

二氧化碳排放：强度减排目标与峰值研究

虞义华 郑新业

摘要：利用我国29个省市自治区1995-2007年间的面板数据，分析二氧化碳排放强度、密度同经济发展水平、以及产业结构之间的关系，本文评估了2020年碳排放强度下降45%的可行性，估计了二氧化碳排放的峰值。研究表明：1) *碳排放强度*（单位GDP二氧化碳排放）同人均GDP之间存在“N”型关系，碳排放强度随着GDP的提高先有一个以递减的速度下降再过渡到以递增的速度急剧下降的趋势；2) *碳排放密度*（人均二氧化碳排放）同GDP间同样存在“N”型关系，即碳排放密度随着GDP的提高有一个先下降再上升然后再下降的趋势；3) 第二产业比重同碳排放强度和密度之间存在正相关关系，即第二产业比重越高，二氧化碳排放强度和密度就越高；4) 研究发现单位GDP二氧化碳排放（*碳排放强度*）一直处于下降阶段，然而即便如此，如果产业结构不改变且没有实施另外的政策，经济增长速度本身难以引致碳排放强度的大幅下降，2020年我国要实现二氧化碳排放强度下降40-45%的目标难以实现；5) 对经济发展与碳排放密度之间关系进行的情景分析表明，我国人均二氧化碳排放目前还处于上升的阶段，二氧化碳排放将在2018-2021年达到峰值，这比科技部公布的时间提前了10年。

关键词：二氧化碳排放；环境库兹涅茨曲线(EKC)；面板数据

一、引言

最近几年,为了因应国内转变增长方式,以及应对国际上二氧化碳减排压力,我国政府在治理仅有局部影响的温室气体,和全球影响的气体如二氧化碳等都采取了积极的措施,并从总量上、或者比率上制定了若干中长期的减排目标。例如,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》既提出了比率指标,即“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低20%左右;也提出了总量控制指标,即主要污染物排放总量减少10%。另外,为了应对国际上要求中国减少二氧化碳排放的压力,2009年11月26日,中国政府公布了控制温室气体排放的比率控制指标,决定到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放(碳排放强度)比2005年下降40%到45%。

就我国政府这一政策宣示而言,一个重要的问题是,经济发展水平提高、经济结构的演变会自动导致这些目标实现吗?若结论为“否”,则政府以数量管制还是以税收方式,亿多大的代价来实现这个目标?为了回答这个问题,我们首先有必要分析碳排放背后的决定因素。到目前为止,碳排放的研究主要集中在人均二氧化碳排放水平的决定因素,以及GDP达到何值时,二氧化碳排放达到峰值等。对碳排放强度方面的讨论相对较少。在有限的文献中,大部分都是以“因素分解”方法来分析碳排放强度变化背后的因素。例如,Subhes and Arjaree (2004)利用LMDI (Log-Mean Divisia Index) 分解法研究1981-2000泰国能耗强度和CO₂排放强度的变化,Fan(2007)利用AWD (Adaptive Weighting Divisia) 研究中国1980-2003碳排放强度的变化;Zhang(2009)等利用IDA (Index Decomposition Analysis) 方法分析1991-2006中国与能源有关的CO₂排放。Zhang (2009)将“因素分解”与投入产出技术相结合,从需求角度研究碳排放的影响因素,将碳排放强度分解为需求和生产技术两类因素,研究我国1992-2006年期间碳排放量以及强度的变化。张红霞和郑新业(2010)进一步将产业结构的影响包括在内,分析了碳排放强度变化的原因。这些研究对我们理解碳排放的决定因素、判断其发展轨迹具有重要的意义。不过,若我们希望对2020年的碳排放强度有一定的预测,则这类研究所提供的信息助益有限。

