

# 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)<sup>\*</sup>

陈诗一

**内容提要:** 本文基于方向性距离函数对改革以来中国工业全要素生产率进行了重新估算,发现正确考虑环境约束的实际全要素生产率比传统不(正确)考虑环境因素的估算值低了很多,与主要文献结果对比也佐证了这一发现。本文还发现,改革以来中国实行的一系列节能减排政策有效地推动了工业绿色生产率的持续改善,特别是从90年代中期到本世纪初,中国工业绿色生产率增长最快并达到顶峰,且重工业生产率、效率和技术进步增长首次全面超过轻工业,初步彰显环境政策的绿色革命成效。虽然2002年以后重化工业膨胀暂时恶化了工业生产率,但是基于国家对节能减排与发展新能源和低碳技术的高度战略重视,中国新一轮绿色工业革命为期不远。

**关键词:** 绿色工业革命 方向性距离函数 环境全要素生产率

## 一、引言

自从索罗的开创性工作以来,作为投入要素之外驱动经济增长的重要引擎,全要素生产率已经越来越多地被引入新古典增长核算分析,而且投入要素和全要素生产率对产出增长贡献的此消彼长更成为判断发展方式转变的主要依据(Solow, 1957; Kim & Lau, 1994; Knugman, 1994; Young, 1995)。<sup>①</sup>

然而,长期以来,文献中对生产率的度量只基于传统的资本和劳动要素,很少考虑到与可持续发展息息相关的能源和环境因素,这就对生产率度量的准确性和可持续分析的可靠性带来了疑问。事实上,能源和环境因素对产出的影响巨大,中国经济高速增长长期以来就是通过高投资、高能耗和高污染排放取得的,这在工业部门表现尤为明显。改革开放以来,只占GDP 40.1%的工业却消耗了全国67.9%的能源,排放出全国二氧化碳的83.1%(陈诗一, 2009)。2002年后,中国工业再次重型化,能耗和碳排放出现前所未有的飙升(如图1所示)。因此,本文工作之一就是要考察能源和环境约束对工业全要素生产率的影响。本文的主要任务是评估节能减排等环境政策的执行对中国经济的实际影响。

正如陈诗一(2009)指出的,文献中通常把能源消耗作为具有中间投入性质的新的投入要素来处理。而对环境污染变量的处理要复杂得多。起初,许多文献把污染排放也作为投入要素来处置,

<sup>\*</sup> 陈诗一,复旦大学中国社会主义市场经济研究中心,邮政编码:200433,电子信箱:shiyi.chen@fudan.edu.cn。作者感谢上海市哲学社会科学规划一般课题(2009BJB028)、上海市重点学科建设项目(B101)、复旦大学985国家哲学社会科学创新基地“中国经济国际竞争力研究”课题、教育部人文社会科学研究一般项目(09YJA790046)和重点研究基地重大项目(2009JJD790011)对本研究的资助!感谢匿名评审人的建议和意见,文责自负。

<sup>①</sup> 这些研究认为,基于投入要素持续扩张的粗放型增长方式不可持续,只有全要素生产率不断增进的集约型增长模式在长期才是可持续的。可以根据要素和生产率的增长贡献份额大小来进行发展方式转变的判断。

与资本、劳动或者能源投入一起引入生产函数。后来，有些研究者发现了污染排放的产出特征，不再将其视作投入要素，而是作为生产过程的副产品来处理，如 Färe et al. (1994) 基于谢泼德距离函数的径向 DEA 分析。不过这时研究者还没有考虑到污染排放的负外部性，仍然把它和好产出同样对待。正如 Nanere et al. (2007) 所指出的，不考虑环境因素或者不能正确考虑环境因素给生产率度量带来有偏的结果。直到 Chambers et al. (1996) 和 Chung et al. (1997) 提出了基于方向性距离函数 (Directional Distance Function, DDF) 的环境规制行为分析模型 (Activity Analysis Model, AAM)，污染排放才不仅被看作副产品，而且被看作具有负外部性的非期望产出，和期望产出一一起引入生产过程，从方法论上第一次比较合理地拟合了环境因素在生产过程中的制约作用，并使得捕捉环境规制的真实经济效应成为可能。该方法随即被广泛使用，如 Färe et al. (2001)、Boyd et al. (2002)、涂正革 (2008) 和王兵等 (2010)。

本文将遵循上述能源和环境研究方法论的演化历程，在使用产出距离函数统一分析框架并把能源作为投入处理的前提下，分别基于环境污染变量的四种处理方法来度量中国工业近 40 个两位数行业在 1980—2008 年间的生产率变化及其分解，以探讨环境约束和环境规制行为下绿色生产力演进情况及其对新型工业化的影响。环境变量的四种处理方法（即模型 1—4）分别为不考虑排放因素、排放变量作为自由处置的投入要素、排放作为与工业总产值一样自由处置的期望产出以及排放作为弱处置的非期望产出来处理。其中第 1 个模型为生产率文献中传统使用的处理方法。第 4 个模型采用基于方向性距离函数的行为分析模型和曼奎斯特—鲁恩博格生产率指数 (Malmquist-Luenberger Productivity Index, MLPI)，为本文的目标方法，该方法将会给出真实生产率度量。

接下来的结构安排如下：第二节综述对中国经济整体特别是工业部门进行生产率度量的主要文献；第三节介绍本文使用的数据以及基于方向性距离函数的环境规制行为分析模型和生产率指数计算方法；第四节对本文所度量的绿色工业生产率结果进行解释，并特别分析环境政策的绿色工业革命效应在中国是否存在及其变化模式；结论性评论将在第五节给出。

## 二、文献综述

改革开放以来，中国经济创造了一个又一个奇迹，对此进行生产率分析的文献也层出不穷，它们从不同的视角来探讨生产率变化及其对中国经济增长的影响。这些文献的主体是利用总量时间序列数据从总量生产函数的角度来对中国经济整体或者某产业的生产率进行估算。

本文主要关心的是专门针对中国工业部门的生产率核算。陈宽等 1988 年的研究开创了中国特色工业生产率研究的先河 (Chen et al., 1988)，其后该领域生产率研究的文献大量涌现，超过了其他任何领域。这些文献有的关注中国工业全行业的生产率变化，如胡永泰 (1998)、Bosworth & Collins (2008)、Jefferson et al. (2008)；有的则关注国有和集体工业（包括乡镇工业），比如 Wu (1995)、Jefferson et al. (2000)、王小鲁 (2000)、张军等 (2003)；有的主要分析轻重工业情况，如 Zheng et al.

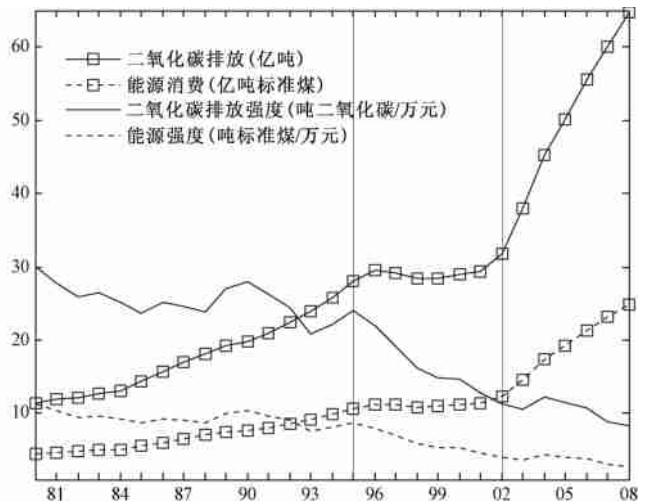


图 1 中国工业的能源消耗、二氧化碳排放及其强度变化趋势(1980—2008)

