

---

---

# 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释

陈诗一\*

---

**内容提要** 本文对改革开放以来中国工业两位数行业二氧化碳排放强度变化的主要原因进行分解,发现能源强度降低或者能源生产率的提高,是二氧化碳排放强度波动性下降的主要且直接的决定因素,能源结构和工业结构调整也有利于碳排放强度降低。本文从工业减排历史进程的视角对这些影响因素的不同效应进行了解释。

**关键词** 二氧化碳强度 因素分解 能源生产率 结构调整

---

## 一 中国碳排放现状和碳强度变化模式

2009年11月25日国务院常务会议决定,到2020年中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降40%~45%,并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划及制定相应的国内统计、监测和考核办法。这是中国第一次提出二氧化碳减排的量化指标,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。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,

---

\* 陈诗一:复旦大学中国社会主义市场经济研究中心 200433 电子信箱:shiyicher@fudan.edu.cn

作者感谢“新世纪优秀人才支持计划”、上海市哲学社会科学课题(2009BJB028)、上海市重点学科建设项目(B101)、复旦大学985工程、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。作者同时感谢两位审稿人的建设性评审。文责自负。

2010a)。本文以中国工业部门碳减排的历史为例来探寻影响二氧化碳排放强度降低的主要决定因素,以便为未来实施碳强度减排约束性指标提供有益的政策建议。

### (一) 二氧化碳排放总量变化

中国经济的高增长带有明显的高投资、高能耗和高污染排放的粗放型特征。以大气污染的主要成分二氧化碳排放为例(见图1),<sup>①</sup>中国二氧化碳排放从1953年的1.46亿吨平稳增长到1996年的34.5亿吨,其间只有“大跃进”时期碳排放有所跃升;1996年后,碳排放在经历了短暂的五六年下降或停滞后开始一路飙升至2008年的67.3亿吨。图2的跨国对比更能看出中国碳排放之大。六七十年代中国二氧化碳排放量比较低,与德国、日本相差无几;改革开放以来,中国碳排放显著上升,甩开了德国、日本和印度,不断逼近美国。以2006年为例,中国二氧化碳排放为58.8亿吨,接近于美国的63.6亿吨,远高于印度、日本和德国的13.9、13.6和8.8亿吨。有研究指出,中国已于2007年超过美国成为全球二氧化碳最大排放国,这无疑给中国的碳减排增加了来自国际方面的压力(陈诗一,2010h;王锋等,2010)。<sup>②</sup>从二氧化碳排放的产业构成来看,工业部门显然是主要排放源,其中又包括化石燃料的燃烧与水泥、石灰、钢铁等工业生产过程的排放。从图1大概看出,改革开放以来,平均只占全国40%左右的工业GDP伴随着占全国84.2%的二氧化碳排放;特别是本世纪以来,随着工业再次重型化,工业二氧化碳排放占全国排放的比例更高达90%以上。

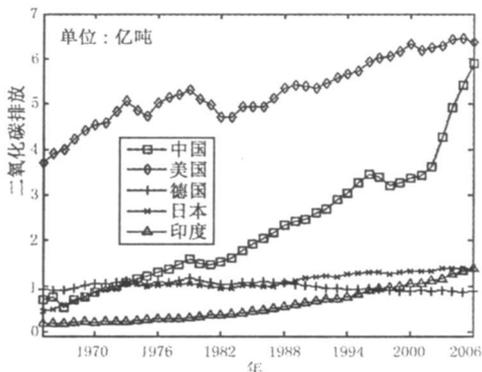
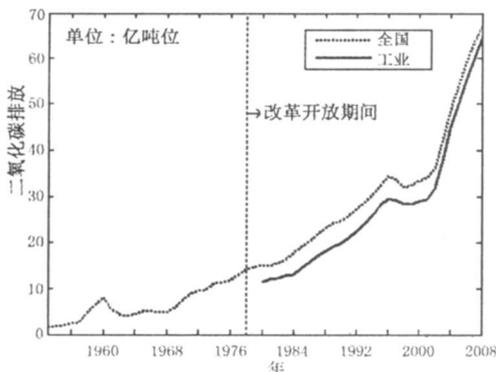


图1 中国二氧化碳排放总量(1953~2008)

图2 主要国家二氧化碳排放比较(1965~2006)

说明:跨国或跨地区比较的图2 8和9由作者根据2007年《世界能源统计年鉴》数据计算并绘制。

<sup>①</sup> 图1和7中工业二氧化碳排放和能源消费总量为作者根据本文所使用两位数行业的相应数据加总而得。全文提供的以及所有图表依赖的数据未作特别说明的都由作者根据统计年鉴提供的相关数据整理并计算而得,此后再进行说明。

<sup>②</sup> 中国能源和碳排放研究课题组(2009)给出的中国碳排放超越美国的时间点是2008年。

中国正处在工业化进程之中,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。

## (二) 二氧化碳排放强度的波动性下降模式

除了 20 世纪 90 年代中后期之外,中国工业的二氧化碳排放总量一直处于上升趋势,但是由图 3 可以看出,整个改革开放期间工业二氧化碳排放强度在波动中保持着基本的下降趋势。<sup>①</sup> 工业碳强度定义为单位工业增加值伴生的二氧化碳排放量,其倒数即碳生产力,就是单位二氧化碳排放所产出的工业增加值。碳强度的总体下降意味着碳生产力的提高,说明了中国工业的二氧化碳减排在整个改革开放期间还是卓有成效的,中国的工业化事实上正处于低碳化进程之中。

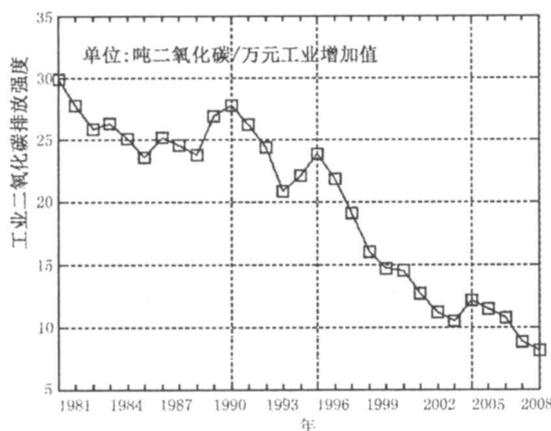


图 3 中国工业二氧化碳排放强度 (1980~2008)

由于二氧化碳排放主要由化石燃料燃烧所致,因此二氧化碳减排与化石能源使用紧密相关。为应对能源短缺,中国政府早在 1980 年就确定了能源节约政策,改革初期,随着以乡镇企业为代表的轻工业的迅速发展,工业碳强度即有所下降;但是 20 世纪 80 年代总的政策还是鼓励能源生产,以小煤矿为代表的能源和排放密集型小企业快速发展,这虽然缓解了能源供应的紧张局面,但也造成了资源过度

开发和严重的环境污染,所以,80 年代后期碳排放强度回升,政府不得不从 80 年代末开始对煤炭市场进行整顿治理。随着 20 世纪 90 年代初全球可持续发展概念的提出,中国也建立起真正的环保意识,再次强调 1980 年提出的“节约与开发并举”的能源方针,对能源生产从 80 年代的鼓励改变为 90 年代后的限制生产,因此,我们看到了进入 90 年代后碳排放强度的再次下降。20 世纪 90 年代中期到本世纪初,与抓大放小的国企所有制改革相对应,中国关停并转了 10 多万家能源和排放密集型中小企业,导致中国二氧化碳排放绝对量在此前一直上升的基础上首次出现了较大下降或停顿(图 1 和 2),碳排放强度在该期间也出现了最大下降落差,下降幅度达 56% (图 3)。尽管从本世纪初,中国再次出现了重化工业化倾向,2004 年碳强度一度升高到每万元增加值

