

工业能源消费碳排放影响因素研究

——基于 STIRPAT 模型的上海分行业 动态面板数据实证分析

邵 帅, 杨莉莉, 曹建华

(上海财经大学 财经研究所, 上海 200433)

摘 要:文章估算了 1994—2008 年上海市工业分行业能源终端消费的二氧化碳(CO₂)排放量,对其演变趋势进行了总结分析,并基于改进的 STIRPAT 模型和广义矩估计方法分别对碳排放规模和强度的影响因素进行了实证分析。结果显示:黑色金属行业作为第一“排放大户”,其排放走势对工业部门整体排放趋势具有关键性的影响;碳排放规模和强度与劳均产出之间分别呈现出 N 型和倒 N 型曲线关系;煤炭消费比重对碳排放规模和强度均具有显著的促进作用,研发强度和能源效率对其均表现出显著的限制作用,而投资规模对碳排放规模和强度分别具有显著的促进和抑制作用;碳排放的变化具有明显的滞后效应,劳均产出和能源效率是对碳排放产生长期影响最强的两个因素。

关键词:碳排放;工业行业;影响因素;STIRPAT 模型;二氧化碳库兹涅茨曲线(CKC)

中图分类号:F062.9;F205 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9952(2010)11-0016-12

一、引 言

为应对全球气候变暖问题,我国政府已于 2009 年底审时度势地提出了控制温室气体排放的行动目标,决定到 2020 年,单位国内生产总值 CO₂ 排放比 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。作为我国的经济中心,上海理应在气候变化缓解与适应行动方面发挥表率作用。自 1992 年起,上海市 GDP 已连续 16 年保持两位数的增长,年均增幅为 12.63%。但在取得骄人成绩的同时,上海经济发展对能源的依赖程度有增无减,2001 年至今上海能源消费年均增长率接近 11%,相应的温室气体排放量也随之大幅增加,节能减排形势不容乐观。

收稿日期:2010-08-20

基金项目:上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZS70);上海市哲学社会科学规划课题(2010BJB011);上海市重点学科建设项目(B802);上海市“晨光计划”(10CG36)

作者简介:邵 帅(1981—),男,黑龙江七台河人,上海财经大学财经研究所助理研究员,硕士生导师;
杨莉莉(1980—),女,黑龙江哈尔滨人,上海财经大学财经研究所博士生;
曹建华(1965—),男,江西大余人,上海财经大学财经研究所教授、博士生导师。

上海的碳排放问题已经引起了一些学者的关注。赵敏等(2009)对上海市1994—2006年的能源消费碳排放^①进行了测算和分析,发现上海的碳排放量逐年增加,而碳排放强度则不断下降。梁朝晖(2009)对1978—2007年上海的能源消费碳排放的历史特征进行了总结,并对2020年的碳排放情况进行了预测。

相关文献主要采用了统计观察等较为简单的分析方法,而运用规范的计量分析方法来对上海的碳排放问题进行深入研究的文献还较鲜见。另外,现有研究均从上海的整体经济层面进行考察,尚未发现针对上海工业部门的碳排放情况(尤其是分行业情况)而开展的专门性研究。众所周知,碳排放与能源消费息息相关,而作为能源消费大户的工业部门则是CO₂的主要排放部门。因此,工业部门对碳减排目标的最终实现具有举足轻重的地位。

与现有研究相比,本文的探索在于:对上海市工业部门的能源消费碳排放进行了较为精确的估算,构建了上海市工业分行业碳排放的面板数据库;基于改进的STIRPAT模型和动态面板数据模型,在对上海市工业碳排放的影响因素进行系统实证分析的同时,还对二氧化碳库兹涅茨曲线(CKC)的类型及拐点情况进行了考察。

二、上海工业行业碳排放估算及排放趋势分析

为得到更全面精确的估算结果,我们全面考虑了除电力和热力外统计资料中报告的其他所有种类的化石能源,能源消费数据来自历年《上海工业能源交通统计年鉴》,涉及的能源包括原煤、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》是温室气体排放核算的重要依据,本文采用其第二卷(能源卷)中的参考方法和参数(主要是我国缺省参数)结合我国已公布的相关参数来进行估算。具体计算公式为:

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

其中: $i=1,2,\dots,15$,表示能源种类; C 为能源消费CO₂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,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/10⁶千焦; COF 为碳氧化因子,即能源燃烧时的碳氧化率;44和12分别为CO₂和C的分子量。

在上述参数中, NCV 主要取自《中国能源统计年鉴2008》附录4, CC 来自IPCC(2006), COF 取自《中国温室气体清单研究》。需要特别说明的是:(1)我国对煤炭产品的统计分类与IPCC(2006)有所不同,IPCC(2006)并未直接报告我国分类中的原煤和洗精煤的相关参数,但考虑到洗精煤的主要用途为

