此推测，我们可以在下文对碳排放效率的进一步估算及分解中得到印证。

表 5 和图 11 显示了各行业碳排放效率、效率变化和技术变化指数估计结果的年均值。其中，碳排放效率增长和技术进步率大多大于零，表明在要素投入不变的情况下，上海市大多数工业行业的期望产出有所增加、而非期望产出则有所减少，同时，技术也向着更高的期望产出、更少的非期望产出方向进步。但效率变化率则多为小于零，即投入产出效率下降的行业居多，这意味着上海各行业碳排放效率的改善主要是由于技术进步而非生产效率提高所引起的。这一结果与陈诗一（2010a）针对全国工业数据的研究结论一致，也验证了前文的部分推测。

分行业来看，1994-2011 年间碳排放效率增长平均值位居榜首的是通讯设备、计算机及其他电子设备制造，为 17.73%，说明该行业以最快的速度向获得更高产出且减低碳排放的目标前进，是实现经济“又好又快”发展的成功典范。位居其次的是烟草制品业和电力、蒸汽、热水的生产和供应业，分别为 13.99 和 12.87%。其中烟草制品业碳排放量长期保持较低，1994-2011 年间，在工业产值（2000 年价格）以年均 11.94% 增长的同时，碳排放量却以年均 4.83% 的速度下降；这一对比在电力、蒸汽、热水的生产和供应行业更为强烈，其产出实际增长率为 14.50%，而碳排放却以年均 13.23% 的速度大幅下降，这些行业正是在碳排放约束下实践环境与经济协调发展的典型代表。

年均而言，仅有服装及其他纤维制品制造业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业三个部门的碳排放效率增长是下降的，分别为 -1.22%、-0.19%、-0.016%，表明这些部门的发展模式正与提高产值且降低碳排放的目标背道而驰。由于碳排放效率的测算同时考虑了要素投入、生产总值与碳排放，服装及其他纤维制品制造业碳排放效率增长较低更多

是因为其投入产出效率较低；而非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延加工业两者都隶属重工业部门，均实属碳排放大户，高碳排放量直接导致了其碳排放效率增长为负。因此，上海市要实现节能减排与工业增长的双赢发展，重工业的节能减排应该成为关键所在。