对于碳排放这样的问题,我们关注的重点应该是长期的,或者是结构性因素。研究表明,经济发展水平是决定碳排放强度的重要因素 (Roberts and Grimes,

1997)。就中国的情况而言，我们认为产业结构对碳排放强度也有重要影响。本文将从经验研究的角度讨论经济发展水平和产业结构对碳排放的影响。

本文对碳排放研究文献的贡献在于：(1) 我们首次利用目前国际上公认的计算 CO₂ 的排放量方法，即我们使用政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的方法来估计中国各省市自治区在 1995-2007 年度三大能源 (煤、石油和天然气) 消耗所产生的二氧化碳量；(2) 本文从碳排放强度 (人均 GDP 二氧化碳排放量) 的视角，而不是从已有的众多文献中的碳排放密度 (人均二氧化碳排放量) 的视角，来研究碳排放与经济发展之间的关系；¹ (3) 就计量分析而言，对于本文所涉及到的面板数据分析，我们在选定合适的模型之前进行了一系列的模型设定检验 (model specification tests)，这样检验的目的在于使我们的计量分析模型更令人信服，进而得到无偏的，有效的参数估计量，以及合适的统计推断 (statistical inference)；(4) 本文的发现为政策制定者和研究者提供了经验研究的依据和参考意见。

全文结构如下：在接下来的第二部分，我们介绍中国二氧化碳排放情况。第三部分讨论经济发展水平、产业结构与碳排放之间的关系，并建立经验分析所需的模型，分析计量分析方法的适用性。第四部分给出二氧化碳排放量的估算方法及描述模型所需的数据及数据来源。第五部分提供研究结果，并对二氧化碳减排强度变化进行情景分析。最后一部分总结本文并给出碳减排相关政策建议。

二、中国碳排放现状

图 1 展示了中国碳排总量的变化趋势。由图可知近十多年来中国的碳排放有了显著的增加，且排放量增加的部分主要来自于煤炭消耗。天然气的消耗量一直都很稳定，所以其碳排放的变化不是很明显；2004 年以后原油的碳排放与 2000 年以前相比有了相对的增加，但其增加的幅度不是很大；容易看出我国的碳排放一直以来都主要是源于煤炭的消耗，并且在 2001 年以后煤炭的碳排放有一个激增期，2001 年的排放量为 32 亿万吨，而在 2007 年，我国的碳排放总量为 63 亿万吨。

¹ Roberts and Grimes (1997) 是我们能找到的唯一研究碳排放强度跟不同经济发展水平相联系的文章。

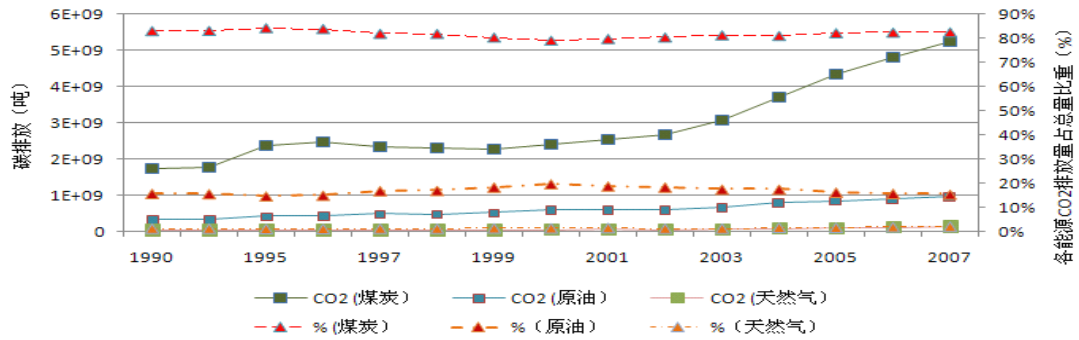


图 1. 中国碳排总量的变化趋势（1990-2007）

数据来源：作者的计算。²

主要是源于煤炭的消耗，并且在 2001 年以后煤炭的碳排放有一个激增期，2001 年的排放量为 32 亿万吨，而在 2007 年，我国的碳排放总量为 63 亿万吨。

从图 2 可知我国的碳排放的几个大省分别为：山东、山西、河北、辽宁、江苏、河南、内蒙古、广东。并且从饼状图可以看出各省的排放量分别为 9.64%、8.17%、7.03%、6.76%、6.45%、6.26%、4.5%、4.30%。也就是说排放量前四的几个省份的排放量总和就已经达到了全国排放量总和的 31.6%，而排放量前八的几个省份已经拥有了全国排放量的 53.1%。由此可见我国的碳排放都集中在少数的几个省份，这些地区和省份要么属于工业大省（例，山东、江苏、辽宁、广东），要么就属于产煤大省（例如，山西、内蒙古）。