炼焦,因此选取炼焦煤的缺省碳含量作为洗精煤的相应参数;(2)考虑到我国各大类原煤产量的比重多年来变动不大,据《中国煤炭工业年鉴》数据显示,无烟煤、烟煤和褐煤的产量比重分别稳定在 18%、78%和 4%左右,因此对原煤的碳含量和碳氧化因子,均按上述比重进行加权平均处理;(3)在三种未明确细化的能源中,其他石油制品的所有参数、其他煤气和其他焦化产品的碳氧化因子均可直接取自相关资料,而其他煤气和其他焦化产品的碳含量与低位发热量均未见直接报告,对前者我们选取与其较为接近的焦炉煤气的参数代替,对后者我们选取在焦化产品中较有代表性的煤焦油的参数代替。

限于篇幅,我们仅在表 1 中报告了 32 个行业偶数年的碳排放估算值。由于上海的采矿业规模极小,大多数年份化石能源消费量接近于 0,因此我们未将其列入考察范围。为便于观察,我们按照年均排放量以 100、40、25 和 10 为界限将各行业分为高、中高、中、中低和低五类排放组。可以看出,黑色金属冶炼及压延加工业的碳排放量明显高于其他行业,年均排放量达到 2 783.55 万吨,成为第一“排放大户”,大部分行业的碳排放均呈现出总体上升趋势,增长最快的行业为燃气生产和供应业,年均增长率高达 525%。

表 1 上海工业行业 CO₂ 排放量 (单位:万吨;%)

分组	行业	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	年均值	年均增长率
高排放组	S20	2 363.3	2 584.6	2 872.2	2 968.7	2 678.8	2 408.5	2 805.9	3 013.5	2 783.55	2.51
	S13	63.86	153.26	213.84	253.64	1 156.1	1 450.4	1 878.9	1 770.3	885.52	37.40
	S14	400.19	480.24	317.95	381.67	385.31	384.64	1 162.9	1 245.3	564.57	15.43
	S16	648.78	575.15	587.12	811.28	22.32	14.08	7.59	6.25	303.80	-8.76
	S19	205.95	302.67	252.36	231.73	204.32	246.55	265.15	247.60	242.98	2.27
	S5	139.52	127.78	112.02	129.35	119.27	132.79	106.69	114.70	121.12	-0.43
中高排放组	S23	210.43	46.90	55.36	47.30	52.25	89.67	97.08	108.30	79.34	1.78
	S25	56.44	48.30	38.04	46.84	45.56	60.93	64.53	71.92	54.72	2.66
	S29	188.45	172.83	10.80	9.11	6.36	5.38	7.30	7.97	54.51	-7.23
	S17	39.58	59.03	62.27	47.50	43.45	60.57	61.09	54.68	53.77	5.12
	S10	30.31	37.35	48.45	41.35	40.31	37.13	75.87	79.40	49.02	9.39
	S15	40.22	113.86	44.48	34.45	46.99	44.86	49.37	32.54	48.82	5.83
	S22	40.59	30.64	48.77	41.44	38.05	57.90	60.47	59.71	45.79	4.64
中排放组	S2	19.92	38.61	37.99	28.55	26.67	35.90	33.64	34.72	33.30	6.81
	S26	25.12	38.51	27.53	26.66	23.05	34.64	46.85	31.81	32.60	4.06
	S18	46.34	15.44	22.22	22.44	33.12	32.89	47.82	51.32	32.30	5.24
	S21	26.06	31.65	22.32	27.65	24.48	36.56	44.93	39.50	30.68	4.30
	S27	17.36	26.48	20.45	30.18	45.51	46.25	44.37	16.21	30.68	2.80
	S24	53.24	44.66	29.58	27.64	11.43	27.74	13.76	21.73	27.18	-0.86
	S30	89.60	32.51	5.30	12.04	4.05	3.16	7.27	6.37	26.36	195.28
中低排放组	S1	7.41	15.72	30.93	22.81	27.52	25.76	19.97	29.63	23.76	24.91
	S6	4.68	4.52	15.90	17.90	28.68	36.98	30.24	34.79	22.86	26.44
	S8	18.30	20.60	10.43	17.18	30.46	19.36	13.16	10.17	19.68	7.42
	S31	35.38	71.62	0.93	2.01	0.75	0.79	2.89	1.76	16.29	524.78
	S3	12.34	10.73	10.30	12.35	11.56	20.56	20.05	22.01	15.30	7.26
	S12	6.38	16.02	8.04	11.41	8.86	10.57	10.69	11.41	10.28	9.64

续表 1 上海工业行业 CO₂ 排放量 (单位:万吨;%)