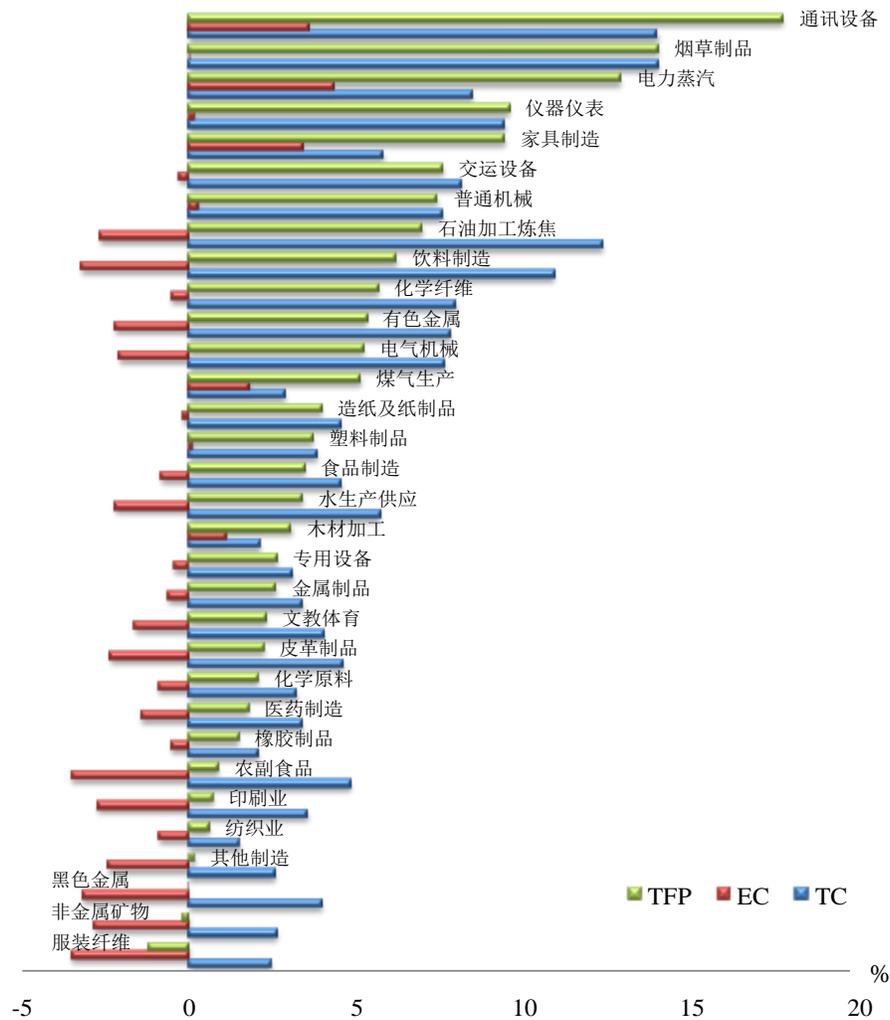


图 11 1994-2011 年分行业碳排放效率及其分解指数的年均值

表 5

1994-2011 年分行业碳排放效率及其分解指数的平均值

行业	碳排放效率	效率变化	技术变化
农副食品加工业	1.0088	0.9650	1.0440
食品制造业	1.0346	0.9917	1.0453
饮料制造业	1.0617	0.9682	1.1069
烟草加工业	1.1399	1.0000	1.0158
纺织业	1.0060	0.9911	1.0151
服装及其他纤维制品制造业	0.9878	0.9649	1.0233
皮革、毛皮、羽绒及其制品业	1.0221	0.9766	1.0266
木材加工及竹、藤、棕、草制品业	1.0304	1.0110	1.0173
家具制造业	1.0942	1.0340	1.0579
造纸及纸制品业	1.0395	0.9981	1.0451
印刷业、记录媒介的复制	1.0070	0.9727	1.0335
文教体育用品制造业	1.0229	0.9838	1.0403
石油加工及炼焦业	1.0694	0.9735	1.0997
化学原料及化学品制造业	1.0206	0.9909	1.0321
医药制造业	1.0177	0.9858	1.0334
化学纤维制造业	1.0565	0.9947	1.0797
橡胶制品业	1.0148	0.9946	1.0206
塑料制品业	1.0370	1.0013	1.0380
非金属矿物制品业	0.9981	0.9719	1.0145
黑色金属冶炼及压延加工业	0.9998	0.9684	1.0953
有色金属冶炼及压延加工业	1.0529	0.9780	1.0691
金属制品业	1.0259	0.9939	1.0333
通用设备制造业	1.0742	1.0030	1.0742
专用设备制造业	1.0262	0.9956	1.0309
交通运输设备制造业	1.0756	0.9971	1.0768
电气机械及器材制造业	1.0521	0.9793	1.0646
通讯设备、计算机及其他电子设备制造业	1.1773	1.0355	1.0269

(续表)

仪器仪表、文化办公用机械制造业	1.0955	1.0018	1.0374
其他制造业	1.0016	0.9759	1.0256
电力、蒸汽、热水的生产和供应业	1.1287	1.0428	1.0802
燃气生产和供应业	1.0510	1.0180	1.0286
水的生产和供应业	1.0337	0.9781	1.0410

(三) 小结

与传统的全要素生产率相比，考虑环境约束的 TFP 能够更好地反映经济增长与环境的协调状况，产出增长且污染减少才堪称有效率的成长方式。本章基于上海市 1994-2011 年 32 个工业行业的面板数据样本，在考虑碳排放约束的条件下，从非参数分析的角度采用 ML 指数法估算了各行业碳排放效率及其分解指数，得到如下主要结论。

技术进步对上海市碳排放效率增长都具有重要作用。诸如电子信息制造这类对技术创新依赖度高的行业，其碳排放效率增长较快，且对生产可能性边界的扩张具有推动作用。因此，通过政策引导，鼓励企业加大研发投入、加速技术创新是极其必要的。技术创新大体可以从几方面着手，以实现创新对能源的替代：一是发展清洁能源，替代传统化石能源；二是提高能源效率，减少单位产出能耗；三是使技术创新成为产业的新增长点，改变传统仅以产出增长为目标的粗放型发展方式。

此外，工业部门整体碳排放效率的变化很大程度上取决于重化工行业能否兼顾产出增长与环境保护。重化工行业是经济增长的重要推动力，同时也是环境污染物排放大户，政策的制定和执行应该特别关注重化工业部门，确保有详尽的环境标准，从审批到生产都严格把关，以防止资本深化、

产业重型化过程中出现污染迅速加剧、加大环境负担的问题。应该说，改善、进而转变重化工行业粗放型的发展方式是实现工业部门碳排放效率持续增长的重要突破口和必经过程。

四、上海工业能源消费碳排放效率的影响因素考察

（一）计量模型设定

参考相关研究，同时结合中国和上海的实际情况，在上海工业碳排放效率影响因素的回归模型构建上，我们对解释变量做出如下选择。

（1）滞后一期的碳排放效率（ CE_{t-1} ）。由于路径依赖是一种常见的经济现象，经济变量的前一期往往会对当期值产生影响，我们通过引入被解释变量的滞后期，对各行业的初始效率水平的差异予以控制，以减少惯性对分析结果产生的偏差。

（2）技术水平。参考 Shao 等（2012）年研究影响碳排放量因素的做法，本报告将技术水平的测度分为投入型变量——研发强度（ RD ）及绩效型变量——能源强度（ EI ）两个部分。其中与科技活动相关的资金支出情况是目前文献衡量技术水平的主要方法之一，涂正革（2008）以自主研发、技术改造及技术引进的经费支出占工业总产值比率衡量三类科技活动的强度，从三个方面证实了技术对环境技术效率（同时考虑期望与非期望产出的全要素生产率）具有显著的影响。囿于数据的可得性，本报告用各行业企业科技开发项目内部支出占工业总产值的比重表征研发强度，并预计其符号系数为正。