<sup>①</sup> 图 3 中工业全行业二氧化碳排放强度根据两位数行业碳强度加权平均而得,权重为各自工业总产值份额。

排放 12.1 吨二氧化碳, 但是其后碳排放强度下降趋势依然得到了保持。这与国家 2004 年颁布《节能中长期专项规划》、2005 年制定《可再生能源法》、2006 年“十一五”规划提出能源强度降低 20% 和主要污染物排放总量减少 10% 的节能减排约束性指标以及 2007 年出台《中国应对气候变化国家方案》等政策和措施不无关系。温家宝总理在哥本哈根气候峰会上也用一组数据说明了中国是近年来节能减排力度最大的国家。中国的二氧化碳排放强度虽然一直在下降, 而且比美国的下降速度快很多, 但是数值仍然很高, 以 2004 年为例, 中国每百万美元 GDP (2000 年可比价) 排放出 2755 吨二氧化碳, 是美国同年 549 吨排放量的 5 倍多, 由此可见中国碳强度减排的空间还很大。

## 二 文献综述

### (一) 分解技术文献综述

能源和环境领域的因素分解方法中的分解对象包括能源消耗、能源强度、能源消费弹性、二氧化碳排放和排放强度等, 分解形式又分为加法和乘法分解两种。从分解技术来看, 主要分为指数分解法、投入产出结构分解法和非参数距离函数分解法三种类型。Ang 和 Zhang (2000) 曾对 1999 年前 124 篇利用分解技术进行研究的文献进行了综述, 其中 109 篇运用了指数分解法, 只有 15 篇是结构分解, 可见指数分解法占主体地位。Ang 等 (2003) 又对其后的研究作了补充综述。

指数分解法源自传统的 Laspeyres 指数和 Paasche 指数, 流行于七八十年代, 代表性研究可见 Doblin (1988) 和 Ang (1993), 其中 Park (1992) 对拉氏指数法作了很好总结。拉氏指数分解法还被延伸来分解劳动生产率中的结构效应, 即所谓份额转移 (shift-share) 法 (Timmer and Szirmai 2000, 李小平和卢现祥, 2007)。在拉氏指数分解之后, Boyd 等 (1987) 又提出了另一类算术平均的迪氏 (Divisia) 指数分解法并运用于美国工业能耗分析。Li 等 (1992) 进一步提出了适应性加权 Divisia 指数分解法。这类迪氏指数分解法在 90 年代开始流行, 代表性研究如 Greening 等 (1998)、Fisher-Vanden 等 (2004, 2006)、Liu (2006)、Fan 等 (2007) 等。

总体而言, 1995 年前提出的分解方法存在两个缺陷, 即分解残差项的存在 (其中 Laspeyres 指数分解残差项最大, 适应性加权 Divisia 指数分解的残差较小) 和零数值影响计算的问题。为此, Sun (1998)、Zhang 和 Ang (2001) 提出了一个修正的 Laspeyres 指数分解法, 即根据“联合产生均等分配”的原则将残差均摊给各主要因素, 最终导致

完全分解。使用该方法对中国能源或碳排放进行分解的文献有 Zhang(2003)、Steenhof(2006)、张军和刘君(2008)、Zhang等(2009)。

Ang和Choi(1997)、Ang等(1998)提出了一个修正的分别基于乘法和加法的 Divisia分解方法,即对数均值 Divisia指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)分解法,该法既可以导致完全分解,且零数值也可以进行技术处理。根据 Fisher提出的理想指数所要满足三项检验(时间互换检验、因子互换检验和循环检验)的要求,只有修正 Laspeyres指数分解法和 LMDI方法能够通过这三项理想指数检验。修正 Laspeyres指数分解法多用于加法分解,而且因素多于3个公式将非常复杂,而 LMDI方法能够进行加法和乘法分解并可以互相转换,因此,实际应用中 LMDI方法要优于修正 Laspeyres指数分解法。<sup>①</sup> 使用 LMDI方法的研究文献也很多,如 Wang等(2005)、Wu等(2005)、徐国泉等(2006)、Li等(2007)、主春杰等(2006)、刘红光和刘卫东(2009)、宋德勇和卢忠宝(2009)、王锋等(2010)。

最新发展起来的能够进行完全分解的指数分解方法还有 Chung和Rhee(2001)提出的均值变化率指数法和 Abrecht等(2002)提出的 Shapley数值法,不过其应用尚不多见。

投入产出结构分解法利用投入产出比较静态技术把产业(或部门)之间或内部的结构效应从能源消耗或二氧化碳排放中分解出来,该方法可以看作 Laspeyres指数分解法的一个更详细版本,由于采取矩阵运算形式,因此只能进行加法分解或增量分解,具体可见 Rose和 Casler(1996)以及 Hoekstra和 Van den Bergh(2002)的综述。

一般来说,指数分解法适用于时间序列数据或面板数据,既可以进行跨期研究,也可以进行连续时点环比分析;而结构分解法使用隔几年才发布一次的投入产出表,只能进行跨期研究,但是时点少也许能赋予其更丰富的截面信息,可以进行更多的结构分解分析。Hoekstra和 Van den Bergh(2003)对指数分解和结构分解两种方法进行了详细比较。另外,结构分解具有非惟一性,即分解为  $n$  个因素的结构分解形式有  $n!$  个,为避免海量计算,实际中分解因素只采用两极分解平均值,降低了计算量,但是得到的也只是近似值。使用投入产出结构分解法的文献也不少,比如 Chang等(2008)、Guan等(2008)、Kahrl和 Roland-Holst(2009)、Weber(2009)、Wood(2009)、Zhang(2010)、张友国(2010)等。

Wang(2007)利用非参数产出距离函数把能源生产率分解为生产效率和科技进步等因素,涂正革和肖耿(2009)把产出增长分解为要素投入效应、环境全要素生产率、

<sup>①</sup> Ang(2004)从理论基础、适应性、易于使用和解释等角度给出了优先选择 LMDI分解法的结论。

环境结构效应和污染管制效应等。

## (二)对中国二氧化碳排放分解的文献综述

Wang等(2005)仅仅从3种一次能源维度对中国1957~2000年二氧化碳排放总量数据进行了分解,发现代表技术因素的能源强度的降低是减少碳排放的最重要的因素,而能源结构和对可再生能源的投入也起到一定的作用,经济增长则带来碳排放的增加。Wu等(2005)从6个部门、6种能源和28个省3个维度将中国1985~1999年二氧化碳排放量完全分解为结构效应、强度效应和规模效应3个部分计12个因素,特别发现1996~1999年中国二氧化碳排放的下降或停滞主要是由能源强度的降低和工业部门劳动生产率增速减慢所引起,结构调整的碳减排效应并不明显。

徐国泉等(2006)把1995~2004年的人均碳排放分解为能源结构、能源生产率和经济发展等因素,发现能源生产率提高和能源结构调整难以抵消由经济的快速增长拉动的中国碳排放量增长。主春杰等(2006)将1988~2004年中国部分省市二氧化碳排放总量分解成5个主要影响因素(即化石燃料的排放系数、能源消费结构、能源强度、人均GDP和人口总数),发现中国在二氧化碳总量上实现了很大程度的减排,主要原因是能源生产率的提高。Fan等(2007)分解了1980~2003年中国碳排放强度的影响因素,发现碳排放强度的下降主要由能源强度下降所引起,能源结构变化的影响因素也很重要。Liu等(2007)将1998~2005年工业36个行业的二氧化碳排放分解为5个因素,发现工业经济发展和工业终端能源强度是最重要的驱动因素。他们因工业统计口径所限无法研究1997年前的数据。