(2003)、张军等(2009);还有研究大中型工业企业的如涂正革和肖耿(2005);有的则研究地区工业发展,如蔡昉等(2009)。从使用的生产率估算方法来看,有索罗残差法、CD生产函数(或超越对数函数)回归法、随机前沿生产函数法和非参数确定性前沿生产函数法(即DEA方法)不等。这些文献中所使用的数据大部分是工业总量时间序列,然而,正如Jorgenson et al(2000)、郑京海和胡鞍钢(2005)指出的,工业总量数据和总量生产函数不足以刻划工业增长的全貌,增长在不同行业或地区间很不相同,必须使用信息量更大的行业或省级面板数据来进行生产率核算。从文献来看,已经使用工业分行业数据进行生产率估算的文献有黄勇峰和任若恩(2002)、李小平等(2008)、张军等(2009)等;有些文献还进一步使用了工业企业数据进行生产率分析,如Jefferson et al.(2008)、蔡昉等(2009)。考虑到工业企业数据只能获得1998年后的序列,不足以涵盖分析整个改革开放期间的工业生产率变化模式,本文将基于1980—2008年的工业分行业数据库进行生产率核算分析。文献中对工业生产率的估算结果也大相径庭,从Jefferson et al.(2000)所估算的1992—1996年期间的一1.1%的TFP增长到刘小玄和吴延兵(2009)估算的几乎前所未有的51.8%的高增长率不等,本文将在生产率结果分析部分把现有文献中的估算值与本文估算结果进行部分对比分析。

前述所有文献在估算生产率时使用的投入数据都是资本和劳动要素,至多再加上一个中间投入,也就是说,它们几乎都没有涉及能源特别是环境因素的讨论。我们知道,当企业在生产所期望的产出时,几乎不可避免地要同时生成诸如废气、废水和固体废物之类的非期望产出,环境质量会随着经济增长而不断恶化,给整个经济带来显著的外部成本。因此,必须考虑能源和环境污染约束对生产率增长可能带来的负面影响,必须分析节能减排和环境规制有没有可能带来生产率和生产率同时提高的双赢发展,这才是本文的主要工作。在有关中国生产率分析的现有文献中,只有少数几篇涉及到了能源或环境因素。比如,陈诗一(2009)在引入能耗和二氧化碳排放要素后,估算得到石油和天然气开采业在整个改革期间的TFP平均增长率最低(-8.6%),而计算机、电子与通信设备制造业的TFP平均增长高达12.2%。涂正革和肖耿(2009)的研究发现随着产业环境结构优化和环境全要素生产率的提高,中国工业生产力快速提升,工业增长模式逐步转变,环境约束对经济增长的抑制在逐渐下降。王兵等(2010)发现了环境全要素生产率与市场全要素生产率变化的背离趋势,这表明了我国节能减排任务的艰巨性。可见,近年来国际上越来越多地采用方向性距离函数模型来考察环境约束和环境规制对生产率度量的影响,这样估算得到的绿色TFP更具生产经济学含义(胡鞍钢等,2008),因此,本文将采用该方法来估算绿色生产率。

### 三、数据和方法

#### (一)数据

本文绿色生产率估计所基于的中国工业38个两位数行业,在1980—2008年期间的投入产出面板数据由陈诗一(2009)和张军等(2009)提供,其中,2007—2008两年的数据为笔者根据这两篇文章提供的行业归并、数据补缺、统计口径调整和价格平减原则而得。<sup>①</sup>这些变量包括工业总产值、二氧化碳排放、资本存量、从业人员和能源消耗,所有价值量数据都平减为1990年为基年的可比价序列。其中,资本和劳动为大量文献所使用的传统投入要素;遵循文献的一致做法,能源变量在本文也作为投入要素处置。由于增长方程包含了中间投入品性质的能源要素,因此,产出指标宜使用包含了中间投入成本的工业总产值而非工业增加值。二氧化碳排放变量则根据本文估算生产率的四个模型或不予考虑、或作为投入要素、或作为期望产出、或作为非期望产出来处理,这也切合了文献

<sup>①</sup> 补充数据主要摘自2008年和2009年《中国统计年鉴》、《中国工业经济统计年鉴》和《中国城市(镇)生活与价格年鉴》以及《中国统计摘要2009》等。

## 中排放变量处理技术发展的演化历程。

表 1 本文所使用工业投入产出变量的描述性统计分析(1980—2008)

变量	轻工业组				重工业组			
	均值	标准误	最小值	最大值	均值	标准误	最小值	最大值
工业总产值(亿元)	838	1813	17	23183	2657	5918	44	74467
二氧化碳排放(万吨)	539	584	16	3195	14088	30812	158	285850
资本存量(亿元)	299	292	13	2461	1481	1940	43	20236
从业人员(万人)	128	106	10	802	352	261	18	1279
能源消费(万吨标准煤)	406	316	37	1801	4353	6177	113	53312

表 1 报告了本研究所使用变量的描述性统计分析。为了方便看出不同行业之间的差异, 这里按照 2004 年各行业能源消费总量由低到高的排序把所有行业分为低能耗和高能耗两个行业组别(每组 19 个), 以作为轻重工业的代理, 因为通常认为重工业与高能耗和高排放更相关。由表 1 可以看出, 重工业和轻工业组别的资本存量和能源消耗的平均水平差异悬殊, 前者分别是后者的 5.0 和 10.7 倍, 而它们的工业总产值和吸纳的劳动力差异却小得多, 重工业组的工业总产值只有轻工业组的 3.2 倍, 劳动力也只有 2.8 倍, 但是重工业组的二氧化碳排放水平却远高于轻工业组, 达到了 26.1 倍之多。显然, 高投资、高能耗和高排放并没有带来同样高的增长, 也没有吸纳足够多的劳动力。最大的工业总产值 74467 亿元为近年快速发展的高技术行业——计算机、电子与通信设备制造业的 2008 年数值。<sup>①</sup>从标准差来看, 一般而言都是重工业组变量的变化程度远大于轻工业组, 尤其是能耗和碳排放变化的差异最悬殊, 达到了 20 倍和 53 倍。根据这些统计信息, 可以看出重化工业行业的资本投入、能耗和二氧化碳排放不仅水平高, 而且波动也大, 但是相应的增长却没有那么高, 这似乎隐含着它们的生产率水平应该不会很高。

## (二)方法

现有文献中对全要素生产率进行估算的方法可以粗略分为指数法、索罗残差法和前沿生产函数法。指数法主要根据全要素生产率的基本定义来进行估算, 使用指数是为了在异质性的产出和投入之间能够可比, 因此存在指数公式的选择问题。应用最广泛的指数公式是 Laspeyres 指数、Paasche 指数、Fisher 指数和 Tomqvist 指数。不过这些指数的计算需要投入产出的价格信息, 很多时候只能把缺乏市场价格信息的环境污染变量排除在生产率计算之外。自从索罗 1957 年以生产函数形式给出了生产率测度公式, 并将它们同经济增长分析联系在一起后, 索罗残差法在生产率估算中开始流行起来。利用索罗残差法估算生产率时首先要确定投入要素的产出弹性, 这时或者根据先验知识假定其为某个固定的常数, 或者利用 CD 生产函数或者超越对数函数来回归估计得到该弹性。前沿生产函数以识别生产单位有无效率而见长, 这里也分为随机性和确定性两种方法。随机前沿生产函数作为一种参数化方法需要先验假定效率随时间而变化的模式, 这也是它的一大缺陷, 除此之外, 还和上述索罗残差法中 CD 生产函数或超越对数函数一样, 只能拟合一种产出的生产过程, 对本文要同时模拟好和坏两种产出的情形无能为力, 因而无法采用。确定性前沿生产函数也分为参数化和非参数化两种估计方法, 其中以非参数法更为常用, 即文献中所说的 DEA 方法。显然, 基于投入型或产出型距离函数的 DEA 方法不仅可以避免上述所有参数化方法有可能导致模型设定误差和随机干扰项正态分布假定无法解决的缺陷, 而且其最大的好处是可以同时模拟多种