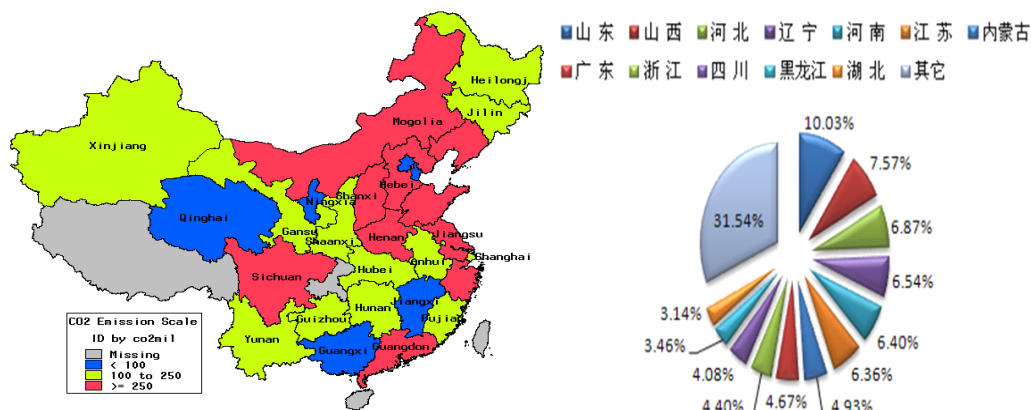


图 2. 2005 年中国碳排放地区分布

数据来源：作者的计算。

² 碳排放量的计算请参阅本文第五部分（即数据来源部分）。

尽管我国的碳排放总量一直都在增加，但是从长期的趋势来看我国的碳排放强度还是呈现出下降的趋势，从1990年的每单位人民币113911.9吨下降到2007年的每单位人民币23077.58吨，降低了约79.74%。尽管如此，中国的碳排放强度仍然远远高于世界平均水平，而且碳排放强度位居前列（图3）。要实现到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放（碳排放强度）比2005年下降40%到45%的国际承诺，上述的对中国碳排放的一些现状分析难以给我们一个清晰的可循路径。由此，我们有必要进一步挖掘二氧化碳减排的影响因素及机制。下面的分析正是致力于这个任务。首先建立碳排放可能的经验模型结构，然后利用现有的数据对其加以统计检验。

三、经济发展水平、产业结构与碳排放强度

环境库兹涅茨曲线（EKC）被广泛用于描述经济增长和各类环境指标之间关系（Shafik and Bandyopadhyay, 1992; Panayotou, 2000; Grossman and Krueger, 1994; Selden and Song, 1994）。EKC表明，经济增长和环境质量之间的关系是非线性的。经济发展水平较低时，经济活动的规模较小，经济生活并不会产生很强的污染。随着经济的不断增长和生产活动的不断扩大，污染的程度也不断增加。污染的程度在经济活动的某一特定水平达到顶峰。在峰值后，环境污染带给人们的负效用超过了生产活动本身带来的收益，人们不仅有控制污染的主

CO₂/GDP

图3. 碳排放强度：中国、美国和世界平均（1991-2007）

来源：美国 Energy Information Administration (<http://www.eia.doe.gov>)。

观愿望，更由于经济发展和技术进步而具有了控制污染的能力。因此当经济发展到某一特定阶段，污染程度会逐步下降。³在多数情况下，环境库兹涅茨曲线体现在环境指标与人均 GDP 之间存在着倒 U 型的曲线 (Panayotou, 2000; Gene and Krueger, 1995)。环境库兹涅茨曲线有着重要的政策含义，它揭示了经济增长过程本身就足以能够伴随环境的改善。如果环境库兹涅茨曲线的假设是成立的，我们可以得出一旦经济增长达到某个程度，它便会对环境产生积极的影响，环境问题会迎刃而解，而没有必要过于担心环境问题。