Chang等(2008)对1989~2004年中国台湾二氧化碳排放的影响因素进行分解,发现能源强度、能源结构的低碳化变化、出口水平和内部最终需求是碳排放的重要影响因子。Ang(2009)研究了1953~2006年二氧化碳排放的影响因素,结论表明技术进步和经济对国外技术的吸收能力与二氧化碳排放负相关,而能源消费、高收入和高贸易开放度则与碳排放正相关。林伯强和蒋竺均(2009)发现影响中国人均二氧化碳排放的主要因素除了人均收入外,还包括能源强度、产业结构和能源消费结构,特别是能源强度中的工业能源强度。

刘红光和刘卫东(2009)将1992~2005年工业碳排放量分解为6个因素,发现经济总量增长、能源利用效率低以及以煤为主的能源消费结构是导致中国碳排放大量增加的主要原因,而行业结构调整和技术等因素对碳减排的作用并不明显。宋德勇和卢忠宝(2009)也从3种一次能源和6个部门两个层次分解了1990~2005年中国碳排放的影响因素及其周期性波动,发现上世纪90年代以来,4个阶段不同经济增长方式的

差异是碳排放波动的主要动因,特别是2000~2004年高投入、高排放、高能耗的经济增长方式直接导致了碳排放的显著增加。Zhang等(2009)将1991~2006年中国分产业部门的二氧化碳排放分解为4个因素(碳强度、能源强度、结构变化、经济发展),发现经济发展有最大正向效应,能源强度降低则对碳排放起到了较大的抑制作用。王锋等(2010)从6个产业部门和8种能源对中国1995~2007年二氧化碳排放的影响因素进行分解,发现人均GDP是最大驱动因素,其中1997~1999年中国二氧化碳排放下降的主要驱动因素是工业部门能源生产率的提高或能源强度的下降。

张友国(2010)和Zhang(2010)基于投入产出表对中国的二氧化碳排放或强度进行了结构分解,前者得出了能源强度是主要影响因素的相似结论;而后者把碳排放分解为GDP变化贡献、经济结构、分配结构和碳系数变化4个因素,从行业结构的角度解释碳排放的变化。

### 三 方法和数据

#### (一) LMDI分解法

本文使用乘法形式的对数均值 Divisia 指数(LMDI)分解法对工业二氧化碳排放强度进行分解。令 $Y$ 、 $C$ 和 $CI$ 代表工业全行业工业增加值、二氧化碳排放及其强度, $i$ 和 $j$ 分别表示38个工业两位数行业和3种一次能源种类(煤炭、原油和天然气),<sup>①</sup> $C_{ij}$ 、 $E_{ij}$ 、 $EC_{ij}$ 、 $ES_{ij}$ 分别表示第 $i$ 个行业和第 $j$ 类能源的二氧化碳排放、能源消费、二氧化碳排放系数和能源消费种类结构, $E_i$ 、 $Y_i$ 、 $EI_i$ 、 $S_i$ 代表第 $i$ 个行业的能源消费、工业增加值、能源强度和工业结构(工业增加值份额)。工业全行业的二氧化碳排放强度可以等价表示成:

$$CI = \frac{C}{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{38} \sum_{j=1}^3 C_{ij}}{Y} = \sum_j \sum_i \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \cdot \frac{E_{ij}}{E_i} \cdot \frac{E_i}{Y_i} \cdot \frac{Y_i}{Y} = \sum_j \sum_i EC_{ij} \cdot ES_{ij} \cdot EI_i \cdot S_i \quad (1)$$

定义如下一个对称的对数权重方程:

$$L(a, b) = \begin{cases} \frac{a-b}{\ln a - \ln b} & a \neq b \\ a & a = b \end{cases} \quad (2)$$

① 《中国能源统计年鉴》将能源消费种类划分为9类(煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力)。本文只选择其中的煤炭、原油和天然气3种一次能源进行分解。由于在部门终端能源消费中,电力消费并不直接产生二氧化碳,属于二次能源,因此没有把电力归入能源分解种类。许多文献在分解能源种类时既包括原油又包括成品油容易造成重复估算二氧化碳排放的问题,本文没有采纳。

工业全行业二氧化碳排放强度环比发展指数按照 IMD I 乘积分解方法, 可以完全分解为以下 4 个影响因子项:

$$RCI = CI^t / CI^{t-1} = RCI_{ec} \cdot RCI_{es} \cdot RCI_s \cdot RCI_{ei} = \exp \left[ \sum \sum_{ij} \frac{L \left( \frac{CI_{ij}^t}{CI_{ij}^{t-1}} \right)}{L \left( \frac{CI^t}{CI^{t-1}} \right)} \ln \left( \frac{ES_{ij}^t}{ES_{ij}^{t-1}} \right) \right] \cdot \exp \left[ \sum \sum_{ij} \frac{L \left( \frac{CI_{ij}^t}{CI_{ij}^{t-1}} \right)}{L \left( \frac{CI^t}{CI^{t-1}} \right)} \ln \left( \frac{S_i^t}{S_i^{t-1}} \right) \right] \cdot \exp \left[ \sum \sum_{ij} \frac{L \left( \frac{CI_{ij}^t}{CI_{ij}^{t-1}} \right)}{L \left( \frac{CI^t}{CI^{t-1}} \right)} \ln \left( \frac{EI_i^t}{EI_i^{t-1}} \right) \right] \quad (3)$$

其中,  $t$  和  $t-1$  表示相邻两期,  $RCI$  代表碳强度总发展指数,  $RCI_{ec}$ 、 $RCI_{es}$ 、 $RCI_s$  和  $RCI_{ei}$  则是分解而成的 4 个因子环比发展指数, 即碳排放系数指数、能源结构指数、工业结构指数和能源强度指数。由于本文计算二氧化碳排放时假定 3 种一次能源的碳排放系数固定不变, 因此方程右端的  $RCI_{ec}$  项实际为 1, 最终分解而成的因子只有 3 项。<sup>①</sup>

## (二) 面板数据

本研究使用变量为 1980~2008 年中国工业 38 个两位数行业的工业增加值、能源消费和二氧化碳排放, 其中工业增加值和能源消费根据历年相关统计年鉴数据整理而得, 而统计年鉴并没有直接提供二氧化碳排放数据, 必须估算, 对这些数据的整理和估算方法参考了陈诗一 (2009) 和张军等 (2009) 的研究。下面分别进行介绍。

1. 工业增加值。为了与 1994 年中国财税制度的根本性改革相衔接, 从 1995 年开始, 工业统计指标体系和指标含义都有了较大的调整。如工业总产值、工业中间投入等指标均按不含增值税的价格计算, 工业净产值改为工业增加值, 应交增值税单独加到工业增加值中。从相关年份《中国统计年鉴》和《中国工业经济统计年鉴》中, 可以获得 1992 年后的工业分行业当年价工业增加值和 1992 年以前的工业净产值数据。其中, 1985~1992 年工业增加值和工业净产值是同时提供的。因此, 本文主要基于对应的工业净产值来构造 1991 年前分行业工业增加值序列。根据统计年鉴的定义, 工业增加值中包括工业净产值中没有的折旧、大修理基金和非物质生产部门的劳务费; 而工业净产值中包括增加值中没有的企业对非物质生产部门的支付如利息支出等, 即: 工业增加值 = 工业净产值 - 支付给非物质生产的费用 - 利息支出 + 固定资产折旧 + 大修理基金。其中, 各行业支付给非物质生产的费用、利息支出和大修理基金难以获得, 但是统计年鉴基本上提供了我们所需要的 1991 年前的分行业本年折旧数据而