<sup>①</sup> 如果以单位增加值能耗和排放来计算的话, 该行业排名在所有分行业中基本上是最底的。以 2004 年为例, 该行业每万元工业增加值只消耗 0.18 吨标准煤和排放 0.05 吨 CO<sub>2</sub>, 远低于全国平均水平的 5.6 吨标准煤和 21 吨 CO<sub>2</sub>。

产出和多种投入的生产过程,甚至可以对GDP等好产出和环境污染等坏产出进行区分处置。Zhou et al. (2008)综述了DEA方法在能源和环境领域的应用。因此,本文估算绿色生产率所基于的正是非参数距离函数框架中的谢泼德产出距离函数和方向性产出距离函数。

#### 四、工业绿色生产率分析

##### (一)基于环境约束的全要素生产率变化和工业发展方式分析

表2报告了四种模型所估算的中国工业全行业的全要素生产率、生产效率和技术进步在分行业基础上和整个改革开放期间的平均发展速度,权重为各行业的工业增加值份额。相对于以往的中国工业生产率估算文献,本研究的数据相对更丰富,四个模型至少都包含了能源投入,而且尝试合理地考察二氧化碳排放变量。其中,模型4为本文的目标方法,其估算结果就是接下来重点讨论的绿色工业生产率及其分解。

表2 四种模型所度量工业全行业生产率、效率和技术进步的平均发展速度(1980—2008)

生产率指数	没有考虑排放 (模型1)	排放作为投入 (模型2)	排放作为期望产出 (模型3)	排放作为非期望产出 (模型4)
MPI/MLPI	1.0545***	1.0626***	1.0387**	1.0229
MECH/MLECH	1.0035	1.0044	1.0050	0.9981
MTCH/MLTCH	1.0522*	1.0592**	1.0346	1.0255

注:该表全行业数值为分行业加权平均(权重为工业增加值份额)和整个期间几何平均计算而得。\*\*\*、\*\*、\*分别代表1%、5%和10%的显著性水平,这里基准模型是模型4。零假设为模型1、2、3所估算生产率、效率和技术改变的均值等同于模型4的对应值,使用学生氏*t*检验统计量。

根据表2模型4的度量结果,在正确考虑了能源消耗和二氧化碳排放的情况下,中国工业全行业实际全要素生产率年均增长2.29%,生产效率年均减少0.19%,年均技术进步率为2.55%。显然,整个改革开放期间中国工业环境全要素生产率的较大改善主要是由技术进步而非生产效率提高所引起,这与Wu (1995)、Zheng et al. (2003)、涂正革和肖耿(2005)等的结论一致。这里估算的全要素生产率增长要小于综述中的几乎所有生产率估计值,只比胡永泰(1998)经过较严格数据调整所得到的1.8%的增长率略高。事实上,表2其他3个模型估算的平均生产率、效率和技术进步率分别在3.87—6.26%、0.35—0.5%和3.46—5.92%区间,都一致地大于模型4的对应结果,生产效率的变化方向甚至变负为正;而且前3个模型生产率与大部分估计结果相似。由此,可以初步得出一个结论,即不考虑污染排放或者没有正确处理污染排放变量的话,会高估真实的生产率甚至也高估技术进步率和生产效率。为了进一步检验上述结论,本文仿照Kumar (2006)等对模型4所度量的真实生产率、效率和技术进步率是否在统计上显著小于其他模型的对应估算值进行了*t*统计量检验。检验结果显示,前3个模型的全要素生产率估计值显著大于模型4的估计,模型1和2的技术进步率显著大于模型4的对应值,但是4个模型所估算的生产效率在统计上并没有显著差异。由此可以进一步确认,在正确考虑了环境污染的负外部性后,即模型4把污染排放作为非期望产出处置后,所得到的环境约束全要素生产率和技术进步率要小于不考虑或者没有正确考虑环境因素的度量值,但是生产效率估算差异不显著,这是本文的主要发现之一。许多研究结论与此相似,比如,Jeon & Sickles (2004)在不考虑二氧化碳排放情况下的度量显示,日本、韩国、我国台湾、新加坡和我国香港都出现了TFP增长,而考虑了排放后的度量则只有日本有TFP增长。Nanere et al. (2007)认为,不考虑生产的外部成本会高估生产率,而忽略了生产的外部收益则会低估生产率。Watanabe & Tanaka (2007)利用中国各省工业数据检验了只考虑期望产出与同时考虑期望和非期望产出的两种技术效率度量方法,发现前者技术效率度量是有偏的,通常会高估真实的工业效率水

平。本文考虑了能源和环境约束后实际工业生产率度量值的降低似乎与 Young（1995）所发现的二战后大部分亚洲国家或地区的增长不是由生产率进步来推动的结论一致。表 3 将进一步对此进行解析。

表 3 不同时期投入产出与四种模型所度量生产率的平均发展速度

时期	工业总产值	碳排放	资本	劳动	能源	MPI1	MPI2	MPI3	MLPI
1991—1992	1.09	1.05	1.11	1.05	1.06	1.0123	1.0146	1.0060	1.0068
	100					13	16	7	7
1992—2001	1.12	0.98	1.09	1.00	1.03	1.0459	1.0578	1.0264	1.0315
	100					39	49	23	27
2001—2008	1.21	1.05	1.09	1.07	1.11	1.1258	1.1380	1.1001	1.0356
	100					60	66	48	17
1981—2008	1.13	1.03	1.10	1.04	1.06	1.0545	1.0626	1.0387	1.0229
	100					41	47	29	17

注：MPI1/MPI2/MPI3/MLPI 分别表示 1—4 模型所估算的生产率指数。每一时期第一行数据表示该变量的平均发展速度（也是通过分行业加权平均和对应时期几何平均计算而得），第二行表示生产率增长对工业总产值的贡献份额（单位：%），它与投入要素的产出贡献份额相加等于 100。

表 3 报告了工业改革三个子阶段和整个样本期间基于所有行业的增长核算平均结果<sup>①</sup>，包括工业总产值、二氧化碳排放、资本存量、劳动、能耗和四种 TFP 的发展速度以及四种 TFP 贡献份额大小。<sup>②</sup>和表 2 的结论相似，三个子时期前 3 个模型所估计的生产率增长率及其贡献份额基本上都大于模型 4 估算的真实生产率变化及其份额（仅模型 3 前两个时期的度量值例外）。如果仅仅根据前 2 个模型的生产率估计结果完全可以得出与涂正革和肖耿（2005）、刘伟和张辉（2008）、陈诗一（2009）和张军等（2009）类似的结论<sup>③</sup>，即从第三个阶段开始，生产率的产出贡献份额已经超过要素的贡献度，这意味着工业的增长方式开始从粗放式向集约型转变，相似结论的得出主要是因为他们处理环境因素时方法相同或相似。而把排放作为好产出处理的模型 3 的结论就没那么强了。根据环境 DDF 所估算的模型 4 中真实生产率的结论，更无法得出工业发展方式开始发生转变的结论<sup>④</sup>，真实生产率贡献份额远远落后于投入贡献度的事实表明，中国工业目前仍处在粗放型增长阶段，发展方式的转变仍然任重道远，并没有逃脱 Krugman（1994）和 Young（1995）的结论。从表 3 还可以看出，第二个阶段中国工业二氧化碳减排 2%，能耗增长最低（只有 3%），劳动实际上下降了 0.3%（保存 3 位小数的话表中值为 0.997），这与上世纪 90 年代国有企业抓大放小、节能减排和减员增效的改革紧密相关。模型 1—3 中三个时期生产率的贡献是递增的，但是模型 4 中绿色生产率的贡献度在第三个阶段却出现了下降，这显然与介绍部分提到的这一阶段再次重工业化有关。

① 按张军等（2009）的划分，中国工业改革可以粗略地分为三个时期：1978—1992 年的试验期、1992—2001 年的国企改革期和 2001 年以来的反思和调整期。

② 由于非参数方法不方便计算每个投入要素的贡献份额，这里仿照吴延瑞（2008）的做法计算出生产率的贡献度，根据其所有投入的贡献度的相对大小来进行简单增长核算分析。