分组	行业	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	年均值	年均增长率
低排放组	S11	2.98	7.65	4.75	4.62	5.10	10.93	8.37	9.82	6.42	15.85
	S7	5.30	2.53	3.51	4.55	3.89	9.78	3.63	4.01	4.52	5.28
	S9	3.33	3.33	4.47	2.75	2.00	4.33	4.55	4.59	3.53	9.72
	S28	6.00	7.74	2.45	2.21	1.85	2.43	2.03	2.18	3.36	-1.64
	S4	3.42	4.70	2.17	2.70	1.57	1.50	0.95	1.02	2.34	-2.05
	S32	0.88	4.62	0.57	0.33	0.39	0.45	0.26	0.48	0.76	167.94
总计		4 811.7	5 130.2	4 923.5	5 320.4	5 130.0	5 354.0	6 998.3	7 145.6	5 629.71	3.15

注:S1 为农副食品加工业,S2 为食品制造业,S3 为饮料制造业,S4 为烟草制品业,S5 为纺织业,S6 为纺织服装、鞋帽制造业,S7 为皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业,S8 为木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业,S9 为家具制造业,S10 为造纸及纸制品业,S11 为印刷业和记录媒介的复制,S12 为文教体育用品制造业,S13 为石油加工、炼焦及核燃料加工业,S14 为化学原料及化学制品制造业,S15 为医药制造业,S16 为化学纤维制造业,S17 为橡胶制品业,S18 为塑料制品业,S19 为非金属矿物制品业,S20 为黑色金属冶炼及压延加工业,S21 为有色金属冶炼及压延加工业,S22 为金属制品业,S23 为通用设备制造业,S24 为专用设备制造业,S25 为交通运输设备制造业,S26 为电气机械及器材制造业,S27 为通信设备、计算机及其他电子设备制造业,S28 为仪器仪表及文化、办公用机械制造业,S29 为其他制造业(包括工艺品及废弃资源和废旧材料回收加工业),S30 为电力、热力的生产和供应业,S31 为燃气生产和供应业,S32 为水的生产和供应业。

从工业部门整体情况看,工业碳排放总量呈迂回上升趋势,1995 年、1999 年和 2007 年为三个排放高峰年,而碳排放强度则在 1995—2003 年间呈明显下降趋势,但 2003 年后又开始持续走高。在高排放组中,黑色金属行业的碳排放趋势与工业部门整体趋势比较接近,同样在 1995 年、1999 年和 2007 年出现了三个高峰值,说明黑色金属行业的碳排放趋势对工业部门整体的碳排放趋势具有较为关键的影响。大部分行业的碳排放呈现出平稳上升态势,而少数行业则出现了大幅波动的情况,如化学纤维、其他制造业、电力热力、燃气等。其中化学纤维制造业的碳排在 2000 年后突然大幅下降,这与其行业规模由 2000 年的1 606 841万元下降至 2001 年的50 919万元有直接关系。其他制造业、电力热力、燃气行业碳排放的大幅波动主要归因于其能源消费量的大幅变动,其中其他制造业的能源消费由 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,而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。

三、上海工业行业碳排放影响因素分析

(一)计量模型与指标数据。Dietz 和 Rosa(1994)将 IPAT 等式以随机的形式表示,建立了 STIRPAT(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology)模型:

I=aP^bA^cT^de (2)

其中: I、P、A 和 T 分别表示环境压力、人口规模、富裕程度和技术水平, a 为模型系数, b、c、d 分别为各影响因素的指数, e 为模型误差。

STIRPAT 模型既允许将各系数作为参数来进行估计, 也允许对各影响因素进行适当的分解(Dietz、Rosa, 1994)。根据不同的研究目的和需要, 相关文献往往在上式基础上进行相应的改进以开展各种实证研究。

我们对相关变量也进行了相应的分解和改进。首先, 在本文所研究的工业行业层面, 人口规模显然不再适合作为解释变量出现在模型中, 而投资规模无疑是影响工业行业碳排放的主要因素之一。因此, 我们将人口规模变量替换为投资规模变量 F, 并用固定资产投资来度量, 预期其系数符号为正。

其次, (2) 式中的富裕程度用人均收入 Y 表示(富裕程度在本文中所对应的变量为劳均产出, 即以单位从业人数的工业总产值度量的劳均工业产值)。为了对 CKC 假说进行检验, 我们将其分解为一次方项、平方项和立方项三项, 以期对碳排放与工业产值之间的关系进行更全面的实证考察。

第三, 对技术水平变量, 我们将其分解为投入型变量——研发强度和绩效型变量——能源效率两项。前者由各行业企业科技开发项目内部支出占工业总产值的比重来度量, 表示为 R; 后者由单位能源消费量的工业总产值来反映, 表示为 E。预期二者的系数符号均为负。