一直以来，有关 EKC 的讨论越来越多，从早期的一个国家的经济发展水平与环境质量指标之间关系的简单检验朝研究对象、研究技术等方向扩展。其中最为引人注目的是研究对象从二氧化硫等本地污染物 (local pollutants) 延伸到二氧化碳等全球污染物 (Stern, Common and Barbier, 1996; Arrow et al., 1995; Harbaugh and Arik, 2002)。事实上，面临全球气候变暖对人类生存环境的改变和破坏的压力日益紧迫，鉴于二氧化碳这一最重要的温室气体已经成为全球气候变化的主要推动因素，从 90 年代起，有关 EKC 理论的文献也从一般的对环境产生污染的排放物的研究，进而扩展到二氧化碳的排放研究，近年来尤其如此 (He and Richard, 2010)。

如前所述，当 GDP 增长时，一方面，经济规模的扩大会直接导致更多的污染和更多的环境破坏；另一方面，与之相伴的可能是经济结构变化和技术进步，这些改变对污染有减缓作用。由此我们可以看到，影响碳排放的一个重要因素是 GDP，而且两者之间可能存在着非线性关系。在研究二氧化碳与经济发展水平关系文献中，大多集中人均 GDP 和人均二氧化碳排放之间关系。考虑到本文任务是研究碳排放强度与 GDP 之间关系，从而评估 2020 年碳排放强度高，我们需要考察的是碳排放强度，而不是以往文献的人均碳排放。

就我们所知，Roberts and Grimes (1997) 是为数不多的研究二氧化碳排放强度和人均 GDP 关系的文献。他们的研究表明，二氧化碳排放强度与人均 GDP 间存在倒 U 型关系。换句话说，即便没有采取额外的碳排放政策来降低排放强度，经济发展达到某一个阶段之后，碳排放强度也会下降。当然，两者之间的非线性关系并不一定是仅仅表现在倒 U 型一种形式，而有可能呈现出 N 型关系 (Moomaw

³ 所有的 EKC 文献衡量的都是经济增长和环境指标之间的关系，经济增长的程度用人均 GDP 衡量，本文也采取这一传统。

and Unruh, 2001; Galeotti and Lanza, 2005; Friedl and Getzner, 2003; Millimet, List and Stengos, 2003)。另外，产业结构也可能会对碳排放产生重大影响。例如，GDP 相同（近）的两个省因为产业构成不同产生的碳排放有可能有很大的差异，比如说山西和湖北 2007 年的人均实际 GDP 相当（13000RMB, 1995=100），山西的第二产业构成（第二产业增加值占 GDP 比率）为 60%，湖北为 43%。但山西的人均 CO2 排放量比湖北多出了 10 万多吨。

在研究碳排放强度时，我们在传统的 EKC 基础上引入产业结构。由此，我们设定面板模型如下：

$$CO2PGDP_{it} = \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 GDP_{it}^2 + \beta_3 GDP_{it}^3 + \beta_4 SECT_{it} + \mu_{it} \quad (1)$$

示(1)中， $CO2PGDP_{it}$ 代表碳排放强度，定义为*i*省份*t*期的单位实际GDP的CO2排放量（取自然对数形式）。 GDP_{it} 为*i*省份*t*期的人均实际GDP（1995=100，取自然对数形式）。 $SECT_{it}$ 代表产业结构变量，定义为*i*省份*t*期的第二产业增加值占GDP比率。 μ_{it} 为误差项。如果GDP的三次项系数 β_3 不等于零且在统计上显著，则表明GDP和二氧化碳排放存在着一种N型关系。

就计量分析而言，有多种方法来估计式(1)。这些方法包括常系数模型（混合最小二乘法模型，POLS）、固定效应模型（个体和/或时间效应模型，FEM）和误差成份模型（随机个体和/或时间效应模型，REM）。POLS的估计假定在面板数据中既无显著的个体效应也无显著的时间效应。而FEM和REM模型放松对POLS估计的假定，处理的是个体间可能观测不到的异质性问题。