③ 涂正革和肖耿（2005）发现世纪之交全要素生产率增长逐渐成为大中型工业迅猛增长的主要源泉，并形象地把中国工业这种全要素生产率对经济增长的显著推动力称为中国的工业生产力革命。刘伟和张辉（2008）发现，1998 年之后我国经济发展模式已经越来越体现出了其自身的可持续性。陈诗一（2009）根据大多数行业中技术进步发挥着第一增长引擎的作用说明，中国工业的发展方式从总体上来看已经由改革前的外延扩张型转变为现在的内涵扩张型增长。张军等（2009）也发现 1992 年后中国工业的发展方式已经向可持续性方向转变。

④ Watanabe & Tanaka（2007）也认为同时考虑了期望产出和非期望产出的生产率水平才是判断中国工业发展可持续性的较好指标。

从表3可以看出,第三阶段二氧化碳排放和能耗都急剧增长(平均增长达到5%和11%),模型4显然考虑到了这种能源和环境制约对生产率的影响。如果把本文4个模型分阶段的生产率估计值与其他文献中的分阶段度量对比,仍然是本文模型4在第三阶段的真实生产率增长估计值在所有研究中最小。

与报告全行业和分时期结果的表2和表3不同,表4报告了38个分行业的简单增长核算表,投入产出变量报告的是几何平均发展速度,MLPI、MLECH、MLTCH为目标模型4的估算结果,生产率贡献份额的计算同表3一样,参照吴延瑞(2008)。显然,分行业的数据差异很大,比如工业总产值的增长率从石油和天然气开采业的1%到计算机电子通信设备制造业的28%不等,所估算的真实生产率指数和生产效率也从石油加工及炼焦业的0.9859和0.9758到计算机电子通信设备制造业的1.1256和1.0223不等,而技术进步率则处于黑色金属冶炼及压延加工业的0.9966到计算机电子通信设备制造业的1.101之间。那些产出增长慢以及生产率和技术进步不快甚至为负的行业基本上都是能耗和排放密集型的重化工业行业,如石油和天然气开采业、煤炭采选业、非金属矿物制品业、非金属矿采选业、化学原料及化学制品制造业、燃气生产和供应业等,这既显示了高能耗高排放的弊端,也说明了对传统重化工业行业进行诸如更新改造、节能减排、升级换代等低碳发展和绿色革命的必要性和紧迫性。而总产值和生产率增长以及技术进步率快的行业都是轻工业和高新技术行业,如计算机电子及通信设备制造业(排名都是第一)、化学纤维制造业、家具制造业、交通运输设备制造业、仪器仪表制造业和电气机械及器材制造业,由此也继续凸显信息产业等高新技术行业在工业发展升级中的重要性。除少数例外,工业各行业的真实生产率增长和技术进步率为正,而生产效率为负增长,这和表3一样也说明工业生产率的提高主要由技术进步引起,而非生产效率。生产率负增长的行业有石油加工及炼焦业、石油和天然气开采业、燃气生产和供应业、电力热力生产和供应业<sup>①</sup>;技术进步率为负的行业只有黑色金属冶炼及压延加工业和燃气的生产和供应业。除了黑色金属冶炼及压延加工业外,生产效率变化为正的行业为计算机电子及通信设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、仪器仪表制造业、烟草加工业和化学纤维制造业,这些行业的真实生产率增长和技术进步率也为正,同样凸显出轻工业和高新技术行业在新型工业化中的重要性。虽然同表3结论一样,没有一个行业的生产率贡献度超过50%,所有行业仍然表现为要素驱动型的粗放型增长,但是生产率贡献度的百分点超过两位数的几乎都是轻工业行业(塑料制品业唯一例外),贡献度接近50%的为烟草加工业和计算机电子及通信设备制造业;上述生产率负增长的行业对产出的贡献也为负,它们都是纯粹由能源和资本等要素驱动的重工业行业,其中,石油加工及炼焦业的生产率贡献度最低,达到-24%。轻工业和重工业在真实生产率上的这些差异与数据描述性分析隐含的结论相一致。从投入要素角度来看,劳动就业的增长率不高,但是资本存量和能源消耗的平均增长率很高,在要素驱动型的工业增长中发挥主要作用。

## (二)中国新型工业化的必由之路:绿色工业革命

对全要素生产率的变化模式做出正确解释并非易事,而本文使用环境DDF模型所估算的绿色全要素生产率可以为我们提供其他方法所不具备的两大优势。一是可以通过比较不(正确)考虑环境因素与正确考虑环境因素的生产率估算结果来探讨环境污染的危害,它制约着中国工业生产率的改善,昭示着中国绿色工业革命的必要性和紧迫性。二是根据波特假说(Porter, 1991)认为正确设计且严格执行的环境规制政策能够引致创新从而抵消执行环境政策的成本(即所谓“创新抵消”),因此可以达至环境质量和生产率同时提高的双赢发展可能。基于此,笔者把所估算的工业环

<sup>①</sup> 感谢审稿人对这些行业生产率低的一种解释,即这些行业都是能源转换部门,虽然需要大量能源投入,但并没有直接烧掉这些能源产生二氧化碳,而是把投入的能源转换成了其他形式的能源,因而这些行业的绿色生产率很低,可能也与此有关。

表4 基于模型4的工业分行业绿色增长核算分析(1981—2008)

行业	产出	资本	劳动	能源	MLPI	MLECH	MLTCH	生产率贡献份额(%)
煤炭开采	1.08	1.06	1.01	1.04	1.0002	0.9998	1.0004	0.2
石油开采	1.01	1.11	1.05	1.04	0.9991	0.9979	1.0012	-8.3
黑金采选	1.14	1.08	1.06	1.07	1.0072	0.9990	1.0082	5.0
有金采选	1.10	1.05	1.01	1.04	1.0070	0.9968	1.0102	7.0
非金矿采	1.09	1.04	1.00	1.06	1.0023	0.9954	1.0069	2.7
木材采运	1.03	1.02	0.98	0.99	1.0010	0.9972	1.0039	3.9
农副加工	1.10	1.11	1.03	1.04	1.0024	0.9928	1.0097	2.3
食品制造	1.10	1.10	1.03	1.05	1.0016	0.9963	1.0053	1.6
饮料制造	1.12	1.11	1.03	1.06	1.0049	0.9963	1.0086	4.0
烟草加工	1.10	1.13	1.01	1.04	1.0471	1.000	1.0471	47.7
纺织业	1.09	1.09	1.02	1.04	1.0051	0.9936	1.0116	5.7
纺织服装	1.12	1.12	1.05	1.10	0.9989	0.9775	1.0219	-0.9
皮革毛羽	1.12	1.10	1.06	1.06	1.0200	0.9946	1.0256	16.3
木材加工	1.11	1.11	1.05	1.02	1.0083	0.9925	1.0160	7.3
家具制造	1.13	1.10	1.05	1.04	1.0317	0.9962	1.0357	23.9
造纸制品	1.14	1.11	1.03	1.05	1.0031	0.9992	1.0039	2.2
印刷媒介	1.12	1.11	1.03	1.08	1.0262	0.9964	1.0299	21.8
文教体育	1.15	1.11	1.06	1.06	1.0473	0.9985	1.0489	30.7
石油加工	1.06	1.11	1.04	1.09	0.9859	0.9758	1.0103	-24.1
化学工业	1.11	1.08	1.03	1.05	1.0012	0.9990	1.0022	1.0
医药工业	1.16	1.12	1.04	1.04	1.0053	0.9976	1.0077	3.3
化学纤维	1.17	1.09	1.03	1.06	1.0675	1.0181	1.0486	39.6
橡胶制品	1.12	1.10	1.04	1.06	1.0008	0.9964	1.0044	0.7
塑料制品	1.15	1.12	1.05	1.09	1.0226	0.9940	1.0287	14.6
非金制造	1.12	1.08	1.01	1.06	1.0009	0.9994	1.0015	0.8
黑金加工	1.12	1.08	1.02	1.07	1.0075	1.0109	0.9966	6.3
有金加工	1.13	1.09	1.05	1.11	1.0024	0.9948	1.0076	1.9
金属制品	1.13	1.08	1.02	1.07	1.0229	0.9961	1.0269	17.6
通用设备	1.11	1.05	1.02	1.03	1.0182	0.9970	1.0213	16.0
专用设备	1.12	1.05	1.01	1.03	1.0138	0.9962	1.0177	11.8
交通设备	1.18	1.08	1.03	1.05	1.0204	1.0005	1.0198	11.3
电气机械	1.17	1.10	1.05	1.07	1.0458	1.0012	1.0445	27.1
通信设备	1.28	1.13	1.08	1.11	1.1256	1.0223	1.1010	44.5
仪器仪表	1.16	1.07	1.03	1.03	1.0576	1.0061	1.0512	36.0
电力热力	1.12	1.11	1.04	1.09	0.9999	0.9998	1.0001	-0.1
燃气煤气	1.07	1.10	1.03	1.04	0.9974	0.9989	0.9985	-3.9
水的生产	1.07	1.11	1.04	1.06	1.0057	0.9896	1.0163	8.2
其他工业	1.14	1.10	1.00	1.04	1.0317	0.9999	1.0318	22.5