（3）资本深化率（ CD ）。资本深化率指的是资本存量与劳动人数的比率，涂正革和刘磊珂（2011）认为人均资本拥有量体现经济的重型化程

度，其值增高，说明经济倾向于资本密集型，而与劳动密集型产业相比，资本密集型产业更有可能是重污染产业。这与我国实际情况是相符的。由于我国重工业化粗放型特点（袁鹏和程施，2011），资本深化程度高的产业部门与环境的不和谐性越明显，这些产业部门在碳排放效率上可能与其他产业存在较大差异，因此有必要考虑资本生化因素。我们将资本存量与劳动人数的比率进行对数化处理，引入模型并预计其符号系数为负。

（4）劳动生产率（*LP*）。本报告以行业工业总产出与劳动人数之比表征行业的劳动生产率，这一因素在以往的相关研究中并没有得到充分重视，本报告将其作为解释变量之一主要出于以下考虑：其一，在其他同等条件下，单位的劳动的产能高低，影响相同劳动投入带来的产出量；其二，劳动生产率的高低，决定劳动要素对包括能源在内的其他生产要素的替代率，以上两者作用的结果是，投入产出比与碳排放量均发生变化，进而影响碳排放效率；第三，劳动生产率的高低很大程度上决定了劳动者收入的水平，而收入水平又与劳动者治理环境的意愿相关（涂正革，2008）^①。与有鉴于此，我们也对劳动生产率进行控制，预计其系数符号为正。

（5）能源消费结构（*ES*）。煤炭是一种高排放、高污染能源，而煤炭类消费是上海工业碳排放的主要来源，1994-2011 期间，除 2009 年外其他年份煤炭类消费碳排放的比重均超过 50%。Zhao 等（2010）、Shao 等（2011）的研究均表明以煤炭消费比重表征的能源结构对上海碳排放量有显著的影响，而调整能源结构成为碳减排的主要推动因素之一。能源消费结构不同的部门，在碳排放量上会有较大的差异，因此，在碳排放效率

^① 涂正革（2008）在分析环境、工业协调性的决定因素时，也考虑了产出劳动比。但与我们的“劳动生产率”定义不同，他将该比率作为测度生活水平的变量。

影响因素的分析中，理应充分考虑行业的能源消费结构。本报告同样以煤炭消费比重作为能源消费结构的衡量指标，并预期其符号系数为负。

以上各变量的定性描述报告于表 6。综上，本报告构建的碳排放效率影响因素分析的具模型如下所示：

$$CE_{it} = \beta_0 + \beta_1 CE_{i,t-1} + \beta_2 RD_{it} + \beta_3 EI_{it} + \beta_4 CD_{it} + \beta_5 LP_{it} + \beta_6 ES_{it} + \eta_{it} \quad (2)$$

其中，碳排放效率 CE 为解释变量；下标 i 、 t 分别代指行业和年份； $\beta_0 \sim \beta_6$ 为待估参数； η 为随机扰动项。

表 6 模型变量定性描述

变量类别	符号	涵义	度量指标及说明	单位	预期符号
被解释变量	CE	碳排放效率	根据 ML 指数法估算得到	%	-
解释变量	CE_{t-1}	碳排放效率	滞后一期	%	-
	RD	研发强度	各行业企业科技开发项目内部支出占工业总产值的比重	%	+
	EI	能源强度	单位工业产值所耗费的能源量	%	-
	CD	资本深化率	对数化的资本存量与劳动人数比率	万元/人	-
	LP	劳动生产率	对数化的行业总产出与劳动人数比率	万元/人	+
	ES	能源消费结构	煤炭消费占总能源消费比重	%	-

（二）数据说明

我们将前文估算得到的 1994-1995 年的碳排放效率作为 1995 年的效率值，以此类推，所以碳排放影响因素分析模型所用的样本就涵盖了 1995-2011 共 17 年 32 个行业截面。

表 7 变量描述性统计

变量	样本容量	均值	标准差	最小值	最大值
<i>CE</i>	544	4.580 2	13.828 4	-49.749 0	90.177 9
<i>RD</i>	544	3.633 6	2.906 5	-13.815 5	7.937 2
<i>EI</i>	544	0.571 2	1.347 6	-13.815 5	4.380 6
<i>CD</i>	544	2.493 2	1.665 8	-2.430 2	10.449 7
<i>LP</i>	544	3.564 0	0.976 0	1.252 8	7.048 1
<i>ES</i>	544	2.517 5	1.436 4	-5.091 0	4.492 5

所有碳排放量、碳排放效率估计所用数据及解释变量均来源于《上海工业能源交通统计年鉴》（1995、1997-2009）、《上海能源统计年鉴》（2010-2012）、《上海工业交通统计年鉴》（2010-2012）以及《中华人民共和国 1995 年工业普查资料汇编：上海卷》。各变量的描述性统计和变量之间的相关系数分别报告见表 7。

（三）估计结果及讨论

本报告采用 SYS-GMM 方法对动态模型进行参数估计，结果报告于表 8。首先，仅考虑碳排放效率滞后一期项和研发强度，接下来我们依次引入能源强度、资本深化率、劳动生产率及能源结构，各变量的符号保持一致且均与预期相符，而且，随着模型的完整化，系数有收敛趋势。