<sup>①</sup> 王锋等 (2010) 和张友国 (2010) 所分解的第 1 个因素也都是碳排放系数效应, 他们采用与本文相同的处理方法假定各种化石能源的碳排放系数在计算过程中均保持不变, 因此最后该效应或为 1, 或只剩下化石能源之外的电力热力的碳排放系数变化。

不需要另外去进行估算。因此,本文计算 1991年前当年价工业增加值的公式为:工业增加值 = 工业净产值 + 提取的折旧基金。

1986年第二次全国工业普查《工业经济统计资料》提供了 1985年分行业工业净产值、提取的折旧基金和工业增加值数据,完全满足上述计算公式。最后利用 2009年《中国城市(镇)生活与价格年鉴》提供的工业分行业工业品出厂价格指数对工业增加值进行平减,由此获得 1990年为基年的 1980~2008年可比价分行业工业增加值。

2 能源消费和二氧化碳排放。历年《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》提供了 1980~2008年工业分行业能源消费总量以及煤炭、原油和天然气的消费量数据,这些都是实物量数据,单位分别为万吨标准煤、万吨煤炭、万吨原油和亿立方米天然气。世界上温室气体排放量多是通过化石能源消费量推算得来,<sup>①</sup>本文主要以煤炭、原油和天然气 3种一次能源为基准来核算中国工业分行业的二氧化碳排放量。

根据 2006年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)为《联合国气候变化框架公约》及《京都协议书》所制定的《国家温室气体清单指南》第二卷(能源)第六章提供的参考方法,二氧化碳排放总量的计算公式如下:

$$C = \sum_{j=1}^3 C_j = \sum_j E_j \cdot NCV_j \cdot CEF_j \cdot COF_j \cdot (44/12) \quad (4)$$

除了上面已经定义的变量之外,  $C_j$  代表第  $j$ 类能源产生的二氧化碳排放量(单位为万吨)。 $NCV$ 为 2007年《中国能源统计年鉴》附录 4提供的中国 3种一次能源的平均低位发热量。 $CEF$ 为 IPCC 温室气体清单提供的碳排放系数。由于没有直接提供煤炭的排放系数,而中国原煤产量分类比重多年来变化不大,一直以烟煤为主,占 75%~80%,无烟煤占 20%左右,因此,本文根据 IPCC 提供的烟煤和无烟煤碳排放系数的加权平均值来计算煤炭的碳排放系数。 $COF$ 是碳氧化因子(本文煤炭设定为 0.99,原油和天然气为 1)。44和 12分别为二氧化碳和碳的分子量。由于能源消耗单位的不统一,必须换算成中国能源度量的统一热量单位标准煤,各种能源折算标准煤系数由同期《中国能源统计年鉴》提供。本文最终所估算的中国煤炭、原油和天然气的二氧化碳排放系数为每万吨标准煤分别排放 2.763、2.145和 1.642万吨二氧化碳。

数据不同,选择的分解方法自然也不同。本文拥有 1980~2008年中国工业 38个两位数行业的面板数据,因此选择了 38个行业 and 3种能源这两个维度对中国工业二氧化碳排放强度进行分解的 LMDI方法,这样既可以进行 Laspeyres 指数分解法所不

<sup>①</sup> 参见 IPCC温室气体清单指南(2006年)。王锋等(2010)也对温室气体特别是二氧化碳排放的计算进行了详细介绍。

适用的乘法分解和环比发展指数分析,又可以进行结构分解法因受限于投入产出表而不能进行的连续时点环比分析。本文的研究对象集中于工业部门,分析了近40个两位数行业,研究行业数目之多在现有文献中尚没有发现;本研究跨度为1980~2008年,研究样本区间长,可以进行其他文献所不能进行的各时期的不同碳强度变化模式研究,这一点可以看作本文与已有文献的主要不同。如综述所叙,一些文献分解的因素较多,部分原因是它们使用了包含三次产业部门和省级地区维度数据的原因,但是因素较多带来的一个共同问题就是变化模式多,进行兼容性解释比较困难,而且大部分文献只是对分解后因素变化的描述,鲜有给出其背后合理的经济和政策解释,即使对因素进行了细分,也仍然没有超出强度效应、结构效应、产出效应和规模效应这几个大方面的因素。基于此,本文把碳强度变化只分解成强度效应和结构效应两大因素。后者再进一步分为能源结构和工业结构两个因素。与其他分解文献不同,本文旨在集中对这些因素变化模式后的历史经验和政策寓意进行解释和分析。由于不是对二氧化碳排放总量进行分解,所以一般不分解出产出效应和规模效应。

#### 四 工业碳排放强度变化的因素分解和解释

图4绘制出中国工业全行业二氧化碳排放强度环比发展指数及其分解组分指数的趋势图。由该图可见,碳强度指数虽然起伏较大,但是更多的年份为负增长,近30年中只有7个年份是正的增长,其中1995年后只有2004年一年碳强度是增加的,因此总体上碳强度表现出波动中下降的趋势。由图4还可以看出,二氧化碳排放强度指数的变化模式更多由能源强度指数或者说能源生产率来解释,它们表现出高度相似的波动性,两条指数线多处重叠。虽然能源结构效应和工业结构效应与碳强度指数的相关性较弱,但还是体现一定的解释力。表现在表1各时期碳强度指数和3种因子指数的平均值上,<sup>①</sup>能源强度指数与碳强度指数更相近,而能源结构指数和工业结构指数的数值则和碳强度指数相去较远。就整个改革开放时期而言,工业二氧化碳排放强度指数平均下降了4.55个百分点,其中,能源强度指数平均下降3.82个百分点,工业结构指数只下降了1.23个百分点,而能源结构指数却上升了0.48个百分点。<sup>②</sup>下面分别就3个影响因素的变化模式进行具体解释。

① 表1各子时期是根据图3工业全行业碳强度变化模式不同进行划分的。

② 由表1数值计算而得。

表 1 工业碳强度指数及其 IMDI 因素分解跨期平均值

时期区间	碳强度指数	因素分解		
		能源结构指数	工业结构指数	能源强度指数
1981~ 1990	0.9883	1.0069	0.9877	0.9938
1990~ 1995	0.9615	1.0101	0.9915	0.9600
1995~ 2004	0.9206	0.9999	0.9781	0.9412
2004~ 2008	0.9502	1.0045	1.0015	0.9445
1981~ 2008	0.9545	1.0048	0.9877	0.9618

(一) 能源结构效应

由图 5 可见, 煤炭是中国的  
主要能源资源, 其次为石油。在  
中国工业一次能源消费中, 煤炭  
平均约占 74.2%, 是世界上几个  
以燃煤消费为主的国家之一, 同  
时也是全球煤烟型污染最为严重  
的地区, 这是造成中国二氧化碳  
排放强度高的主要原因。在化石  
能源当中, 不洁净的煤炭的二氧  
化碳排放系数高于石油和天然  
气。因此, 能源结构的变化对工  
业碳强度排放是有影响的。