注:最后一列贡献份额定义为生产率增长占工业总产值增长的比重;除此之外,其余数据都为各变量在整个时期的几何平均发展速度。



境全要素生产率(特别是重化工业行业生产率)的变化理解为执行节能减排、开发新能源、发展低碳技术等所有相关环境政策的综合经济效果,并把这种绿色全要素生产率的切实提高定义为绿色工业革命的发生。为了尝试从工业发展历史经验和节能减排政策的角度来解释环境全要素生产率的变化以及相应的绿色工业革命,本文绘制出改革开放期间工业全行业和轻重工业基于模型4所估算的绿色全要素生产率(MLPI)、生产效率(MLECH)和技术进步(MLTCH)的平均发展速度趋势图(见图2)<sup>①</sup>。图2不仅通过轻重工业的划分使得各行业绿色生产率变化的异质性特征一目了然,而且生产率及其分解的时变模型也一清二楚。从图2还可以看出,由于重工业的权重较大,全行业的指数变化趋势更多受重工业的模式影响。

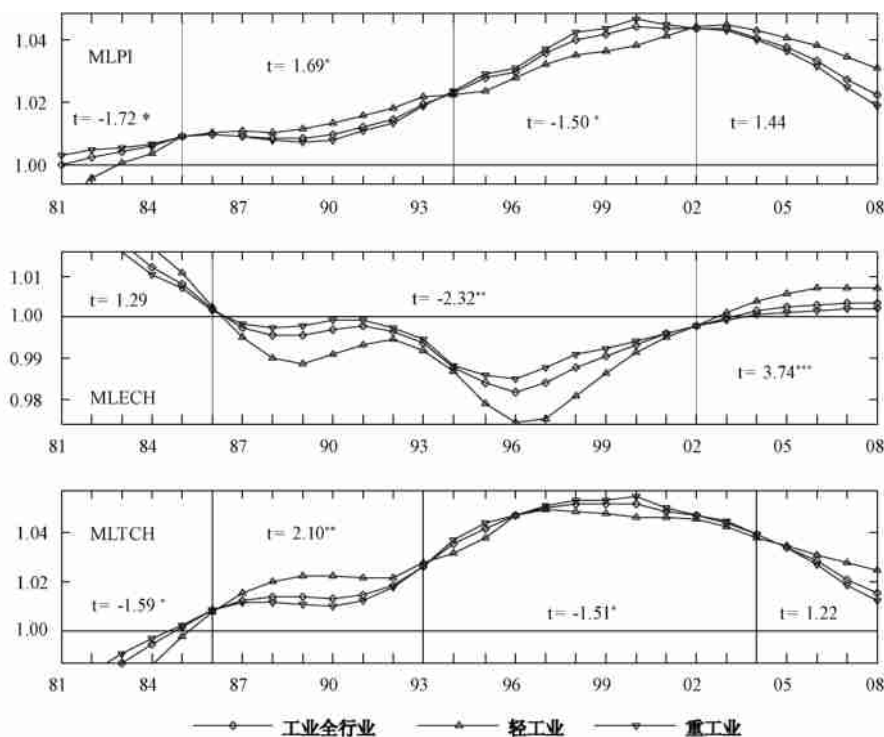


图2 基于模型4所度量的工业全行业和轻重工业的绿色MLPI/MLTCH趋势

由于共同的经济基本面因素几乎同时影响着所有而不是一部分工业行业的原因,轻重工业总体上都保持着与工业全行业相似的环境全要素生产率、生产效率和技术进步变动轨迹。即改革初期体现追赶效应的生产效率较高,但是代表创新能力的技术变化为负;然后技术进步持续较快增长,于本世纪初达到最高增长率5.2%,对前沿技术吸收的追赶效应却消失,生产效率不断下降;本世纪初以来,生产效率得到改善,技术进步却出现下降趋势。更多受技术变化而非生产效率的影响,中国工业的环境全要素生产率在上世纪80年代初期增长也很低,随后有一个较长时期的持续平稳提高,并于本世纪初达到最高4.4%的增长率,后转而一路下降。这与文献中对中国生产率所估计的变化模式基本一致(郭庆旺和贾俊雪,2005; Perkins & Rawski, 2008; 吴延瑞, 2008; 王小鲁等, 2009; Zheng et al., 2009)。显然,在经历了上世纪80年代中前期的小幅增长和中后期的短暂停顿之后,从上世纪90年代初到本世纪初进入了绿色全要素生产率持续快速健康增长的时期,其产出贡献份额也在不断增加,特别是90年代后半程,绿色生产率增长最快并达到顶峰,充分说明中国确实发生了上述所定义的绿色工业革命,即改革以来中国所推行的节能减排政策在工业部

① 轻重工业的划分标准同表1一样,所有序列都是以各行业增加值份额为权重计算的加权平均算术平均数。

门取得了积极的成果。然而，本世纪以来，主要由于环境政策执行力度的下降以及工业再次急剧重型化，能耗和碳排放出现了图 1 所示的飙升局面，能源强度和碳强度的长期下降趋势亦转缓或出现回升，绿色全要素生产率在改革时期第一次出现下降局面，而且降幅不小，中国绿色工业革命的势头首次减弱，有违新型工业化的根本诉求。

进一步根据不同时期执行的节能减排政策来解释轻重工业生产率变化模式的差异。虽然从表 1 和表 4 可以得到轻工业生产率增长高于重工业的笼统结论，这似乎也与我们直觉或者一些已有的研究相似（如 Wu, 1995; Jefferson et al., 2000; 李玉红等, 2008; 陈诗一, 2009; 张军等, 2009），但是如果按照图 2 进行跨期分析的话，这种结论并不必然。图 2 按照轻重工业表现的不同对趋势图进行了更具体的时期划分，该划分与表 3 中按照张军等（2009）标准进行的划分相似而不相同。图 2 并对轻工业相对于重工业的这种度量值差异是否在统计上显著进行了  $t$  检验<sup>①</sup>。改革初期，即“六五”（1981—1985）期间，虽然以乡镇企业为主体的轻工业开始蓬勃发展，轻工业的生产效率也高于重工业，但是这种优势并不显著，它的技术改善仍然显著慢于以国有工业为代表的重工业，重工业在该阶段的生产率增长还是高于轻工业。但是在接下来的“七五”和“八五”（1986—1995）时期，工业发展战略从改革前重工业优先发展转为改革后轻重工业并重发展的优势开始得到显现，以乡镇企业、民营企业和外资企业为代表的非国有工业主要在轻工业的各个行业中得到了快速发展，非国有工业总产值比重也于 1993 年首次超过了国有工业，这也许可以解释图 2 所示的这段时期轻工业技术进步率和全要素生产率增长为什么显著优于重工业。当然为了缓解长期计划经济造成的能源短缺，国家在这个阶段对能源生产仍然采取了鼓励政策，如同这个时期的城市工业扩大企业自主权的改革一样，煤炭、石油、电力等重工业行业先后实行了以行业包干为特征的承包责任制改革，其中市场化最为彻底、竞争最为激烈的是煤炭产业，这也许是导致该时期重工业生产率改善显著快于轻工业的主要原因。