最后, 我们还考虑引入了两个与碳排放密切相关的变量。其一, 考虑到各种能源的碳排放强度有所不同, 单位热量燃煤产生的碳排放较石油和天然气分别高出 36% 和 61% 左右。^② 因此, 能源消费结构理应成为碳排放的一个重要影响因素。我们参考林伯强和蒋竺(2009)的做法, 将煤炭消费比重所反映的能源消费结构变量引入 STIRPAT 模型, 表示为 S, 并预期其系数符号为正。其二, 政府的政策导向对相关经济变量无疑会产生不容忽视的影响。我国在“十一五”规划中首次提出了“节能减排”的战略目标, 针对“五年内单位国内生产总值能耗降低 20% 左右, 主要污染物排放总量减少 10%”的目标, 各级地方政府和各部门积极采取行动, 自 2006 年起纷纷出台了一系列相关的政策措施, 这对能源消费及其产生的碳排放必然产生一定程度的抑制作用。为控制和反映这种政策性影响, 我们引入了一个政策虚拟变量 D, 将 2006 年、2007 年和 2008 三年取值为 1, 其他年份取值为 0, 并预期其系数符号为负。

此外, 本文选取碳排放规模——碳排放总量的自然对数(表示为 $\ln TC$)和碳排放强度——单位产值碳排放的自然对数(表示为 $\ln PC$)分别作为被解释变量(在模型中统一表示为 $\ln C$), 以期得到更为全面的分析结果。

这样, 经过改进和对数化处理的(2)式的静态面板数据模型为:

$$\ln C_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 (\ln F_{it}) + \alpha_2 (\ln Y_{it}) + \alpha_3 (\ln Y_{it})^2 + \alpha_4 (\ln Y_{it})^3 + \alpha_5 (\ln R_{it}) + \alpha_6 (\ln E_{it}) + \alpha_7 (\ln S_{it}) + \alpha_8 D + \epsilon_{it} \quad (3)$$

其中: 下标 i 代表行业, t 表示年份, $\alpha_j (j=0, 1, \dots, 8)$ 为待估参数, ϵ 为随机扰

动项。根据系数 α_2 、 α_3 和 α_4 的取值情况可以对 C 与 Y 之间的曲线关系进行判断:(1)若 $\alpha_2 > 0$, $\alpha_3 < 0$ 且 $\alpha_4 = 0$, 则 C 与 Y 之间为倒 U 型关系;(2)若 $\alpha_2 < 0$, $\alpha_3 > 0$ 且 $\alpha_4 = 0$, 则 C 与 Y 之间为 U 型关系;(3)若 $\alpha_2 > 0$, $\alpha_3 < 0$ 且 $\alpha_4 > 0$, 则 C 与 Y 之间为 N 型关系;(4)若 $\alpha_2 < 0$, $\alpha_3 > 0$ 且 $\alpha_4 < 0$, 则 C 与 Y 之间为倒 N 型关系。

(3)式隐含地假定了碳排放会随各影响因素的变化而瞬时发生变化,即不存在滞后效应。但现实情况并非如此理想,包括碳排放在内的环境变量通常具有一定的路径依赖特征,前期情况对当期结果可能存在着不可低估的影响。本文选取的能源消费结构、能源效率等部分影响因素,属于“惯性”较大的经济变量,这些因素的调整往往是长期而缓慢的,而碳排放对这些宏观经济因素的敏感程度在很大程度上也决定了其滞后效应的大小。因此,对碳排放变化的滞后效应进行考察是具有重要意义的。我们可以利用计量经济学中的局部调整模型对上述滞后效应进行一些推导阐释。考虑如下局部调整模型:

$$\ln C_{it}^* = \beta + XZ_{it} + \delta_{it} \quad (4)$$

其中: C_{it}^* 表示碳排放的期望水平, β 为常数项, Z_{it} 为(3)式中 8 个解释变量所组成的向量, X 为其系数向量, δ 为随机扰动项。

碳排放的期望水平可理解为,政府为实现经济发展和环境保护的双重目标所预期实现的最佳碳排放水平,(4)式表明各解释变量的当期值影响着碳排放的期望值。由于存在技术、制度、经济结构等因素的限制,碳排放的期望水平通常不会在短期内迅速实现,而只能通过政府的相关战略行为得到部分调整,使当期水平向期望水平逐渐靠拢。局部调整假设认为,被解释变量的实际变化仅仅是预期变化的一部分,即存在如下关系:

$$\ln C_{it} - \ln C_{i,t-1} = (1-\sigma)(\ln C_{it}^* - \ln C_{i,t-1}) \quad (5)$$

其中: $1-\sigma$ ($0 < \sigma < 1$) 为实际碳排放水平向期望碳排放水平的调整系数,其值越大说明调整速度越快。

(5)式表明,第 $t-1$ 期的实际碳排放水平 $\ln C_{i,t-1}$ 与预期排放水平 $\ln C_{it}^*$ 的差距为 $\ln C_{it}^* - \ln C_{i,t-1}$,而第 t 期的碳排放调整幅度则为 $(1-\sigma)(\ln C_{it}^* - \ln C_{i,t-1})$ 。上述机制恰好可以为我国政府制定预期的减排目标这一现实情况提供很好的反映。将(5)式代入(4)式可推出下式:

$$\ln C_{it} = \beta^* + \sigma \ln C_{i,t-1} + X^* Z_{it} + \delta_{it}^* \quad (6)$$