表 8

碳排放效率影响因素分析结果

解释变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
CE_{t-1}	-0.2252 ^a (0.00923)	-0.2324 ^a (0.01325)	-0.2740 ^a (0.01359)	-0.2731 ^a (0.01331)	-0.2681 ^a (0.02055)
RD	0.2922 ^a (0.09986)	0.5878 ^a (0.1967)	0.6410 ^a (0.1283)	0.3119 ^b (0.1340)	0.3795 ^c (0.1877)
EI		-1.9159 ^b (0.8457)	-2.9184 ^c (1.5987)	-4.8097 ^a (1.7248)	-5.4261 ^a (1.7809)
CD			-3.5543 ^b (1.6774)	-13.1353 ^b (5.1192)	-15.2500 ^a (4.5998)
LP				9.2494 ^c (4.7224)	8.4635 ^b (4.0798)
ES					-2.5635 ^a (0.7873)
常数项	1.9018 (2.2052)	1.3456 (2.2624)	12.2897 ^a (3.5459)	4.09592 (6.7620)	14.1321 (8.8164)
估计方法	SYS-GMM	SYS-GMM	SYS-GMM	SYS-GMM	SYS-GMM
参数联合检验 值(P)	718.66 (0.000)	898.34 (0.000)	987.92 (0.000)	681.21 (0.000)	508.44 (0.000)
AR(1) 检验值(P)	-2.69 (0.007)	-2.69 (0.007)	-2.66 (0.008)	-2.51 (0.012)	-2.64 (0.008)
AR(2) 检验值(P)	-1.19 (0.236)	-1.11 (0.266)	-1.48 (0.140)	-1.24 (0.215)	-1.48 (0.138)
Sargan 检验值(P)	379.48 (0.069)	382.12 (0.053)	438.45 (0.160)	493.98 (0.070)	374.14 (0.180)
Hansen 检验值(P)	25.81 (1.000)	23.43 (1.000)	26.11 (1.000)	23.86 (1.000)	22.58 (1.000)
样本容量	544	544	544	544	544

注：系数下方括号内数值为其标准误；a、b、c 分别表示 1%、5%、10% 的显著水平。

同时，各模型的重要检验统计值均通过检验，表明在模型估计中工具变量的选取是恰当的，估计量具备良好性质，拟合结果是可信的。此外，模型 1 至模型 5 中各变量系数符号在整个添加变量进行参数估计的过程中均保持不变，且各系数也比较显著，表明我们的分析结果非常稳健，且所选取的各变量对于碳排放效率增长均具有重要影响。

模型 1 和模型 2 分别为引入表征技术水平两个因素的分析结果。其中，研发强度的影响是显著为正的，与预期相符。不论是从外在压力还是内在推动力来看，一个行业的研发投入占总产值比重越大，说明该行业越依赖于技术创新，对技术要求也越高，可以认为其具备更强的科技创新潜力。

而越依赖于技术或者具备更强的科技创新潜力，不仅有利于能源的高效使用，提高对能源的替代能力，有效降低碳排放量，同时，对于产出增长也具有重要作用，双重作用下可以有效地推动碳排放效率提高。

另一个因素能源强度，其符号显著为负。毋庸置疑，能源强度较高，产出增长必然伴随着较高的碳排放量，而在节能减排与工业双赢发展的模式下，只有产出增长伴随着碳排放量降低的投入产出模式才堪称有效率的生产方式。

这一结果与王兵等（2008）的结论相似，他们考察了人均能源使用量与环境管制下生产率增长之间的关系，也发现两者存在负相关关系。

接下来的模型 3 和模型 4 依次加入了资本深化率和劳动生产率。与现实相符，资本深化程度越高，碳排放效率就越低。对于我国而言，资本深化与考虑环境质量的生产率之间的负相关关系已被许多文献所证实（王兵，2008；涂正革和刘磊珂，2011；袁鹏和程施，2011 等）。重工业化的跃进会推进资本深化进程（袁鹏和程施，2011），资本深化率可以反映重

工业化程度，而陈诗一（2010a）的研究认为本世纪以来我国工业再次急剧重型化正是能耗和碳排放出现再次飙升的主要原因之一。且不论这些部门产值高低，只要伴随着较高程度的污染，那么在同时考虑产值和碳排放量的效率测度中，较高的碳排放量必然会拖累其效率水平。再来看模型4中加入的劳动生产率，与我们先前的判断一致，较高的劳动生产率可以通过增加产出和提高对包括能源在内的其他生产要素的替代率，进而有利于碳排放效率增长。此外，劳动生产率较高同时也意味着劳动者收入水平较高，人们会增加关注环境质量、治理环境污染的意愿（涂正革，2008），因此，会增加在生产环节落实节能减排的积极性，进而有助于环境与工业的协调发展。

最后，我们考察了能源消费结构对碳排放效率增长的影响。煤炭的高排放特点决定了以煤炭为主的能源消费结构，将极不利于环境质量的提高。煤炭投入生产，带来高产出的同时，也产生了严重的环境问题，在考虑非期望产出的效率测度框架中，这显然不是一种有效率的投入产出方式。另外我们注意到，能源消费结构对劳动生产率的影响有一个负向的冲击，可以见得，能源消费结构越依赖于煤炭，那么劳动生产率提高对减排的正面影响就会减弱。