上世纪 80 年代鼓励能源生产的政策虽然缓解了中国的能源紧缺问题，但是小煤矿等的破坏性开采造成了煤炭资源的挥霍浪费和环境的严重污染，中国政府转而在整个 90 年代限制能源工业的发展。根据 1996、2001 和 2007 年国务院批复的国家环境保护“九五”、“十五”和“十一五”计划以及 2006 年 6 月 5 日国务院新闻办公室发布的《中国的环境保护（1996—2005）》白皮书提供的资料，在工业污染防治方面，“九五”（1996—2000 年）期间，与国有企业抓大放小所有制改革相对应，中国政府第一次取缔、关停了 8.4 万家技术落后、高耗能、高污染的 15 种小型工业企业，使得以二氧化硫、化学需氧量为代表的 12 项主要污染物的排放总量比“八五”末期分别下降了 10%—15%。反映在表 4 所示的二氧化碳排放变化率上，相对于 1981—1995 年间几乎全部为正的碳排放，“九五”期末 38 个样本行业中有 32 个行业二氧化碳排放下降了 5%—73% 不等。而“九五”期间工业增加值年均增长率却达到 12.7%，远高于“六五”至“八五”期间的 7.6%（1990 年可比价）。所以我们自然看到了图 1 所示的工业能耗和二氧化碳排放一改此前的上升趋势转而从上世纪 90 年代中期到本世纪初出现停顿甚至下降。而且从图 2 特别发现，在此期间重工业技术进步率明显超过了轻工业（ $t$  统计量等于 -1.51，在 5% 的水平上显著），生产效率改善也仍然快于轻工业（ $t$  值为 -2.32，高度显著），导致该阶段重工业的绿色全要素生产率增长也超过了轻工业，而且这种优势在 5% 的统计水平上显著（ $t$  统计量为 -1.50）。这个结论与大多数文献中轻工业生产率增长高于重工业的结论是不同的<sup>②</sup>，这是本文的又一个主要发现，进一步展示了该期间的中国绿色工业革命风貌，显示出卓

① 各区间的  $t$  统计量在图上进行了标示，数值后的 \*、\*\*、\*\*\* 也分别代表在 10%、5% 和 1% 水平上显著。

② Zheng et al. (2003) 的发现与此类似，在整个 20 世纪 80 年代，中国轻工业的生产率增长高于重工业，而从 90 年代初开始，重工业的生产率增长则高于轻工业了。

有成效的环境政策所产生的巨大经济成效。

为什么该期间节能减排政策会导致重工业生产率相对于轻工业更快提高呢？这些被关闭的小企业既涉及到煤炭、电力、冶金、有色金属、石油化工和建材等重化工业行业，也包括轻工行业的小制浆厂、小制革厂、小酿造厂、小糖厂等。笔者计算发现，“九五”（1996—2000年）期间如果二氧化碳排放减少1个百分点的话，轻工业和重化工业行业的劳动生产率将分别提高0.05和2.20万元/人（工业增加值为1990年可比价，下同），能源生产率将分别提高0.02和0.67万元/吨标准煤，碳生产率将分别提高0.04和2.24万元/吨二氧化碳。虽然这些单要素生产率与全要素生产率并不是一回事，但重工业单要素生产率相对于轻工业的更快提高，至少从一个侧面说明了该时期同样的二氧化碳减排力度更有助于改善重工业行业的微观效率，最终在宏观层面体现出重工业环境全要素生产率相对于轻工业改善更快的结果。但是，“九五”期间执行的卓有成效的节能减排政策并没有得到很好的坚持，上述同样来源的资料显示，“十五”（2001—2005）期间，国家虽然继续关停并转了3.3万多家污染严重的小企业，但是由于规模巨大的住和行所推动的消费结构升级和快速城市化极大地拉动了工业特别是重化工业行业的急剧膨胀，二氧化碳排放减少的行业由前期的32个锐减到“十五”期间的9个（见表5），“十五”其他主要污染物减排指标也没有全部实现，比如工业二氧化硫排放量竟然比“九五”末还增加了34.5%之多，该期间力图解决的一些深层次环境问题也没有取得突破性进展。表现在图3上，虽然体现追赶效应的生产效率又开始出现正增长，但是重工业增速显著低于轻工业，重工业技术进步率也没了前一阶段的起色，开始逐步小于轻工业，因此，重工业的环境全要素生产率增长转而也小于轻工业了，由此所带来的工业整体实际生产率首次恶化和绿色工业革命成效转而消退也就不奇怪了。<sup>①</sup>表4也显示，本世纪以来工业生产率平均增长式微，生产率贡献份额相比前一阶段大大降低了。当然，轻重工业间指数大小的逆转还不是根本性的，因为其差

表5 不同模型所测度的有效率行业变化

年份	排放作为期望产出	排放作为非期望产出	年份	排放作为期望产出	排放作为非期望产出
1980—1981	[]	[]	1994—1995	10, 33, 38	10, 33, 38
1981—1982	[]	[]	1995—1996	10, 33	10, 33
1982—1983	[]	[]	1996—1997	10, 33	10, 33
1883—1984	[]	[]	1997—1998	10, 19, 33	10, 33
1984—1985	32	32	1998—1999	10, 19, 33	10, 33
1985—1986	10, 32	10, 32	1999—2000	10, 19, 33	33
1986—1987	10, 32	10, 32	2000—2001	19, 33, 35	33
1987—1988	10	10	2001—2002	19, 33, 35	33
1988—1989	10	10, 12	2002—2003	19, 33, 35	33
1989—1990	10, 12	10, 12	2003—2004	10, 19, 33, 35	10, 33
1990—1991	10, 12	10, 12	2004—2005	10, 19, 33, 35	10, 33
1991—1992	12	10, 12	2005—2006	10, 19, 33, 35	10, 33
1992—1993	12, 33	12, 33	2006—2007	10, 19, 33, 35	10, 33
1993—1994	33	12, 33	2007—2008	10, 19, 33, 35	10, 33

注：根据本文两位数行业排序，行业10、12、19、32、33、35、38依次为烟草加工业、服装业、石油加工及炼焦业、电气机械及器材制造业、计算机电子与通信设备制造业、电力热力生产和供应业和其他工业。[]代表不存在有效率的行业。

<sup>①</sup> Jeon & Sickles (2004)的跨国分析显示出与本文部分跨期分析相似的结论，芬兰、法国和瑞典等国家的二氧化碳减排政策引致了生产率的提高，而二氧化碳排放增加较快的国家如加拿大、日本、爱尔兰、意大利和西班牙的生产率增长率较低，即TFP与碳排放呈反方向变化。

异并没有得到统计上的显著支持。可以想见，如果继续大力执行切实有效的环境政策的话，中国的绿色工业革命趋势应该依然可以持续，由此带来工业发展方式在一定时期内的根本转变也不是没有可能。