其中: $\beta^* = (1-\sigma)\beta$, $X^* = (1-\sigma)X$, $\delta^* = (1-\sigma)\delta$ 。 X^* 为短期乘数,反映解释变量 Z 对碳排放的短期影响情况; σ 为长期乘数,反映 Z 对碳排放的长期影响情况; σ 为滞后乘数,表示前一期碳排放水平对当期的影响情况。

对(6)式即本文最终采用的碳排放影响因素的动态面板回归模型,本文采用适用于动态面板模型的系统广义矩估计方法来对其进行参数估计。

本文选择 1994—2008 年上海市 32 个工业行业的面板数据作为研究样本。数据主要来自《上海工业能源交通统计年鉴》(2004—2009)、《中华人民共

和国 1995 年工业普查资料汇编：上海卷》。为保证数据的可比性，我们对工业总产值与固定资产投资均进行了平减处理。

(二)实证结果及讨论。表 2 和表 3 分别报告了以 ln TC 和 ln PC 为被解释变量的分析结果。其中模型 1 为仅包含被解释变量滞后一期而未加入其他解释变量的三次方程形式 CKC 的分析结果，模型 2 至模型 6 依次添加的解释变量分别为投资规模、研发强度、能源效率、能源消费结构、政策虚拟变量。

表 2 和表 3 中报告的 AR 检验和 Hansen 检验结果显示，各模型工具变量的选择均是合理有效的。表 2 和表 3 中结果的最大差别在于：前者中所有模型的参数估计结果均显示碳排放规模与劳均产出之间呈现出 N 型曲线关系，后者中所有模型的参数估计结果则均显示碳排放强度与劳均产出之间呈现出倒 N 型曲线关系。我们将在下文尝试对这种差异的原因进行分析。

表 2 以碳排放规模的自然对数(ln TC)为被解释变量的分析结果

解释变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
ln TC _(t-1)	0.866456 ^a (0.017827)	0.877351 ^a (0.014846)	0.896644 ^a (0.014928)	0.914267 ^a (0.021103)	0.740415 ^a (0.034301)	0.707106 ^a (0.034442)
ln Y	1.129836 ^a (0.234532)	1.370522 ^a (0.266957)	1.422839 ^a (0.325668)	1.031869 ^a (0.261771)	1.920614 ^a (0.661699)	2.849953 ^a (0.843056)
(ln Y) ²	-0.246969 ^a (0.066207)	-0.306487 ^a (0.073459)	-0.333378 ^a (0.086222)	-0.259011 ^a (0.070156)	-0.529848 ^b (0.208204)	-0.819189 ^a (0.270871)
(ln Y) ³	0.017661 ^a (0.005915)	0.021347 ^a (0.006621)	0.024421 ^a (0.007544)	0.022100 ^a (0.006320)	0.052610 ^b (0.021127)	0.081347 ^a (0.027811)
ln F		0.030485 ^a (0.007871)	0.029748 ^a (0.005943)	0.031925 ^b (0.011869)	0.116327 ^a (0.010465)	0.101726 ^a (0.015599)
ln R			-0.143088 ^a (0.031062)	-0.034697 ^b (0.014152)	-0.073092 ^b (0.030933)	-0.076623 ^a (0.024464)
ln E				-0.348990 ^a (0.047525)	-0.541795 ^a (0.081818)	-0.675084 ^a (0.118583)
ln S					0.225682 ^a (0.032787)	0.204728 ^a (0.032568)
D						-0.075702 ^a (0.027396)
曲线类型	N 型	N 型	N 型	N 型	N 型	N 型
拐点 (万元/人)	1.011367 1.014979	1.014707 1.024962	1.018508 1.030980	—	—	—
AR(1) 检验值(P)	-1.83 (0.067)	-1.83 (0.067)	-1.83 (0.068)	-1.82 (0.069)	-1.80 (0.072)	-1.73 (0.084)
AR(2) 检验值(P)	1.16 (0.245)	1.17 (0.243)	1.16 (0.244)	1.20 (0.230)	1.07 (0.283)	1.05 (0.293)
Hansen 检验值(P)	30.63 (1.000)	29.83 (1.000)	28.27 (1.000)	25.97 (1.000)	26.78 (1.000)	23.53 (1.000)

注：系数下括号内数值为标准差；a、b、c 分别表示 1%、5%、10% 的显著水平，下表同。

我们首先对表 2 分析结果进行讨论。可以看到劳均产出的平方项系数显著为负，而其一次方项、立方项则显著为正，说明 CKC 为 N 型。但是其拐点并不明显，两个拐点值比较接近，甚至在加入能源效率变量后完全消失，说明 N 型曲线比较“陡峭”。对照各行业的实际数据看，所有行业均早已越过了第二个拐点，目前正处于 N 型曲线的第三阶段，表明碳排放规模正随着劳均产