再从系数大小及显著性来看，虽然所有的变量都对碳排放效率产生了显著的影响，但各因素其影响力大小存在差别，且显著水平也不尽相同。总体模型的回归结果显示，除了碳排放效率滞后期稳健的影响外，表征科技水平之一的研发强度因素，其影响力最小且显著性水平也相对降低。实际上，尽管研发对于环境的影响在以往的研究中是不一致的（涂正革，2008；李小平和卢现祥，2010；邵帅等，2010；何小钢和张耀辉，2012；

王瑾和王礼刚，2013），但对上海的研究均表明研发确实能起到降低碳排放的作用（邵帅等，2010；Shao 等，2011），而企业研发活动并非总能达到增加产出和减少碳排放的双重目标可能是研发强度作用较小的主要原因。此外，我们还注意到资本深化率对碳排放效率的影响力最为强烈，表明工业重型化过程中的粗放性是实现节能减排与工业双赢发展亟待解决的关键问题。

（四）小结

本章基于上海市 1994-2011 年 32 个工业行业的面板数据样本，以估算得到的碳排放效率为被解释变量，选取相关变量作为解释变量，对其上海工业碳排放的影响因素进行了实证考察。在考虑碳排放约束的分析框架下，我们得到如下主要结论。

首先，增加研发投入、优化能源消费结构、提高能源效率、提高劳动生产率对上海碳排放效率增长均具有重要作用。其中，加大研发投入、促进技术创新不仅本身可以直接改善碳排放效率，同时也是能源结构优化、能源效率和劳动生产率改进的重要手段。技术创新大体可以从几方面着手：一是使技术创新本身成为产业的新增长点，改变传统仅以产出增长为目标的粗放型发展方式，进而达到产值增加、碳排放减少的目标；二是着力于提高能源使用效率，减少单位产出能耗；三是发展清洁能源，替代传统化石能源，推进太阳能、风能等绿色能源的使用和普及在长远来看是极其有利的，若新能源可以被广泛适用于生产中，那么，相比强制性减少化石能源的使用，能源替代对产出造成不利影响的可能性更小，碳排放效率更容易提高。

其次，尽管我们强调政策的执行必须坚定而严格，但并不意味着对所有行业的政策措施、环境规制水平是均等且高标准的。过强的碳排放约束政策可能会造成不必要的产出损耗，不利于实现节能减排与工业增长双赢的目标。因此，政策的制定应该是循序渐进且具有差异性和针对性的。例如，针对五年规划制定的环境目标可以进一步深化到年度或季度目标；对于服装制造业等传统产业可以着力提高其投入产出效率，淘汰落后产能；而对于非金属矿物制品业、黑色金属冶炼及压延业等高污染物排放的部门，则可主要致力于控制能耗和碳排放水平。

最后，有选择性的引进外资，增强对外资企业技术、尤其是节能生产技术溢出的吸收能力也不失为推进碳排放效率增长的有效途径。“污染天堂”假说在上海工业行业层面并不成立，保持对工业的环境规制、限制和避免高污染投资的进入可以使上海在获得经济增长的同时，尽可能减少环境破坏，从而改善碳排放效率。

五、上海工业低碳发展的政策思路

基于以上主要研究结果，本报告提出如下上海工业低碳发展的政策思路。

1. 构建推动工业低碳经济发展的法律体系

近年来通过学习发达国家经验，我国已经开展了低碳立法工作，但仍处于薄弱状态。对于主要能源的单行法律、高能耗产品能耗限额强制性标准等法律仍然缺位，而在低碳工业发展的初级阶段，法律的强制性力量起着关键的约束作用。因此，我市亟待制定专门针对工业低碳化具体的法律和标准，为工业低碳化有序、规范、全面的展开提供法律保障。

2. 制定科学合理的工业低碳经济发展战略规划，并建立和完善目标管理机制

发展低碳经济符合科学发展观、实现经济社会可持续发展的内在要求，有利于我国抢占未来国际经济竞争的战略制高点。工业部门作为碳排放大户，在实现低碳经济上任重而道远，应予以特别重视。纵观各国的低碳政策，均有明确的节能减排目标。因此，在低碳经济战略下，坚持低碳与发展共进原则，重视战略目标的可行性，且长远目标与中短期目标兼具，以达到有的放矢、循序渐进。上海市应可在五年计划的总体减排指标下，构建和完善目标管理机制，有层次地设定年度指标、季度指标，并按行业细化低碳指标，将其加入各行业的远景发展规划，同时，有必要跟踪执行情况，进而对减排目标进行适时调整，特别是对于石油加工及炼焦业、黑色金属冶炼及压延加工业、化学原料及化学品制造业等高碳排放行业，应制定有针对性、符合实际的减排目标。城市化和工业化快速推进所带来的能源刚性需求的增加，使得中国及上海在短期内直接对碳排放的绝对规模进行控制和削弱并不是特别现实。基于本报告得出的碳排放强度较碳排放规模更易于被调控的结论，努力降低碳排放强度才堪称是实现经济发展与节能减排双重目标的明智之举，而通过提高劳动生产率使相同碳排放水平下的产出规模增加，则可以成为实现上述目标的一种可选的途径。

3. 积极推进工业产业结构优化调整

本报告的实证研究显示，不同产业的碳排放及其效率不尽相同，相应的减排政策和措施也应该区别对待，而产业结构的优化调整应该成为今后减排政策实施的主要着力点。事实上，上海目前已呈现出后工业化时期产