参照 Färe et al. (2001) 方法，本文也对那些技术进步显著或者说推动了生产技术前沿移动的创新型行业进行了识别。表 5 分别报告了基于模型 3 和 4 两种方法的两年跨期识别结果。按照模型 4 的最终识别结果，推动生产技术可能性边界移动的创新行业在早期主要是纺织服装业和电气机械及器材制造业，从 1992—1993 年开始，计算机、电子与通信设备制造业开始发挥持续不断的技术进步推动作用。从表 1 和表 4 已经知道，即使考虑了能耗和环境的制约因素，计算机、电子与通信设备制造业在所有的行业中产出、生产率、效率、技术进步的平均增长率都是最高的，其生产率对产出的贡献份额排名第二（达到 44.48%），而且能源强度和碳排放强度最低，所有这些进一步说明了中国新型工业化必须由信息革命加绿色革命共同推进。而生产率增长贡献排名第一（47.67%）的烟草加工业除了少数几个年份外，一直在推动着中国工业的前沿技术进步。如果对比模型 3 和 4 的识别结果又会发现，不考虑污染排放的有害作用的话，石油加工及炼焦业和电力热力生产和供应业会被误看作有效率的单位，而有效率的单位诸如烟草加工业和纺织业却又会被漏掉，由此进一步显现环境因素在技术进步评估和创新单位识别中的重要作用。

## 五、结 论

本文对中国工业 38 个两位数行业从 1980 年到 2008 年间的绿色生产率指标及其分解进行了估算。本文的第一个发现是，正确考虑了环境约束的 DDF 模型所估算的真实全要素生产率和技术进步率要比不考虑或者不正确考虑环境变量的估算值低很多，因此期待通过生产率的提高来实现工业发展方式的转变远没有不考虑资源和环境约束时那么乐观，通过合理的环境政策来推进工业实际生产率的持续改善就自然成为新型工业化的必由之路。本文的第二个发现就是，改革以来中国政府推行的节能减排政策确实有效推动了绿色生产率的持续改善，特别是“九五”左右，与抓大放小的所有制改革相对应，中国关停并转了 10 多万家高能耗高排放的小企业，导致污染排放量历史上第一次急剧下降，这种卓有成效的环境政策把整个工业的真实生产率增长推向了一个前所未有的高位，而且重工业的全要素生产率、生产效率和科技进步率也首次全面超过了轻工业。这充分显示，伴随着改革开放，中国正在发生着新型工业化所必需的绿色工业革命，节能减排政策的这种绿色革命成效在上世纪 90 年代中期到本世纪初达到了最大。

然而，行之有效的节能减排政策并没能“十五”期间得到继续的有效执行，中国工业再次出现重化工业化膨胀，刚刚出现起色的重工业生产率指标又落伍了，工业整体生产率首次恶化，令人欣喜的绿色工业革命进程似乎中断了，低碳趋势难以为继。当然这并没有得到统计上的显著支持。汇丰银行报告显示，在 2008 年底应对金融危机的 4 万亿元人民币总刺激投资中，中国投入绿色项目的资金占到了 38%，仅次于韩国 81% 和欧盟 59% 的绿色投入深度，高于位于第六的美国（12%）；从绝对规模来看，中国的绿色投入更高居世界第一位，达到 2210 亿美元，是排在第二位的美国的两倍（Robins et al. 2009）。联合国环境规划署年度报告也指出，中国在 2009 年首次超过美国成为在可再生能源领域内投资最多的国家，投资额超过 200 亿美元。基于此可以预见，中国新一轮绿色工业革命为期不远，最终由绿色生产率所驱动工业发展方式转变也指日可待。

### 参考文献

- 蔡昉、王德文、曲玥，2009，《中国产业升级的大国雁阵模型分析》，《经济研究》第 9 期。  
陈诗一，2009，《能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展》，《经济研究》第 4 期。

- 陈诗一, 2010:《节能减排与中国工业的双赢发展: 2009—2049》,《经济研究》第3期。
- 郭庆旺、贾俊雪, 2005:《中国全要素生产率的估算: 1979—2004》,《经济研究》第6期。
- 胡鞍钢、郑京海等, 2008:《考虑环境因素的省级技术效率排名》,《经济学(季刊)》第7卷第3期。
- 胡永泰, 1998:《中国全要素生产率: 来自农业部门劳动力再配置的首要作用》,《经济研究》第3期。
- 黄勇峰、任若恩, 2002:《中美两国制造业全要素生产率比较研究》,《经济学(季刊)》第2卷第1期。
- 李玉红、王皓、郑玉歆, 2008:《企业演化: 中国工业生产率增长的重要途径》,《经济研究》第6期。
- 李小平、卢现祥、朱钟棣, 2008:《国际贸易、技术进步和中国工业行业的生产率增长》,《经济学(季刊)》第7卷第2期。
- 刘伟、张辉, 2008:《中国经济增长中的产业结构变迁和技术进步》,《经济研究》第11期。
- 刘小玄、吴延兵, 2009:《企业生产率增长及来源: 创新还是需求拉动》,《经济研究》第7期。
- 涂正革、肖耿, 2005:《中国的工业生产力革命——用随机前沿生产模型对中国大中型工业企业全要素生产率增长的分解及分析》,《经济研究》第3期。
- 涂正革, 2008:《环境、资源与工业增长的协调性》,《经济研究》第2期。
- 涂正革、肖耿, 2009:《环境约束下的中国工业增长模式研究》,《世界经济》第11期。
- 王兵、吴延瑞、颜鹏飞, 2010:《中国区域环境效率与环境全要素生产率增长》,《经济研究》第5期。
- 王小鲁, 2000:《农村工业化对经济增长的贡献》,载于王小鲁和樊纲主编的《中国经济增长的可持续性(跨世纪的回顾与展望)》,经济科学出版社。
- 王小鲁、樊纲、刘鹏, 2009:《中国经济增长方式转换和增长可持续性》,《经济研究》第1期。
- 吴延瑞, 2008:《生产率对中国经济增长的贡献: 新的估计》,《经济学(季刊)》第7卷第3期。
- 张军、陈诗一、Gary H. Jefferson 2009:《结构性改革与中国工业增长》,《经济研究》第7期。
- 张军、施少华、陈诗一, 2003:《中国的工业改革与效率变化——方法、数据、文献和现有的结果》,《经济学(季刊)》第3卷第4期。
- 郑京海、胡鞍钢, 2005:《中国改革时期省际生产率增长变化的实证分析(1979—2001年)》,《经济学(季刊)》第4卷第2期。
- 中国能源和碳排放研究课题组, 2009:《2050中国能源和碳排放报告》,科学出版社。
- Borensztein, E. and Ostry, J. D., 1996 “Accounting for China’s Growth Performance”, *American Economic Review*, 86 224—28.
- Bosworth Bary and Susan M. Collins 2008, “Accounting for Growth: Comparing China and India”, *Journal of Economic Perspectives*, 22 (1), 45—66.
- Boyd Gale A., George Tolley and Joseph Pang 2002. “Plant Level Productivity, Efficiency, and Environmental Performance of the Container Glass Industry”, *Environmental and Resource Economics* 23, 29—43.
- Chambers R., Y. H. Chung and R. Färe 1996, “Benefit and Distance Function”, *Journal of Economic Theory* 70, 407—419.
- Chen Kuan, Wang Hongchang Zheng Yuxin, Gary H. Jefferson, Thomas G. Rawski, 1988, “Productivity Change in Chinese Industry: 1953—1985”, *Journal of Comparative Economics*, Volume 12, Issue 4 December, 570—591.
- Chow, Gregory C., 1993, “Capital Formation and Economic Growth in China”, *Quarterly Journal of Economics*, 108, 3; 809—842.
- Chow Gregory, An-luh Lin, 2002, “Accounting for Economic Growth in Taiwan and Mainland China: A Comparative Analysis”, *Journal of Comparative Economics*, Volume 30, Issue 3, Pages 507—530.
- Chung Y.H., Färe R., Grosskopf S., 1997, “Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach”, *Journal of Environmental Management* 51, 229—240.
- Collins Susan M. and Bary P. Bosworth, 1996 “Economic Growth in East Asia: Accumulation versus Assimilation”, *Brookings Papers on Economic Activity*, 2, 135—203.
- Färe R., E. Grifell-Tatje, S. Grosskopf and C. A. K. Lovell, 1997, “Biased Technical Change and the Malmquist Productivity Index”, *Scandinavian Journal of Economics* 99, pp. 119—127.
- Färe R., S. Grosskopf and Jr. C. A. Pasurka 2001, “Accounting for Air Pollution Emissions in Measures of State Manufacturing Productivity Growth”, *Journal of Regional Science* 41(3), 381—409.
- Färe Rolf S. Grosskopf, M. Norris and Z. Zhang, 1994 “Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries”, *American Economic Review*, 84, 66—83.
- Fisher-Vanden Karen and Gary H. Jefferson 2008, “Technology Diversity and Development: Evidence from China’s Industrial Enterprises”, *Journal of Comparative Economics*, 36(4), 658—672.
- Fisher-Vanden Karen, Gary H. Jefferson, Hongmei Liu, Quan Tao, 2004, “What is driving China’s Decline in Energy Intensity?” *Resource and Energy Economics*, 26, 77—97.
- Fisher-Vanden Karen, Gary H. Jefferson, Ma Jinghui, Xu Jianyi, 2006, “Technology Development and Energy Productivity in China”,

*Energy Economics*, 28, 690—705.