出的增加而增加。

值得一提的是,这种 N 型曲线关系与“重组假说”所描述的情形相符。De Bruyn 和 Opschoor(1997)所提出的重组假说认为环境压力与经济增长的分离状态不会长期持续下去,经济发展达到一定水平后会重新组合。环境压力 and 经济增长之间的关系,从长期看呈现一种 N 型关系,而不是倒 U 型。Friedl 和 Getzner(2003)等文献对其提供了实证支持。对重组假说出现的原因主要可解释为以下两点。(1)政策因素:Friedl 和 Getzner(2003)提出能源危机的恢复和环境政策的软弱造成了污染物排放的增加,从而出现环境压力 and 经济增长的重组现象;(2)经济因素:De Bruyn 和 Opschoor(1997)认为在经济迅速发展的同时,减物质化没有受到高度的重视,经济增长率超过了物质强度的减少,从而出现重新组合的情况。就本文而言,我们认为第三阶段出现的原因主要在于后者:在宏观层面,在经济和工业快速发展的背景下,绝对产出水平的提高必然带来能源要素投入及其所产生的碳排放随之增加;在微观层面,在其他生产要素的偏要素生产率保持不变的情况下,劳动生产率的相对提高意味着同样产出水平下包括能源在内的其他生产要素投入数量的相对增加,而其中能源要素投入的增加势必会产生更多的碳排放。

其他各影响因素的系数符号均与预期相符。投资规模和能源消费结构对碳排放规模具有显著的促进作用,而研发强度和能源效率对碳排放规模则具有显著的限制作用。政策虚拟变量的系数显著为负,说明政府的节能减排政策导向和相关措施对抑制碳排放规模是明显有效的。

从表 3 分析结果看,劳均产出的平方项系数一直显著为正,而其一次方项、立方项系数则显著为负,表明 CKC 为倒 N 型。所有模型均存在两个拐点,但两个拐点值同样比较接近,表明倒 N 型曲线也比较“陡峭”。从各行业的实际数据看,所有行业均已越过第二个拐点,目前正处于倒 N 型曲线的第三阶段,表明碳排放强度随劳均产出的增加而呈现出下降趋势,对这一结果我们提出如下解释。碳排放强度的变化方向取决于碳排放绝对水平和工业产出水平之间的相对变化幅度,显然,当前者的增加幅度低于后者时,碳排放强度会趋于降低。虽然表 2 分析结果显示劳均产出具有增加碳排放绝对量的作用,但只要劳动生产率的提高使绝对产出水平提高的幅度超过碳排放增加的幅度,那么就会出现上述的分析结果——劳均产出具有降低碳排放强度的作用。

从其他影响因素的情况看,除投资规模外,其他变量的系数符号均符合预期。由模型 6 的分析结果可知,科技支出占工业产值比重和单位能源消费工业产值每增加 1%,碳排放强度分别减少约 0.09% 和 1.07%,均大于表 2 中的相应水平,说明通过技术手段对碳排放强度的控制较对碳排放规模的控制更加有效;煤炭消费比重每增加 1%,碳排放强度增加约 0.22%,这与表 2 中的相应结果差别不大;2006—2008 年政府的政策使碳排放强度降低了约 0.15 个百分点。值

表 3 以碳排放强度的自然对数(ln PC)为被解释变量的分析结果

解释变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
ln PC _{t-1}	0.805572 ^a (0.013887)	0.912928 ^a (0.016648)	0.926394 ^a (0.020962)	0.696712 ^a (0.024922)	0.655344 ^a (0.025256)	0.608202 ^a (0.038286)
ln Y	-2.426576 ^a (0.642280)	-3.819561 ^a (0.911502)	-2.654492 ^b (1.064755)	-3.656350 ^a (0.594869)	-3.172083 ^a (1.091440)	-3.695457 ^a (1.216343)
(ln Y) ²	0.795875 ^a (0.192664)	1.168123 ^a (0.255289)	0.940942 ^a (0.309243)	1.087180 ^a (0.186280)	0.995697 ^a (0.299292)	1.113255 ^a (0.325067)
(ln Y) ³	-0.083211 ^a (0.018672)	-0.114195 ^a (0.023123)	-0.100419 ^a (0.028666)	-0.102059 ^a (0.018333)	-0.093251 ^a (0.026566)	-0.100473 ^a (0.028046)
ln F		-0.018251 ^c (0.009047)	-0.032752 ^b (0.012827)	-0.049254 ^a (0.017468)	-0.040141 ^c (0.023452)	-0.040265 ^c (0.021037)
ln R			-0.190101 ^a (0.041874)	-0.254217 ^a (0.041992)	-0.156263 ^a (0.037056)	-0.085533 ^c (0.045714)
ln E				-1.020457 ^a (0.077149)	-0.975057 ^a (0.061815)	-1.068757 ^a (0.077374)
ln S					0.201508 ^a (0.016339)	0.221993 ^a (0.019770)
D						-0.148523 ^a (0.024585)
曲线类型	倒 N 型	倒 N 型	倒 N 型	倒 N 型	倒 N 型	倒 N 型
拐点 (万元/人)	1.170179 1.271499	1.375917 1.618084	1.215651 1.450126	1.292197 1.505907	1.207227、 1.445958	1.257084、 1.556311
AR(1) 检验值(P)	-1.86 (0.062)	-1.72 (0.086)	-1.89 (0.059)	-1.75 (0.081)	-1.70 (0.089)	-1.68 (0.093)
AR(2) 检验值(P)	1.33 (0.185)	1.13 (0.260)	1.21 (0.226)	1.27 (0.205)	1.04 (0.298)	1.07 (0.287)
Hansen 检验值(P)	31.49 (1.000)	30.16 (1.000)	29.55 (1.000)	30.03 (1.000)	29.36 (1.000)	28.91 (1.000)