业发展的阶段性特征，进入了发展转型的重要时期。通过产业对外转移实现产业分工重构，已经成为上海产业结构升级的重要途径。因此，在保障经济持续发展的前提下，上海的工业部门未来应该进一步结合自身发展条件的变化，特别是要素成本上升和能源环境容量的限制，推进比较优势转换产业的对外转移，同时重点扶持能耗较低而产业关联度较高的产业（如信息技术产业）发展，并限制能耗较高而产业关联度较低的产业发展（如非金属矿物制品业），以进一步推进工业部门的低碳化调整。

4.大力发展清洁能源，优化能源消费结构

由于受到能源禀赋条件的限制，中国及上海的能源消费仍以煤炭类消费为主，但由于煤炭的碳排放系数明显高于其他能源，因此以煤炭为主的能源消费结构非常不利于低碳经济的发展。虽然中国以煤为主的能源消费结构在短期内难以改变，但长期来看，能源消费结构的优化调整对于工业碳减排，特别是绝对数量上的减排具有重要意义。因此，中国及上海应该积极鼓励发展构建多样、安全、清洁、高效的能源供应和消费体系，通过大力推进风能、太阳能、生物质能、水电等绿色能源的应用和普及，鼓励新能源和可再生能源的开发利用，以有效降低煤炭在能源消费中的比重，才可能从根本上实现工业部门的节能减排发展目标。

5.加大财政扶持力度

（1）增列工业低碳发展支出预算项目。政府预算支出是工业低碳发展资金的根本保证。要确保工业低碳发展资金的稳定，把工业低碳发展资金列入财政预算支出范畴，设为经常性支出，并立法规定其支出额度和增长幅度。

(2) 创建碳基金。创建专门为工业低碳化而用的碳基金，为低碳化提供资金支持。可以效仿英国，以相关的收税作为基金的主要来源。碳基金可以再以下方面发挥作用：为能马上产生减排效果的活动提供资金；资助低碳技术开发；帮助企业提高应对气候变化的能力，向企业、投资人和政府提供与促进工业低碳发展相关的有价值资讯。对于碳基金的管理及运用，需要严格披露，还应建立审查监督环节，确保碳基金运用得当。

(3) 实施促进工业低碳技术创新的采购政策。政府“绿色”采购是指政府购买和使用符合低碳认证标准的产品和服务。政府采购是弥补市场机制不足、保护和激励技术创新的重要手段。利用政府采购创造市场空间，会对低碳技术创新起到极大扶持和促进作用。在实践上，政府应该具有可操作性的采购制度，科学规范地制定政府低碳采购标准、清单和指南，例如规定公共工程项目要采购低碳产品，低碳产品采购占总采购的份额等。

(4) 建立工业低碳发展财政补贴，对企业的环境治理费用、清洁生产、开发和利用新能源、废物综合利用等进行补偿，引导企业生产低碳化。

6.充分利用税收调节手段

税收政策对发展低碳经济起着重要的推动作用，可以效仿英国、日本等国，通过税收减免等优惠政策鼓励企业进行低碳产品的开发和生产，促进工业发展的低碳转型。在缺少宏观政策的干预下，企业的自主减排投资策略将偏离社会最优减排路径。因此，为了最小化碳减排的经济成本，环境管理者应该通过制定相关的财税优惠政策和激励措施，如能效补贴、降低环保贷款利率等，来鼓励企业将碳排放因素纳入投资决策过程，积极引导企业增加节能技术研发投资和设备使用投资，加强税收政策对节能减排

领域的科技研发的推动作用，并将政策优惠的重点从事后鼓励转为事前扶持，以实现其减排成本最小化。

(1) 对有利于工业低碳发展的企业及相关产品给予税收支持，鼓励和吸引企业生产低碳化。例如，对从事低碳技术研发、低碳技术引进或改造的企业给予一定额度税收减免；对企业购置环保设备的投资，可按一定比例实行税额抵免；对投资低碳企业或产业给予退税的优惠政策，以吸引国内外资金投入低碳产业；对低碳技术转让收入、技术转让费的税收进行减免。

(2) 在允许的范围内，围绕工业低碳化发展启动税种调整。例如，规定企业当年发生的用于节能设备、低碳技术或产品研发费用可以在税前据实列支，并可按已发生费用的一定比例税前增列；对单位和人为生产低碳产品服务的技术转让、技术培训、技术咨询等所取得的技术性服务收入，可予以一定的所得税优惠；对企业购入环保节能设备在一定时期内实行投资抵免企业当年新增所得税的优惠政策；对企业购买防治污染的专利技术无形资产允许以此摊销等等。

(3) 健全环境税收政策。上海市可以作为示范区，加快研究并开征环境税、碳税等环保税种，确保环境资源有偿使用。碳税等环保税种不但能建立一套资源开发和环境保护补偿机制，也有利于税收制度的公平与合理。

7.完善低碳金融服务和碳排放交易体系

低碳经济催生了低碳金融，而上海市作为我国金融中心，应充分发挥优势，通过进一步完善金融服务推进工业低碳化进程。

(1) 应该鼓励商业银行把节能减排项目作为贷款重点，推进贷款管理机制创新。货币信贷可对包括节能减排项目生产、碳捕获技术、太阳能等低碳技术予以倾斜。

(2) 可以设立区域性政策性银行，开展绿色信贷。由于商业银行趋利性的特点，难免不能提供较充足的资金，上海市可以建立区域政策性银行，以利息优惠、延长信贷周期等方式给予企业支持。