我们用*F*检验来比较POLS模型和FEM模型。如果零假设被拒绝的话，那么传统的只有一个常数项的回归模型（即POLS）就不适合用来估计面板数据。*F*统计量给定如下(Greene, 2003)：

$$F(n-1, nT-n-k) = \frac{(R_{LSDV}^2 - R_{POLS}^2) / (n-1)}{(1 - R_{LSDV}^2) / (nT-n-k)} \quad (2)$$

式(2)中，*n*指的是省份的数目，*T*为时间跨度，*k*为解释变量个数。 R_{LSDV}^2 和 R_{POLS}^2 分别为FEM和POLS模型的拟合优度。

此外，可以用LM拉格朗日乘数(Lagrange Multiplier, LM)检验来检测随机效应(Breusch and Adrian Pagan, 1980)。拒绝零假设意味着REM模型比POLS模型更适用。LM检验的统计量给定如下：

$$LM = \frac{nT}{2(T-1)} \left(\frac{T^2 \bar{e}' \bar{e}}{\dot{e}' \dot{e}} - 1 \right)^2 \sim \chi^2(1) \quad (3)$$

式 (3) 中, $\bar{e}' \bar{e}$ 为 REM 模型的残差平方和, $\dot{e}' \dot{e}$ 为 POLS 模型的残差平方和。

对于 FEM 和 REM 这两种方法, 式 (1) 中的误差项可以写成如下形式:

$$\mu_{it} = \gamma_i + \alpha_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式 (4) 中, γ_i 用来解释省际间观测不到的异质性 (个体效应), α_t 用来解释随着时间推移影响各省的因素 (时间效应)。应用 REM 模型的一个重要假定是观测不到的省际/个体效应与模型中的外生变量不相关。因此, Hausman 检测可以用来检验这个假定。拒绝零假设意味着 FEM 是个比 REM 更适合的模型选择。Hausman 检测的统计量为:

$$m = (\beta_{FEM} - \beta_{REM})' (V_1 - V_2)^{-1} (\beta_{FEM} - \beta_{REM}) \sim \chi^2(k) \quad (5)$$

式 (5) 中, β_{FEM} 和 β_{REM} 分别为 FEM 和 REM 模型的参数估计值。 V_1 和 V_2 分别为 FEM 和 REM 模型的协方差矩阵的一致估计量。

事实上选择 FEM 或 REM 模型取决于两个方面的考虑: 经济上的重要性和计量上的重要性。从经济学上的角度上讲, 有可能存在非时变的、难以量化的随机变量同时影响一些解释变量和被解释变量 (碳排放强度)。从计量的角度上讲, 在回归模型中加入固定效应要优于随机效应, 因为不大可能拒绝观测不到的特征 (变量) 与一些解释变量不相关这一零假设 (Baier and Bergstrand, 2007)。

除了考虑上述的模型设定检测外, 面板模型的估计还应考虑两个问题, 一个是省际间的异方差问题, 另外一个省际间/内的相关问题。异方差的存在与否可以用似然比检验 (likelihood ratio test) 来测试, 这个测试可以通过 STATA 软件来实现。具体的讲, 就是在 `xtgls` 命令内加 `hetero` 选择项来实现。其中 `xtgls` 命令用的是通过迭代广义最小二乘法来估计异方差模型。至于自相关问题, Wooldridge 提供了一种检测面板自相关的测试方法 (Wooldridge, 2002), 这种测试方法后来被 Drukker (2003) 加以改进。本文的面板自相关检验来自 Drukker 所编写的 STATA 程序来完成。

四、数据来源

燃料在燃烧过程中随氧化释放出二氧化碳 (CO₂) 进入大气中, 在计算能源使用中排放的 CO₂ 时, 只要知道燃料使用量及各种燃料的含碳量即可。因此根据经济体中燃料终端使用所消耗的能源数量就可以精确计算该经济体所排放的 CO₂。