得注意的是,投资规模对碳排放规模和碳排放强度表现出截然不同的影响效果,固定资产投资规模每增加 1%,可使碳排放规模增加约 0.1%,但同时碳排放强度降低约 0.04%。我们认为合理的解释是:投资规模的增加必然会使工业企业的生产规模随之增加,使其更多地消费化石能源而增加碳排放的绝对水平,因此,规模经济的优点在碳排放方面并不适用;但企业在生产设备等固定资产方面的投资,通常会加速生产技术的改进或更新,而这种技术的改进和更新通常是朝着提高生产率的方向开展的,因此投资规模的扩大最终通常会提高包括能源要素在内的各种生产要素的单位产出水平(即要素生产效率),同劳均产出对碳排放强度的影响类似,一旦这种要素(尤其是能源要素)生产效率提高所带来的产出水平的增加幅度大于碳排放的增加幅度,那么投资规模的扩大就有可能对碳排放强度产生削弱效应。可见,资本设备的更新所带来的技术改进和更新换代是影响企业碳排放强度的一个关键因素。

最后,我们对碳排放变化的滞后效应和各变量的碳排放长期影响进行探讨。由表 2 和表 3 中的结果可知,碳排放规模和强度滞后一期的系数均在 1%的水平上显著为正,这为前文提出的碳排放变化具有滞后效应的理论推断提供了很好的证明,表明碳排放的变化是一个连续积累的渐进调整过程。

表 4 结果为利用等式 $X^* = (1 - \sigma)X$ 计算得到的各变量的长期乘数 X 的值。容易看出,各变量对碳排放的长期影响方向与短期影响一致,但影响程度更大。从数值上看,无论对碳排放规模还是碳排放强度,长期影响最强的两个因素均是劳均产出(一次项)和能源效率,其次是能源消费结构,而对碳排放规模和强度影响程度最小的因素分别是政策效应和投资规模。这说明工业经济增长是碳排放的最主要原因,而能源效率对控制和降低碳排放则最为有效。通过横向比较可知,能源效率和政策效应对排放强度的长期控制效果较排放规模更加有效。如前文所述,碳排放变化滞后效应的大小在很大程度上取决于表 4 中各变量对其产生的长期影响效果。从长期效应下的拐点情况看,碳排放规模与劳均产出之间的 N 型曲线不存在拐点,这与表 2 中模型 6 的结果一致;碳排放强度与劳均产出之间的倒 N 型曲线的两个拐点之间距离较大,说明长期倒 N 型曲线与短期相比变得更加平缓。对照各行业的实际数据,我们发现除了水的生产和供应业(2008 年的劳均产出为 11.12 万元/人)外,其他行业均已越过第二个拐点,这与表 3 所反映情况基本吻合。

表 4 各变量对碳排放的长期影响系数(即长期乘数 X 值)

被解释变量	$\ln Y$	$(\ln Y)^2$	$(\ln Y)^3$	$\ln F$	$\ln R$	$\ln E$	$\ln S$	D	拐点 (万元/人)
$\ln TC$	9.7303	-2.7969	0.2777	0.3473	-0.2616	-2.3049	0.6990	-0.2585	—
$\ln PC$	-9.4320	2.8414	-0.2564	-0.1028	-0.2183	-2.7278	0.5666	-0.3791	4.4392、17.8400

四、结论与政策含义

通过对工业行业碳排放情况的统计观察,我们发现:工业部门整体和大部分行业的碳排放均呈现出总体上升趋势;增长最快的行业为燃气生产和供应业;黑色金属行业作为第一“排放大户”,其排放走势对工业部门整体的排放趋势具有关键性的影响。计量分析结果则显示:碳排放规模和强度与劳均产出之间分别呈现出比较“陡峭”的 N 型和倒 N 型曲线关系,所有行业均已越过了第二个拐点,目前均处于 N 型和倒 N 型曲线的第三阶段;煤炭消费比重对碳排放规模和强度均具有显著的促进作用,而研发强度和能源效率对碳排放规模和强度则表现出显著的限制作用,但固定资产投资所反映的投资规模对碳排放规模和强度产生了截然不同的影响,分别表现出显著的促进和抑制作用,2006 年后政府节能减排政策的实施对抑制碳排放规模和强度均具有明显的效果;碳排放的变化是一个连续积累的渐进调整过程,具有明显的滞后效应;劳均产出和能源效率是对碳排放产生长期影响最强的两个因素。