(3) 扩大直接融资，为工业低碳发展提供资本支持。目前，直接融资手段对低碳经济发展的支持力度相当滞后，加大支持力度刻不容缓。为此，可以鼓励、扶持符合条件的低碳技术开发和应用的企业进入创业板市场，并探索设立面向低碳企业的风险投资基金，为其壮大资本创造条件。

(4) 构建和完善碳交易市场，运用市场手段促进工业低碳发展。例如，可以效仿英国、德国、日本等国实行排污权、碳排放权交易，促进排放的绝对量减少，并可以尝试为构建全国排放交易中心作出努力。

8.加大工业低碳技术创新与推广

发展低碳经济离不开相关科技手段的支持，低碳化倾向的研发投入无疑对于工业企业碳生产率的提高具有重要作用。低碳技术是低碳经济、低碳工业发展的重大挑战，上海市政府在低碳技术创新和推广上应着重做好以下几方面工作。

(1) 上海需要建立起有效的激励机制，来鼓励工业企业加速技术创新、淘汰落后产能，尽快提高能源利用效率，同时优先发展先进适用技术，如节能和提高能效技术、可再生能源和新能源技术、煤的清洁高效利用技术等。

(2) 由于目前我国对于高效环保产品、可再生能源开发等相关的低碳核心技术还不成熟，很多设备和关键技术还需要从发达国家引进，我市作为我国经济中心和引进外资、技术的集聚区，可以从筹建示范项目着手，积极推进与国际大公司合作，通过合作、学习模仿换取技术。

(3) 加大对低碳前沿技术研究的资金投入力度，重视企业在技术创新上的主体地位，建立以企业为主体、产学研相结合的节能减排技术创新与成果转化体系。可以通过资助、扶持基础研究和试验运行的办法来加快低碳材料、低碳技术的自主研发，加大投资可再生能源技术进步，积极推进太阳能和生物质能等可再生能源的应用。新技术的研发和应用需要大量经费支持，但由于低碳技术并不是某一种特定的技术，而是一系列能降低碳排放量的技术措施，这就要求在经费投入上既不可以一哄而上铺摊子，又不可能只专攻某一方面，需要做到点面结合，既安排低碳基础研究的资金，又安排急需的应用研究资金。

9.建立低碳工业试点区

建设示范点区是国外推进低碳经济的重要手法，例如日本政府设定的6个不同规模的“环境规范城市”、丹麦的弗里德瑞克斯港，英国的贝丁顿零（化石）能耗生态社区和试点企业纽卡斯尔啤酒公司，通过示范区的榜样作用，带动了其他地区或企业低碳化发展。我市可以根据自身特点，选取特定的区域或者典型企业建立低碳工业发展示范点，利用这些示范点来加速低碳技术成果的转化运用，进而为上海市、乃至全国低碳工业、甚至低碳经济建设起到示范带头作用。

以低能耗和低排放为基础的低碳经济发展模式，其实质是要提高能源

生产率和优化能源结构，其核心是技术创新和发展观的转变（张坤民等，2008）。上海未来应该紧紧围绕这些影响因素来实施合理的工业节能减排政策，在宏观产业层面推动产业结构和能源结构优化调整，在微观企业层面鼓励低碳技术创新、淘汰落后产能，并在切实提高能源效率和碳生产率的同时通过适当的价格、财税政策抑制回弹效应，才可能从绝对规模和相对强度上为全面实现工业低碳经济发展目标提供充分的政策保障。

参考文献

- [1]Fare.R., Grosskopf.S., Pasurka, C.A. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions[J], *Energy*, 2007, 32(7): 1055-1066.
- [2]He.J, Richard.P, Environmental Kuznets curve for CO₂ in Canada[J], *Ecological Economics*, 2010, 69(5):1083-1093.
- [3]IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion-Highlights (2009 Edition) [EB/OL], (2009-12-18)[2012-04-08].<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>.
- [4]IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R], 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.
- [5]Jalil.A., Mahmud, S.F. Environment Kuznets Curve for CO₂ Emissions: a Cointegration Analysis for China[J], *Energy Policy*, 2009, 37(12): 5167-5172.
- [6]Jorgenson, D. J. Wilcoxon, P. J. Environmental Regulation and US Economic Growth[J], *The Rand Journal of Economics*, 1990, 21(2): 314-340.
- [7]Kuosmanen.T, Bijsterbosch.N, Dellink.R, Environmental Cost Benefit Analysis of Alternative Timing Strategies in Greenhouse Gas Abatement: A Data Envelopment Analysis Approach[J], *Ecological Economics*, 2009, 68(6): 1633-1642.
- [8]Lin.B.Q., Liu.X, Dilemma between Economic Development and Energy Conservation: Energy Rebound Effect in China[J], *Energy*, 2012, 45(1): 867-873.
- [9]Lin.B.Q., Yao.X., Liu.X.Y. The Strategic Adjustment of China's Energy Use Structure in the Context of Energy-saving and Carbon Emission-reducing Initiatives[J], *Social Sciences in China*, 2010, (1): 58-71.
- [10]List.J.A., Co.C.Y, The Effects of Environmental Regulations on Foreign Direct Investment[J], *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000, 40: 1-20.
- [11]Oh.D, Heshmati.A, A Sequential Malmquist-Luenberger Productivity Index: Environmentally Sensitive Productivity Growth Considering the Progressive Nature of Technology[J], *Energy Economics*, 2010, 32(6): 1345-1355.
- [12]Poumanyong.P, Kaneko.S, Does Urbanization Lead to Less Energy Use and Lower CO₂ Emissions? A Cross-country Analysis[J], *Ecological Economics*, 2010, 70(2): 434-444.
- [13]Shao.S, Yang.L.L, Yu.M.B, Yu.M.L, Estimation, Characteristics, and Determinants of Energy-related Industrial CO₂ Emissions in Shanghai (China), 1994–2009[J], *Energy Policy*, 2011, 39(10): 6476–6494.
- [14]Zhang.M, Mu.H, Ning.Y, Decomposition of Energy-related CO₂ Emission over 1991-2006 in China[J], *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2122-2128.