目前国际上计算 CO₂ 的排放量都是依据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的方法来估计。在计算 CO₂ 的排放量时, 首先根据各种燃料的热值含量, 将各种燃料消耗量转换成以共同能源单位 (焦耳, joule) 表示的消耗量, 然后其乘上各种燃料的有效二氧化碳排放因子 (Effective Carbon Emission Factor), 求得各种燃料消耗中的实际 CO₂ 排放量。各种燃料的有效 CO₂ 排放因子则是各种燃料消耗的碳含量、碳氧化率 (Fraction of Carbon Oxidized) 及 44/12 (CO₂ 对 C 的分子量比值) 的乘积。因此, CO₂ 排放的计算公式为,

$$E_i = (FC_i)(CAL_i)(CC_i)(CO_i)(44/12) \quad (6)$$

式 (6) 中, i 代表各种能源, FC 为能源消耗总量, CAL 为能源的热值, CC 为碳含量, CO 代表碳氧化率。

中国的能源构成 (煤碳, 石油, 天然气) i 、各种能源消耗总量 FC 来自历年《中国能源统计年鉴》。用于计算的各种能源热值系数来自《2008 中国能源统计年鉴》。各种燃料消耗的碳含量 CC 、碳氧化率值 CO 来源于政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 出版的国家温室气体库存指南 (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) 能源部份第二卷第一章的表 1-3 和 1-4。根据我国行情, 煤碳、石油、天然气的碳氧化率分别设定为 0.80、0.90 和 0.90。

此外, 计算模型中相关变量所涉及到的数据, 如人口 (POP) 数据、第二产业构成 (SECT) 数据和国内生产总值 (GDP) 数据来自历年的《中国统计年鉴》。GDP 数据使用平减后的 GDP (1995=100)。

本文以中国各省市自治区为研究单元和时间跨度为 1995-2007 而组成的面板数据为研究对象。西藏因为数据严重缺失而不纳入本文的研究, 并且考虑到重庆在 1997 年设为直辖市, 本文把重庆市的相关数据全部并入到四川省进行计算。因此本文的最终样本个数为 377 (本文中使用的变量的描述性统计见表 1)。

表 1. 碳强度回归分析相关变量描述性统计结果

指标	个数	均值	标准差	最小值	最大值
GDP (人均实际 GDP, 元)	377	10252.443	8331.599	1853.000	53369.852
POP (万人)	377	4253.785	2874.788	240.000	11847.000
CO2(吨)	377	1.324E+08	1.002E+08	2.762E+06	6.383E+08
CO2PGDP (吨/亿元)	377	16794.340	12459.990	528.590	78957.780
SECT (%)	377	0.454	0.073	0.198	0.600

五、主要发现

利用我国 29 个省市自治区从 1995–2007 年的面板数据对我国二氧化碳排放强度的影响因素进行实证分析，结果如下。

1. 混合 OLS、FEM、REM 回归分析结果

表 2 给出了面板数据框架下各种模型的计量分析结果(包括 POLS 结果), 以供比较。POLS 结果表明除了变量 SECT 外, 其它变量在统计上都不显著。但是比较 POLS 与 FEM 模型的 F 检测统计量 (55.74) 和比较 POLS 与 REM 模型的 LM 检测统计量 (1441.74) 都远远大于其对应的临界值, 表明我们应该拒绝传统的 POLS 回归模型作为本文中的面板数据分析模型, 而选择 FEM 或 REM 模型。同时, 用于比较固定效应模型 (FEM) 和随机效用模型 (REM) 的 Hausman 检验统计量 (15.96) 在 5% 水平下统计显著, 意味着我们应拒绝个体效用和时间效应与自变量不相关这一零假设, 表明带有个体效用和时间效应的固定模型–FEM 模型–是个更好的选择。

尽管根据计量检验得出固定效应模型比随机效应模型更适合本文的面板分析, 但 FEM 模型分析得出的结果跟 REM 模型在本质上相似。FEM 模型的分析结果表明 GDP 的各次项以及第二产业构成变量 SECT 能够有力的解释我国各省碳排放强度的变化–固定效应模型中的 R^2 等于 0.90。当然模型中的固定效应对模型的

拟合也有一定贡献度。GDP 的一次项、二次项和三次项在 5%的水平下均统计显著。这个结果意味着碳排放强度跟 GDP 之间存在既不是线性也不是 U 型的非线性关系，而是一种 N 型关系（ \cap 型），并且我们发现 GDP 的三次项系数为负，