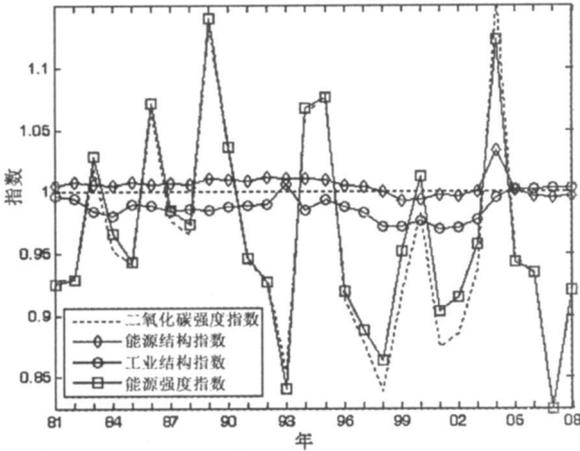


图 4 中国工业二氧化碳排放强度环比发展指数及其因素分解 (1981~ 2008)

如图 5 所示, 从改革初期到 1995 年, 煤炭占比由 68% 逐年升高到 78.4% 的峰值, 这与 20 世纪 80 年代国家为了缓解长期计划经济造成的能源短缺对能源生产采取鼓励政策相关。中国的煤炭、石油、电力等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、竞争最为激烈的就是煤炭产业, 小煤矿不断增加; 同时, 煤炭双轨制价格于 1994 年在所有资源性产品中率先基本放开, 煤炭市场完全形成, 煤炭的生产也达到了顶峰。小煤矿等能源密集型小企业的盲目发展, 导致能源生产过剩, 而且这些小煤矿大多采取破坏性开采, 未采取环保措施, 对环境造成了严重污染。反映在图 4 上, 这段时期能源结构指数是惟一与碳强度指数降低反向变化的因子, 该时期碳强度指数下降了 1.17% ~ 3.83%, 而能源结构指数却上升了 0.69% ~ 1.01%。随着中国政府大量关停并转小煤矿等能源密集型小企业并对能源生产由鼓励转为限制, 如图 5 所示, 1995 年之后到本世纪初煤炭消费占比出现了整个改革时期性

一的下降进程,其占一次化石能源的比例降至 2000年最低的 70.89%。如果包括非化石一次能源,煤炭消费量比重则降至 2000年的 66%,石油、天然气、水电、核电、风能、太阳能等所占比重上升到 2000年的 34%。反映在图 4和表 1,这段时期是能源结构指数惟一对碳强度降低起促进作用的时期,也是 3个因子平均指数同时下降的时期,尽管能源结构指数负增长数值很小。随着本世纪以来的工业再次重型化,煤炭占比又开始回升,2008年达至新高 75.9%;相应地,能源结构指数也出现 0.45%的正增长,导致能源结构在整个时期的最终正增长效应,对碳强度的降低起到一个阻碍的作用。

当然,能源结构对碳强度的影响总体上是比较小的,这是因为调整能源结构在根本上受到能源资源禀赋的制约,各个国家在统计能源消费种类构成时前后数值比较一致。比如,中国和美国分别为全球第一和第二大煤炭消费国,大量的燃煤发电也使得两国的温室气体排放量最大。因此,考虑到中国以煤为主的能源资源结构和消费结构,短期内中国通过调整能源结构来减少二氧化碳排放量和降低碳强度的潜力并不大;但是长期而言,通过大力发展洁净煤技术和核电、水电、风能、太阳能等清洁能源以及鼓励新能源和可再生能源的开发,以煤炭为主体的能源结构将会向清洁能源结构方向发展。中国目前已经提出在 2020年前非化石能源占一次能源消费比重达到 15%的明确目标,这将有力促成未来碳强度减排。

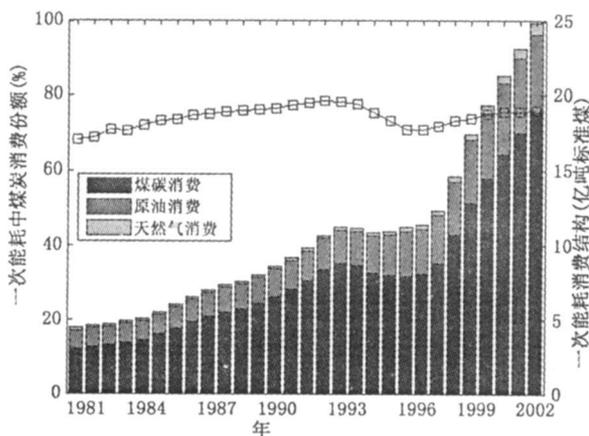


图 5 中国工业一次能耗中煤炭、原油和天然气消费量构成(柱形)与相应的煤炭份额变化(曲线)(1980~2008)

## (二) 工业结构效应

从图 4和表 1可以看出,相对于能源结构指数只有一个时期对碳强度减排起促进作用,工业结构指数则在大部分样本期内对碳强度下降都起正面作用,只有重工业化最后一个时期其作用是负面的。工业结构是经济结构的重要组成部分,工业结构的调整是指在工业经济增长过程中,生产要素在技术、效率和效益不同的工业行业之间重新流动和配置并最终达到各行业产值比重发生变化的过程。结构调整是世界经济\* 201年第4期 • 135 •

济持续增长的重要源泉,也是当今各国转变经济发展方式的根本途径, Timmer 和 Szirmai(2000)曾经将结构调整对经济增长的正向影响称为结构红利假说。

具体到本文,产业结构调整被刻画为生产要素在低能耗、低污染、低排放的轻工业和高新技术行业与高投资、高能耗、高排放的重化工业行业之间的流动。图6分别根据2004年各行业能源消费和二氧化碳排放总量由低到高的排序,把所有38个样本行业分为低能耗组和能耗密集型组别(每组各19个行业,排放组别同此)、低排放组和污染排放密集型行业,并绘制出两个组别工业增加值份额的变化趋势曲线。很显然,改革开放以后,原先以重工业优先发展的赶超发展战略已经改变成轻重工业并重发展,以乡镇企业、民营企业和外资企业为代表的轻工业得到了快速发展。所以,图6所示的低能耗和低排放组别的工业增加值份额在20世纪80年代和90年代都呈明显的上升趋势,相对应,能耗和排放密集型组别的产出份额逐年下降。图4和表1所示的工业结构指数呈现与碳强度指数同向的负增长,可见,生产要素向更高效率的低能耗、低排放行业的重新配置对碳强度降低有着促进作用,结构红利是存在的。尤其需要指出的是,为了应对国有企业的财务危机,中央从20世纪90年代中期开始进行以建立现代企业制度为目标的国有企业所有制改革,其中特别关停并转迁了10多万家高能耗和排放密集型的小企业。这是此前从来没有过的节能减排措施,所以这一时期能耗和排放密集型重化工业行业的增加值份额下降得更快,它对二氧化碳排放强度降低的正向促进作用也是最大的,工业结构指数下降达2.19个百分点。本世纪以来的工业

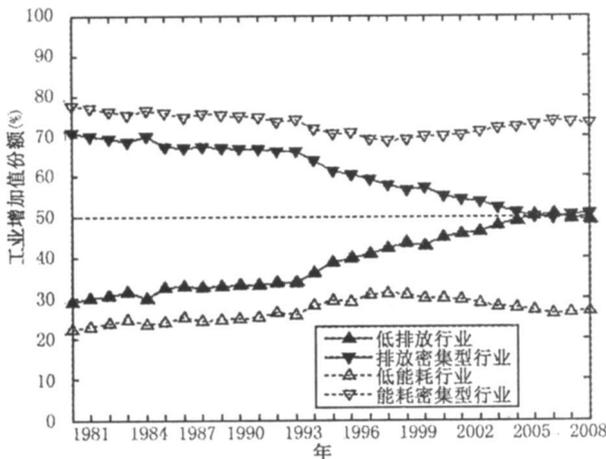


图6 中国工业低排放和高排放行业、低能耗和高能耗行业的产出结构演化(1980~2008)