Hailu A., Veeman T. S., 2000, “Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959—1994: An Input Distance Function Approach”, *Journal of Environmental Economics and Management* 40: 251—274.

Holz C. A., 2006, “Measuring Chinese Productivity Growth, 1952—2005”, Mimeo Social Science Division, Hong Kong University of Science and Technology.

Jefferson Gary H., Thomas G. Rawski, Wang Li, Zheng Yuxin, 2000, “Ownership, Productivity Change, and Financial Performance in Chinese Industry”, *Journal of Comparative Economics*, Volume 28, Issue 4, 786—813.

Jefferson Gary H., Thomas G. Rawski, Yifan Zhang, 2008, “Productivity Growth and Convergence across China’s Industrial Economy”, *Journal of Chinese Economic and Business Studies*, Volume 6, Issue 2, 121—140.

Jeon Byung M. and Robin C. Sickles, 2004, “The Role of Environmental Factors in Growth Accounting”, *Journal of Applied Econometrics*, Volume 19, Issue 5, pp 567—591.

Jorgenson Dale W. and Kevin J. Stiroh, 2000, “U. S. Economic Growth at the Industry Level”, *American Economic Review*, May (Papers and Proceedings), 90(2), pp 161—167.

Kim Jong-II and Lawrence Lau, 1994, “The Sources of Economic Growth of the East Asian Newly Industrialized Countries”, *Journal of Japanese and International Economics*, 8(3): 235—271.

Knugman Paul, 1994, “The Myth of Asia’s Miracle”, *Foreign Affairs*, 73(6), 62—78.

Kumar Surender, 2006 “Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist—Luenberger Index”, *Ecological Economics*, Volume 56, Issue 2, Pages 280—293.

Lin, J. Y., 1992, “Rural Reforms and Agricultural Growth in China”, *American Economic Review*, 82, 34—51.

Managi Shunsuke, 2006, “Are There Increasing Returns to Pollution Abatement? Empirical Analytics of the Environmental Kuznets Curve in Pesticides”, *Ecological Economics*, 58 (3): 617—636.

Mukherjee Anit and Xiaobo Zhang, 2007, “Rural Industrialization in China and India: Role of Policies and Institutions”, *World Development*, 35(10), 1621—1634.

Nanere Martin, Iain Fraser, Ali Quazi, Clare D’ Souza, 2007, “Environmentally Adjusted Productivity Measurement: An Australian Case Study”, *Journal of Environmental Management*, Volume 85, Issue 2, Pages 350—362.

Perkins Dwight H., 1988, “Reforming China’s Economic System”, *Journal of Economic Literature*, 26(2): 601—645.

Perkins Dwight H. and Thomas G. Rawski, 2008 “Forecasting China’s Economic Growth over the Next Two Decades”, Chapter 20 in Loren Brandt and Thomas G. Rawski, eds., *China’s Great Economic Transformation*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

Porter Michael E., 1991, “America’s Green Strategy”, *Scientific American* 264(4): 168.

Robins N. R. Clover and C. Singh, 2009 “A Climate for Recovery: the Color of Stimulus Goes Green”. *HSBC Global Research* 25 February 2009 issue, 1—45.

Solow, Robert M, 1957, “Technical Change and the Aggregate Production Function”, *Review of Economics and Statistics*, 39: 312—320.

Watanabe M. and K. Tanaka, 2007, “Efficiency Analysis of Chinese Industry: a Directional Distance Function Approach”, *Energy Policy* 35 (12): 6323—6331.

Wu Yannui, 1995, “Productivity Growth, Technological Progress, and Technical Efficiency Change in China: A Three—Sector Analysis”, *Journal of Comparative Economics*, Volume 21, Issue 2, October, 207—229.

Young Alwyn, 1995, “The Tyranny of Numbers: Confronting the Statistical Realities of the East Asian Growth Experience”, *Quarterly Journal of Economics*, 110, pp. 641—680.

Young Alwyn, 2003, “Gold into Base Metals: Productivity Growth in the People’s Republic of China during the Reform Period”, *Journal of Political Economy*, 111 (1), pp. 1220—1261.

Zheng Jinghai, Arne Bigsten, Angang Hu, 2009, “Can China’s Growth be Sustained? A Productivity Perspective”, *World Development*, Volume 37, Issue 4, April, 874—888.

Zheng Jinghai, Xiaoxuan Liu and Arne Bigsten, 2003, “Efficiency, Technical Progress, and Best Practice in Chinese State Enterprises (1980—1994)”, *Journal of Comparative Economics*, 31: 134—152.

Zhou P., B. W. Ang and K. L. Poh, 2008, “A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies”, *Journal of Operational Research*, 189(1): 1—18.

(下转第 58 页)

## Optimal Carbon Tax in China with the Perspective of Economic Growth

Yao Xin and Liu Xiying

(China Center for Energy Economics Research, Xiamen University)

**Abstract:** The issue of climate change has become a global concern. Under the background of climate change, exploring a low-carbon economic development model is the common choices of different governments. As the world top emission country and the largest developing country, China needs to find a way to balance the economic development and carbon emission reductions. As an effective method for achieving emission reduction, carbon tax has always been advocated by governments all over the world. This paper begins with micro perspective and carefully considers the characteristics of China's economic development in the current stage. By applying the dynamic optimal tax model with welfare maximization under the constraint of economic growth, the paper finds the optimal path of carbon tax, and further estimates the macroeconomic impacts of carbon tax using a CGE model. We conclude that carbon taxes are in favor of carbon emission reduction, energy efficiency improvement and industrial structure adjustment. We find that the optimal carbon tax in China is a dynamic and progressive process along with economic growth. We propose that with stronger social affordability in the process of economic growth, the carbon tax can be increased gradually. In practice, we believe a relatively low carbon tax at the beginning would protect the economy and society from large shocks due to carbon tax.

**Key Words:** Optimal Carbon Tax; Carbon Dioxide Emissions; Industrial Structure Adjustment; Macroeconomic Impacts

**JEL Classification:** Q54, H21, P28

(责任编辑: 尤 玄)(校对: 晓 鸥)

---

(上接第 34 页)

## Green Industrial Revolution in China: A Perspective from the Change of Environmental Total Factor Productivity

Chen Shiyi

(Fudan University)

**Abstract:** This paper employs directional distance function to estimate environmental total factor productivity and its decomposition in Chinese industry between 1980 and 2008. The results reveal that the restriction of energy and emission hinders the improvement of productivity and then calls for the implementation of strict but appropriate environmental policies. What the most important finding is that the environmental regulations implemented in China since the reform did substantially improve the real industrial productivity, especially between 1996 and 2002. We refer to this as green industrial revolution, necessary for productivity promotion, transformation of growth mode and Chinese industrialization.

**Key Words:** Green Industrial Revolution; Directional Distance Function; Environmental Total Factor Productivity

**JEL Classification:** D24, Q51, Q56

(责任编辑: 王利娜)(校对: 晓 鸥)