表 2. 模型设定、比较及估计结果（因变量：碳排放强度）

	混合最小二乘法 模型 (POLS)	固定效应 模型 (FEM)	随机效应 模型 (REM)	可行的广义最小二乘法 模型 (FGLS)
常数项	39.017 (0.64)	153.118** (5.31)	134.914** (4.77)	97.043** (4.83)
GDP	-6.701 (0.34)	-45.110** (4.80)	-39.960** (4.31)	-27.620** (4.00)
GDP ²	0.359 (0.16)	4.761** (4.65)	4.238** (4.19)	2.885** (3.66)
GDP ³	-0.003 (0.03)	-0.172** (4.62)	-0.152** (4.15)	-0.102** (3.42)
SECT2	0.051** (8.76)	0.013* (1.84)	0.015** (2.41)	0.0129** (6.00)
R ²	0.34	0.90	(NA)	(NA)
F 检验统计量 = 55.74 [1.42]				
LM 检验统计量 = 1441.74 [5.99]				
Hausman 检验统计量 = 15.96 [9.49]				
LR 异相关检验统计量 = 479.40 [41.34]				
Wooldridge 自相关检验统计量 = 96.21 [4.20]				

注：(i)**(*)表示在5%（10%）水平上显著；(ii)圆括号内值为t值；NA代表不适用；(iii)方括号内值为对应的临界值。

比较表 2 中第二栏的 FEM 模型和第三栏的 REM 模型，我们可以看出，暗示了这么一个现象：随着 GDP 的不断提高，环境质量最终将得以改善。SECT 的系数

在 10%水平下统计显著且系数为正，这个结果符合我们的预期，它表明在保持人均 GDP 不变的情况下，第二产业的比重越高带来的 CO2 排放强度越高。

2. FGLS 回归分析结果

如果不进行进一步的模型设定检验如省际间的异方差检验和省际内自相关检验，我们有可能被表2中FEM模型给出的FEM估计结果所误导。似然比检验（LR test）统计量（479.40）和Wooldridge检验统计量（96.21）表明本文的面板样本存在异方差和自相关问题。如果省际内AR(1)误差结构且省际间异方差存在的话，Hausman检验零假设或备择假设下FEM系数估计值（ β_{FEM} ）或REM系数估计值（ β_{REM} ）都不是最优的，并且式（5）中根据标准公式算出的协方差 V_1 和 V_2 都是无效的（Baltagi, 2005, p. 68）。因此，我们给出一种比POLS和FEM更有效的分析方法—可行的广义最小二乘法（Feasible Generalized Least Squares, FGLS）。FGLS能够修正省际间的异方差检验和省际内（间）的自相关问题。

考虑式（1）中的误差项 μ_{it} ，它的方差协方差矩阵（ V ）由两部份—省际内（间）的相关和省际间异方差—结合而成，具体的讲，为如下形式：

$$E(uu') = V = \begin{bmatrix} \sigma_{11}P_{11} & \sigma_{12}P_{12} & \dots & \sigma_{1N}P_{1N} \\ \sigma_{21}P_{21} & \sigma_{22}P_{22} & \dots & \sigma_{2N}P_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{M1}P_{M1} & \sigma_{M2}P_{M2} & \dots & \sigma_{MN}P_{MN} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } P_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_j & \rho_j^2 & \dots & \rho_j^{T-1} \\ \rho_i & 1 & \rho_j & \dots & \rho_j^{T-2} \\ \rho_i^2 & \rho_i & 1 & \dots & \rho_j^{T-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_i^{T-1} & \rho_i^{T-2} & \rho_i^{T-3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