再次重型化在图6上也显示得很清楚,排放密集型行业的增加值份额停止了20年来的下降趋势,与低排放组别的份额基本持平,而能源密集型行业的产出份额有所上升,且高于70%。表现在图4和表1上,工业结构指数第一次出现0.15个百分点的正增长,对碳强度下降也由促进转为阻碍作用。

整体而言,能源结构效应和工业结构效应对碳强度降低的影响力都不大,但是从历史数据分析来看影响方向却相反,前者主要起阻

碍作用,后者起到了促进作用。因此,有必要进一步促进生产要素由高能耗和排放密集型行业,向高加工度化和技术集约化的轻工业与高新技术行业流动,努力实现后者比前者的更快发展,依靠信息技术革命为碳强度减排做出切实的贡献,这是中国特色新型工业化道路的必由之路。

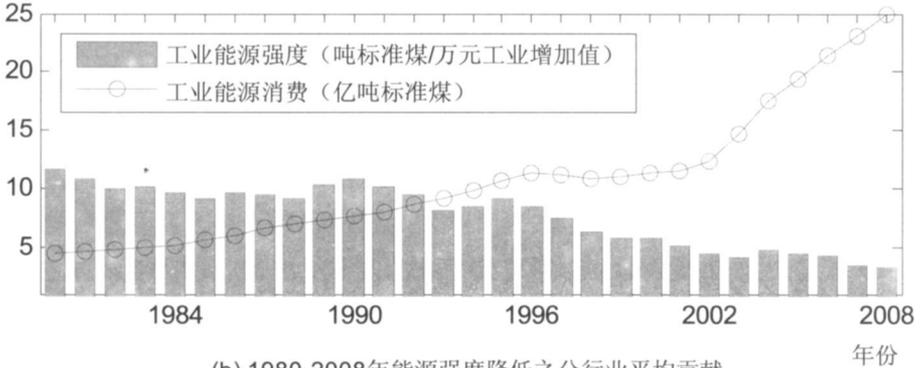
### (三)能源强度效应

与大多数对二氧化碳排放总量或强度进行分解的研究文献一样,本研究也得出了能源强度降低是驱动碳强度降低的主要原因,能源强度指数与碳强度指数最为接近(见表1),两条指数曲线大部分时期重叠,只在能源结构和工业结构变动比较剧烈的20世纪90年代中后期相差远一些(见图4)。二氧化碳排放的实质是能源消耗,能源生产率是能源强度的倒数,可见,二氧化碳排放强度减排根本上取决于能源强度的降低或者说能源生产率的提高,与节能减排密不可分。导致碳强度下降有直接减排和间接减排两种因素,这里由于能源生产率提高所导致的碳强度下降就是直接减排效应,而前述的能源结构和工业结构调整则属于间接减排机制。

1953年全国能源消费只有0.54亿吨标准煤,改革开放初期的1978年,能源消费为5.7亿吨标准煤,而到了2008年,全国能源消费已经达到了28.5亿吨标准煤。图7绘制了工业全行业能源消费总量和能源强度变化以及1980~2008年能源强度降低的分行行业贡献,其中,工业全行业能源强度变化以及分行行业贡献份额计算所使用的权重也是工业总产值。1980和2008年工业能源消费分别为4.48和24.9亿吨标准煤,占到了全国能源消费的74.4%和87.5%,可见能源在工业部门的投入需求变得越来越大。与此相对应,图1显示的1980和2008年工业二氧化碳排放占全国排放的比例分别高达76.1%和96.3%就不奇怪了,较高的煤炭消费份额和煤炭的二氧化碳排放系数在其中更起到了一个放大作用。

图3和表1根据二氧化碳排放强度的变化模式把整个改革时期分为了4个阶段,图7(a)能源消耗及其强度的变化也大致上服从相似的模式。在1995年以前,能源消耗稳步提高,能源强度波动中下降,平均下降了2.28%。同样,从1996年到本世纪初工业的剧烈改革时期,工业能源消费一改此前的上升趋势转而原水平踏步不前,工业能源强度也出现了整个改革时期最长的下降进程,从1995年每万元增加值9.14吨标准煤下降到2003年的4.15吨标准煤,平均下降了7.68%,能源生产率显著提高。本世纪以来重工业化现象的再次出现也反映在能源消费和能源强度的变化上,房地产和汽车工业的急剧扩张、基础设施投资的持续加大、机电和化工等资源密集型产品出口份额的增加等带动了采掘业、石油和金属加工业、建材及非金属矿物制品业、化工和

(a) 工业能源消费总量和能源强度



(b) 1980-2008年能源强度降低之分行业平均贡献

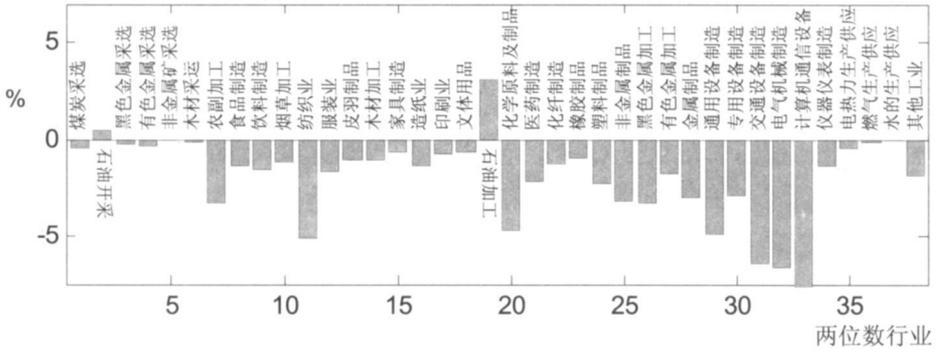


图 7 工业全行业能源消费总量、能源强度变化及其分行业贡献 (1980~2008)

机械设备制造等能源密集型行业的急剧膨胀。如图 7(a)所示,工业能源消费陡峭上升,能源强度在大的下降趋势中出现了短暂回升。图 7(b)则绘制了工业全行业能源强度 2008年相对于 1980年的下降百分比中各两位数行业的贡献份额。中国工业全行业 1980年每万元增加值消耗 11.7吨标准煤,2008年则下降到 3.2吨标准煤,累计下降幅度大约为 73%。其中,计算机、电子与通信设备制造业引致下降 9%,贡献最大;医药制造业、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也都分别贡献了 2%~6%,累计降低能源强度 26%。近一半的能源强度降低由以上高新技术行业完成,说明大力发展高新技术行业不仅是工业信息技术革命的需要,而且能够为新型工业化所必需的低碳革命做出重大贡献。轻工业行业也是工业能源强度降低的主要贡献者,比如纺织业贡献了 5%的下降幅度,农副食品加工业、食品制造业、饮料制造业、烟草加工业、服装业、皮羽制品业的贡献份额

也分别为 1% ~ 3%。当然,传统重工业行业的节能减排和更新改造对工业全行业能源强度的降低也功不可没,比如化学原料及化学制品制造业的贡献接近 5%,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、化学纤维制造业、造纸及纸制品业贡献的下降额度都分别为 1% ~ 3%, 17 个重化工业行业累计降低能源强度大约为 21%。所有 38 个两位数行业只有两个行业对工业整体能源强度的下降起到了反向的抑制作用,这就是石油和天然气开采业以及石油加工及炼焦业,它们分别引致能源强度上升 0.5 和 3.1 个百分点,因此未来对这两个行业的能源生产率提高要更加重视。