由此得到以下政策含义。首先,本文的分析结果表明碳排放与经济发展之间并非必然经历先上升后下降的常规的倒 U 型 CKC 过程,CKC 可能会表现得更为复杂,这种观点已经得到了很多文献的支持,很多学者将这种非常规现象归因于 CO_2 较其他污染物具有更强的外部性,这从一个侧面说明了与其

他污染物排放相比,CO₂ 排放与经济的协调发展更需要依靠人为的干预和控制,亟待政府通过制定实行相关政策措施、加大碳排放的监管力度并建立完善的节能激励机制,使能源和环境成本内部化,使 CKC 的形状变得更加可控。其次,城市化、工业化快速推进所带来的能源刚性需求增加使得我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,因此,努力降低碳排放强度才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途径。第三,应通过有所区别的行业减排政策和措施,对工业部门的产业结构进行优化调整升级,对高排放行业,尤其是黑色金属行业的能耗和排放水平进行限制,同时鼓励低排放行业的发展,这对缓解上海市的节能减排压力无疑将起到比较显著的作用。第四,碳排放影响因素的分析结果说明减排政策是有为的。从本文的分析结果看,能源效率对控制碳排放最为有效,而能源效率的提高在很大程度上依赖于技术水平的提高,发展低碳经济离不开低碳技术等相关科学技术的支持。上海虽然在能源强度的控制方面已经取得了较大进步,但与国际先进水平相比还存在较大差距。因此,还有待于依靠政策引导来鼓励企业加强技术创新,淘汰落后产能,多使用先进的节能设备,来进一步提高能源利用效率。最后,在能源刚性需求难以降低的背景下,能源消费结构的优化调整对工业碳减排、特别是绝对量的减排具有重要意义。因此,政府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,推进风能、太阳能等绿色能源的应用和普及,努力降低煤炭在一次能源消费中的比重,这样才可能从根本上实现低碳经济发展目标。

注释:

①为便于表述,如无特殊说明,本文中的“碳排放”即指 CO₂ 排放量。

②本数据来源于 <http://www.ccchina.gov.cn/cn/NewsInfo.asp?NewsId=3989>。

参考文献:

- [1]曹建华.上海市控制和降低二氧化碳排放强度 2020 年行动目标测算与分析[J].科学发展,2010,(5):35—43.
- [2]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.
- [3]李国志,李宗植.中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究[J].中国人口、资源与环境,2010,20(5):22—27.
- [4]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,(1):15—26.
- [5]林伯强,蒋竺均.中国二氧化碳的环境库兹涅兹曲线预测及影响因素[J].管理世界,2009,(4):27—36.
- [6]梁朝晖.上海市碳排放的历史特征与远期趋势分析[J].上海经济研究,2009,(7):79—87.
- [7]赵敏,张卫国,俞立中.上海市能源消费碳排放分析[J].环境科学研究,2009,22(8):984

—989.

- [8]De Bruyn S M, Opschoor J B. Developments in the throughout-income relationship: Theoretical and empirical observations[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(3): 255—268.
- [9]Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. *Human Ecology Review*, 1994, 1(2): 277—300.
- [10]Friedl B, Getzner M. Determinants of CO₂ emissions in a small open economy[J]. *Ecological Economics*, 2003, 45(1): 133—148.

Study on Influencing Factors of CO₂ Emissions from Industrial Energy Consumption: An Empirical Analysis Based on STIRPAT Model and Industrial Sectors' Dynamic Panel Data in Shanghai

SHAO Shuai, YANG Li-li, CAO Jian-hua

(Institute of Finance and Economics, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China)

Abstract: The paper estimates CO₂ emissions of Shanghai's industrial sectors from the angle of terminal energy consumption from 1994 to 2008, and analyzes its evolution trend. Based on improved STIRPAT model and GMM, it also carries out an empirical analysis of the influencing factors of CO₂ emissions' scale and intensity. The results reveal that ferrous metal industry is the largest source of CO₂ emissions, and its emission trend plays a key role in the emission trend of the whole industry. The curve relationship between output per capita and CO₂ emissions' scale and the one between output per capita and CO₂ emissions' intensity are featured by N-shape and inverted N-shape respectively. Coal consumption proportion has an remarkably positive effect on CO₂ emissions' scale and intensity, and R&D intensity and energy efficiency has a obviously negative effect on CO₂ emissions' scale and intensity. Investment scale has a positive effect on CO₂ emissions' scale, but a negative effect on CO₂ emissions' intensity. The change of CO₂ emission has an obviously lagged effect, and output per capita and energy efficiency are two strongest influencing factors of CO₂ emissions on the long term.

Key words: CO₂ emission; industrial sector; influencing factor; STIRPAT model (CKC)

(责任编辑 许 柏)