-
- [15]Zhao.M., Tan.L.R., Zhang.W.G., Ji.M.H, Liu.Y, Yu.L.Z, Decomposing the Influencing Factors of Industrial Carbon Emissions in Shanghai Using the LMDI Method[J], *Energy*, 2010, 35(6): 2505–2510.
- [16]陈诗一、严法善、吴若沉：资本深化、生产率提高与中国二氧化碳排放变化——产业、区域、能源三维结构调整视角的因素分解分析 [J]，*财贸经济*，2010年第12期，第111–119页。
- [17]陈诗一：节能减排与中国工业的双赢发展：2009–2049[J]，*经济研究*，2010年第3期，第129–143页。
- [18]陈诗一：中国的绿色工业革命：基于环境全要素生产率视角的解释（1980–2008） [J]，*经济研究*，2010年第11期，第21–34页。
- [19]陈诗一：中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]，*世界经济*，2011年第4期，第124–143页。
- [20]陈诗一：边际减排成本与中国环境税改革 [J]，*中国社会科学*，2011年第3期，第85–100页。
- [21]谌伟、诸大建、白竹岚：上海市工业碳排放总量与碳生产率关系 [J]，*中国人口、资源与环境*，2010年第9期，第28–33页。
- [22]国家气候变化对策协调小组办公室、国家发展和改革委员会能源研究所：中国温室气体清单研究 [M]，北京：中国环境科学出版社，2007年。
- [23]何小钢、张耀辉，中国工业碳排放影响因素与CKC重组效应 [J]，*中国工业经济*，2012年第1期，第26–35页。
- [24]胡晓珍、杨龙：中国区域绿色全要素生产增长差异及收敛分析 [J]，*财经研究*，2011年第4期，第123–134页。
- [25]李伟：上海产业结构调整及产业转移趋势研究 [J]，*科学发展*，2011年第6期，第12–25页。
- [26]李小平、卢现祥：国际贸易、污染产业转移和中国工业CO₂排放 [J]，*经济研究*，2010年第1期，第15–26页。
- [27]刘小玄：中国工业企业的所有制结构对效率差异的影响——1995年全国工业企业普查数据的实证分析 [J]，*经济研究*，2000年第2期，第17–25页。
- [28]单豪杰：中国资本存量K的再估算：1952–2006年 [J]，*数量经济技术经济研究*，2008年第10期，第17–31页。
- [29]邵帅、杨莉莉、曹建华：工业能源消费碳排放影响因素研究 [J]，*财经研究*，2010年第11期，第16–27页。
- [30]邵帅、杨莉莉、黄涛，能源回弹效应的理论模型与中国经验 [J]，*经济研究*，2013年第2期，第96–109页。
- [31]沈能：环境效率、行业异质性与最优规制强度——中国工业行业面板数据的非线性检验 [J]，

中国工业经济，2012年第3期，第56-68页。

[32]涂正革、刘磊珂：考虑能源、环境因素的中国工业效率评价——基于SBM模型的省级数据分析 [J]，经济评论，2011年第2期，第55-65页。

[33]涂正革：环境、资源与工业增长的协调性 [J]，经济研究，2008年第2期，第95-107页。

[34]王兵、吴延瑞、颜鹏飞：环境管制与全要素生产率增长：APEC的实证研究 [J]，经济研究，2008年第5期，第2-15页。

[35]王瑾、王礼刚：进口技术扩散和自主研发对环境规制的影响研究——基于中国工业行业面板数据 [J]，经济经纬，2013年第2期，第49-54页。

[36]吴军：环境约束下中国地区工业全要素生产率增长及收敛分析 [J]，数量经济技术经济研究，2009年第11期，第17-27页。

[37]许和连、邓玉萍：外商直接投资导致了中国的环境污染吗？——基于中国省际面板数据的空间计量研究 [J]，管理世界，2012年第2期，第30-43页。

[38]袁鹏、程施：中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验 [J]，中国工业经济，2011年第2期，第79-88页。

[39]张坤民、潘家华、崔大鹏：低碳经济论 [M]，北京：中国环境科学出版社，2008年。