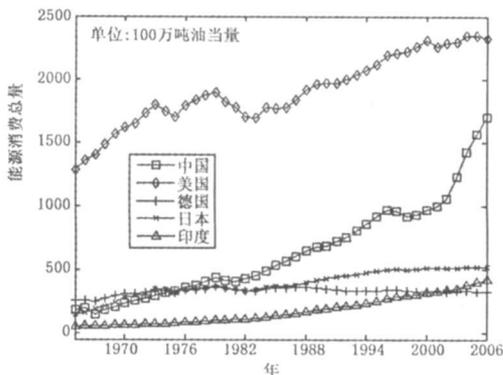
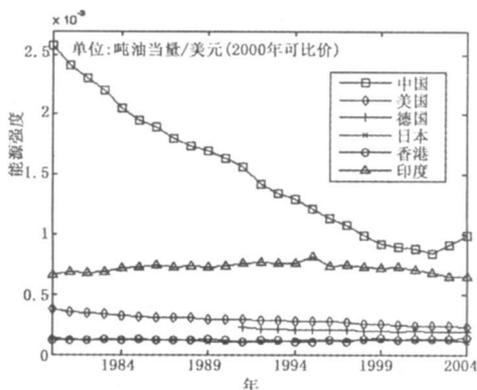


图 8 主要经济体能源强度比较 (1980~2004) 图 9 主要经济体能源消耗总量比较 (1965~2006)

中国工业能源强度的整体下降趋势说明了能源生产率在持续改善之中,许多文献都在探求中国能源生产率提高背后的原因。Garbacci 等 (1999) 研究认为技术进步是中国能源强度下降的主要原因。由于技术是一种无形资产,所以许多文献往往用研发支出来间接推算技术进步。Fisher-Vanden 等 (2004, 2006) 研究发现煤炭价格改革、能源部门 R&D 支出推动的技术创新、<sup>①</sup>国有企业所有制改革<sup>②</sup>和高能耗行业向低能耗行业的产业结构调整是 1997~1999 年中国工业能源强度下降的主要驱动因素,而内部技术发展对通过 FDI 或市场转移的外国技术的吸收具有重要作用。Mukherjee 和 Zhang (2007) 也把技术进步看做是中国工业改革成功的关键,认为通过广泛吸纳 FDI 和建立外资企业,中国从发达国家引进了先进技术和知识。Fisher-Vanden 和 Jeffer-

① 即便不是能源要素节约型的技术偏向路径,至少也是能源中性的技术进步。

② 大量研究认为非国有企业比国有企业具有更高的技术效率和资源利用效率 (姚洋和章奇, 2001)。

son(2008)指出,过去 25 年中国的科技创新激励已经由国家主导下放到企业、研究机构 and 大学主导,技术市场也在迅速发展。<sup>①</sup>王锋等(2010)也把 1997~1999 年中国工业部门能源强度下降的深层次原因归结为研发经费支出大幅度提高所推动的技术进步和工业企业所有制结构的变化。

如前所述,改革开放以来,中国能源生产率有了很大提高,而且从图 8 也可以看到,中国能源强度下降相对于其他主要经济体是最快的,只是在 2002 年后有所回升;但是,中国的能源强度绝对值还是太高,仍然有很大的下降空间。以 2004 年为例,中国能源强度为每万美元 GDP(2000 年价格)消耗 9.9 万吨标准油,这个数值远高于美国、德国、日本、中国香港的 2.3、1.9、1.1 和 1.4 万吨标准油,即使比印度的 6.5 万吨标准油也要高。从图 9 能源消费总量的跨国比较来看,中国节能的国际压力更大。改革开放后,中国能源消耗快速增加,特别是本世纪以来急剧飙升,直逼美国。2006 年,中国能源消耗量为 1696.8 百万吨油当量,仅次于美国的 2326.4 百万吨油当量,远高于日本、印度和德国的 520.3、423.2 和 328.5 百万吨油当量。国际能源署的最新能源报告甚至认为中国在 2009 年已经超过美国成为世界第一大能源消耗国。从能源加工、转换、贮运和终端利用综合效率来看,不同的能源品种和能源结构会产生不同的组合效率,虽然中国目前的能源利用效率比 1980 年已经提高了近 10 个百分点,但是根据吴巧生和成金华(2006)提供的 2004 年各国能源利用效率的比较看,中国为 36.46%,比美国、日本、法国的 49.9%、51.43% 和 65.45% 低很多。由此可见,中国的能源利用效率也有很大的提升空间。

## 五 结论及政策建议

基于本文对中国工业 38 个两位数行业在 1980~2008 年二氧化碳排放强度的 LMDI 分解结果,可以得出间接的结构效应(能源结构和工业结构)和直接的能源强度是影响工业碳强度波动性下降的主要因素,其中,能源强度的降低又最为重要。张坤民等(2008)指出,以低排放和低污染为基础的低碳经济模式,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。未来应该紧紧围绕这些影

<sup>①</sup> 《中国科技统计年鉴 2009》给出的历年数据显示,全国 R&D 支出由 1995 年的 348.7 亿元增加到 2008 年的 4616 亿元。其中,研究与开发机构由 1995 年占用 146.4 亿元增加到 2008 年的 811.3 亿元;高等学校由 1995 年占用 42.3 亿元增加到 2008 年的 390.2 亿元;企业占用由 2000 年的 537 亿元上升到 2008 年的 3381 亿元,特别是大中型工业企业占用的 R&D 支出由 1995 年的 141.7 亿元增加到 2000 年的 353.4 亿元,在维持 40% 左右的份额后快速增加到 2008 年的 2681.3 亿元,其份额也上升到 58.09%。

响因素来实施合理的节能减排政策,特别是执行能够切实提高能源生产率的措施,为中国未来碳强度约束性指标的成功实现提供充分的政策保障。

#### 参考文献:

- 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。
- (2010a):《“低碳转型”会导致经济减速吗?》,《解放日报》,7月 26日。
- (2010b):《节能减排与中国工业的双赢发展:2009-2049》,《经济研究》第 3 期。
- 李小平、卢现祥 (2007):《中国制造业的结构变动和生产率增长》,《世界经济》第 5 期。
- 林伯强、蒋竺均 (2009):《中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析》,《管理世界》第 4 期。
- 刘红光、刘卫东 (2009):《中国工业燃烧能源导致碳排放的因素分解》,《地理科学进展》第 2 期。
- 宋德勇、卢忠宝 (2009):《中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究》,《中国人口·资源与环境》第 3 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。
- 王锋、吴丽华、杨超 (2010):《中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究》,《经济研究》第 2 期。
- 吴巧生、成金华 (2006):《中国工业化中的能源消耗强度变动及因素分析》,《财经研究》第 6 期。
- 徐国泉、刘则渊、姜照华 (2006):《中国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995-2004》,《中国人口·资源与环境》第 6 期。
- 姚洋、章奇 (2001):《中国工业企业技术效率分析》,《经济研究》第 10 期。
- 张军、陈诗一、Jefferson (2009):《结构性改革与中国工业增长》,《经济研究》第 7 期。
- 张军、刘君 (2008):《中国的能源消费模式变化及其解释》,《学术月刊》第 7 期。
- 张坤民、潘家华、崔大鹏 (2008):《低碳经济论》,中国环境科学出版社。
- 张友国 (2010):《经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响》,《经济研究》第 4 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。
- 主春杰、马忠玉、王灿、刘子刚 (2006):《中国能源消费导致的 CO<sub>2</sub> 排放量的差异特征分析》,《生态环境》第 5 期。
- Albrecht J.; Francois D. and Schoors K. “A Shapley Decomposition of Carbon Emissions without Residuals” *Energy Policy*, 2002, 30, pp 727 - 736
- Ang B.W. “Sector Disaggregation, Structural Change and Industrial Energy Consumption: An Approach to Analyze the Interrelationships” *Energy*, 1993, 18(10), pp 1033 - 1044
- . “Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which Is the Preferred Method?” *Energy Policy*, 2004, 32, pp 1131 - 1139
- Ang B.W. and Choi K.H. “Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: a Refined Divisia Index Method” *Energy*, 1997, 18 (3), pp 59- 73.
- Ang B.W.; Liu F.L. and Chew, E.P. “Perfect Decomposition Techniques in Energy and Environmental Analysis” *Energy Policy*, 2003, 31(14), pp 1561- 1566
- Ang B.W. and Zhang F.Q. “A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies” *Energy*, 2000, 25, pp 1149- 1176
- Ang B.W.; Zhang F.Q. and Choi K.H. “Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators

through Decomposition" *Energy*, 1998, 23 (6), pp 489–495

Ang J.B. "CO<sub>2</sub> Emission Research and Technology Transfer in China" *Ecological Economics*, 2009, 68 (10), pp 2658–2665

Boyd G.A.; McDonald, J.F.; Ross M. and Hanson D.A. "Separating the Changing Composition of US Manufacturing Production from Energy Efficiency Improvements: A Divisia Index Approach." *Energy*, 1987, 8(2), pp 77–96

Chang Yih F.; Charles L. and Lin, S.J. "Comprehensive Evaluation of Industrial CO<sub>2</sub> Emission(1989–2004) in Taiwan by Input–Output Structural Decomposition." *Energy Policy*, 2008, 36(7), pp 2471–2480

Chung H.S. and Rhee H.C. "A Residual–Free Decomposition of the Sources of Carbon Dioxide Emissions: a Case of the Korean Industries" *Energy*, 2001, 26 (1), pp 15–30

Doblin C.P. "Declining Energy Intensity in the US Manufacturing Sector" *Energy*, 1988, 9(2), pp 109–135.

Fan Y.; Liu, L.C.; Wu, G.; Tsai H.T. and Wei Y. "Changes in Carbon Intensity in China: Empirical Findings from 1980–2003." *Ecological Economics*, 2007, 62, pp 683–691.

Fisher–Vanden K. and Jefferson, G.H. "Technology Diversity and Development: Evidence from China's Industrial Enterprises" *Journal of Comparative Economics*, 2008, 36(4), pp 658–672

Fisher–Vanden K.; Jefferson G.H.; Liu, H. and Tao Q. "What Is Driving China's Decline in Energy Intensity?" *Resource and Energy Economics*, 2004, 26, pp 77–97.

Fisher–Vanden, K.; Jefferson, G.H.; Ma J. and Xu J. "Technology Development and Energy Productivity in China" *Energy Economics*, 2006, 28, pp 690–705.

Garbaccio R.F.; Ha M.S. and Jorgenson D.W. "Why Has the Energy–Output Ratio Fallen in China?" *Energy*, 1999, 20(3), pp 63–91.

Greening L.A.; Davis W.B. and Schipper L. "Decomposition of Aggregate Carbon Intensity for the Manufacturing Sector: Comparison of Declining Trends from 10 OECD Countries for the Period 1971–1991." *Energy Economics*, 1998, 20(1), pp 43–65.

Guan, D.B.; Hubacek, K.; Weber C.L.; Peters G.P. and Reiner D.M. "The Drivers of Chinese CO<sub>2</sub> Emission from 1980 to 2030" *Global Environmental Change*, 2008, 18, pp 626–634.

Hoekstra R. and Van den Bergh J.C.J.M. "Structural Decomposition Analysis of Physical Flows in the Economy" *Environmental and Resource Economics*, 2002, 23(3), pp 357–378

—. "Comparing Structural and Index Decomposition Analysis" *Energy Economics*, 2003, 25, pp 39–64

Kahr J.F. and Roland–Holst D. "Growth and Structural Change in China's Energy Economy." *Energy*, 2009, 34(7), pp 894–903

Liu, C.C. "A Study on Decomposition of Industry Energy Consumption" *International Research Journal of Finance and Economics*, 2006, 6, pp 73–77.

Liu, X.Q.; Ang B.W. and Ong H.L. "The Application of the Divisia Index to the Decomposition of Changes in Industrial Energy Consumption" *Energy*, 1992, 13(4), pp 161–177.

- Li, L.; Fan, Y.; Wu, G. and Wei, Y. "Using LMDI method to Analyze the Change of China's Industrial CO<sub>2</sub> Emissions from Final Fuel Use: An Empirical Analysis" *Energy Policy*, 2007, 35(11), pp. 5892–5900
- Mukherjee, A. and Zhang, X. "Rural Industrialization in China and India: Role of Policies and Institutions" *World Development*, 2007, 35(10), pp. 1621–1634.
- Park, S. H. "Decomposition of Industrial Energy Consumption – An Alternative Method" *Energy Economics*, 1992, 14(4), pp. 265–270
- Rose, A. and Casler, S. "Input–output Structural Decomposition Analysis: A Critical Appraisal" *Economic Systems Research*, 1996, 8, pp. 33–62
- Steenhof, P. A. "Decomposition of Electricity Demand in China's Industrial Sector" *Energy Economics*, 2006, 28, pp. 370–384.
- Sun, J. W. "Changes in Energy Consumption and Energy Intensity: A Complete Decomposition Model" *Energy Economics*, 1998, 20, pp. 85–100
- Timmer, M. P. and Szirmai, A. "Productivity Growth in Asian Manufacturing: The Structural Bonus Hypothesis Examined" *Structural Change and Economic Dynamics*, 2000, 11, pp. 371–392
- Wang, C. "Decomposing Energy Productivity Change: A Distance Function Approach" *Energy*, 2007, 32, pp. 1326–1333
- Wang, C.; Chen, J. and Zou, J. "Decomposition of Energy–Related CO<sub>2</sub> Emission in China, 1957–2000." *Energy*, 2005, 30, pp. 73–83.
- Weber, C. L. "Measuring Structural Change and Energy Use: Decomposition of the US Economy from 1997 to 2002." *Energy Policy*, 2009, 37(4), pp. 1561–1570
- Wood, R. "Structural Decomposition Analysis of Australia's Greenhouse Gas Emissions" *Energy Policy*, 2009, 37(11), pp. 4943–4948.
- Wu, L.; Kaneko, S. and Matsuo, S. "Driving Forces behind the Stagnancy of China's Energy–Related CO<sub>2</sub> Emissions from 1996 to 1999" *Energy Policy*, 2005, 33(3), pp. 319–335
- Zhang, F. Q. and Ang, B. W. "Methodological Issues in Cross–Country/Region Decomposition of Energy and Environmental Indicators" *Energy Economics*, 2001, 23, pp. 179–190.
- Zhang, Z. "Why Did the Energy Intensity Fall in China's Industrial Sector in the 1990s? The Relative Importance of Structural Change and Intensity Change." *Energy Economics*, 2003, 25, pp. 625–638
- Zhang, M.; Mu, H.; Ning, Y. and Song, Y. "Decomposition of Energy–Related CO<sub>2</sub> Emission over 1991–2006 in China" *Ecological Economics*, 2009, 68(7), pp. 2122–2128.
- Zhang, Y. "Structural Decomposition Analysis of Sources of Decarbonizing Economic Development in China, 1992–2006" *Ecological Economics*, 2009, 68(8–9), pp. 2399–2405.
- . "Supply–Side Structural Effect on Carbon Emissions in China" *Energy Economics*, 2010, 32, pp. 186–193.

(截稿: 2010年9月 责任编辑: 李元玉)