这个FGLS模型其实是现代教科书中常见的Parks-Kmenta模型 (Parks, 1967; Kmenta, 1986)。

用于比较 Parks-Kmenta 形式的 FGLS 模型和 FEM 模型的 Hausman 检测结果（表2没有给出此检测结果）确实表明在这篇实证分析文章中FGLS模型优于FEM模型。当然，从表2可以看出，FGLS的回归结果同FEM模型的结果是相一致的。具体而言，GDP的一次项、二次项、三次项系数和SECT的系数均通过了显著性水平为5%的显著性检验。但可以看出FGLS模型得出的系数估计值（绝对值）要小于FEM估计值。根据表2的FGLS估计结果，我们写出碳排放强度和GDP、产业结构之间的关系如下：

$$CO2PGDP = 97.04 - 27.62GDP + 2.89GDP^2 - 0.102GDP^3 + 0.012SECT \quad (8)$$

(4.83) (4.00) (3.66) (3.42) (6.00)

3. 经济发展水平与碳排放强度

式(8)的GDP三项系数统计上都显著,表明GDP跟CO2排放强度之间呈现出非线性关系(∩型)。具体的讲,碳排放强度随着GDP的提高先有一个以递减的速度下降再过渡到以递增的速度急剧下降的趋势(见图5)。在GDP系数等于9.44的时候(对应的人均GDP为12637.76元人民币),碳排放强度降得最慢,之后碳排放强度再次呈现快速下降趋势。⁴

在本文的样本内,2007年我国各省GDP系数取值范围为[8.62, 10.88],第二产业结构位于[0.37, 0.48]之间,由此表明,有的省份在经济发展的同时CO2排放强度处于缓慢下降的过程之中,而有的省份在经济发展的时正处于CO2排放强度快速下降阶段。

利用式(8),我们对中国在2020年不同经济发展水平下的碳排放作情景分析。首先利用统计年鉴中的1978-2007第二产业GDP构成的时间序列数据作第二产业GDP构成对时间的线性回归分析,然后依此预测2020年第二产业GDP构成为47.55%。然后,我们假定人均实际GDP从2007年(本文样本所能到的年份)起分别以8.5%、9%、9.5%、10%、10.5%、11%的增速增长。最后,我们再根据不同的增长率计算所得的2020年的人均实际GDP和前述的第二产业构成(47.55%)代入公式(7),得表3结果。

⁴ 根据公式(8),我们用碳排放密度CO2PGDP对人均GDP取偏导数得到,
 $\partial CO2PGDP / \partial GDP = -0.306GDP^2 + 5.78GDP - 27.62 = -0.306(GDP - 9.44)^2 - 0.326$,因此当GDP=9.44时,
 曲线斜率达到最小值(等于-0.326)。

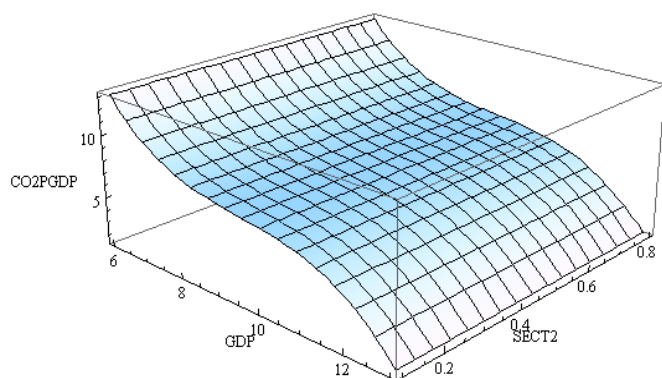


图 5. 碳排放强度随 GDP 变化趋势图

从表3的结果可以看出，在2020年如果第二产业构成保持47.55%的比重不变，即使GDP每年增长率超过10%，碳排放强度下降的空间十分有限，同2005年相比2020年碳排放强度下降还不到10%，离温家宝总理在国务院常务会议上提出的到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%–45%这一目标还有很大的一段差距，由此表明如果产业结构不改变并仍然以现有的产业比重发展经济的话，经济的发展（GDP的上升）并不能带来碳排放强度的大幅下降，我国要实现2020年的碳减排目标会很渺茫。

从另外一个角度上讲，如果我们在2020年要实现温总理提出的目标，即碳排放强度比2005年下降40%，根据公式（8）以及不同的第二产业构成（这里我们假设取值范围为 $[0.30, 0.50]$ ），我们计算出人均实际GDP年均增长速度等于18.7%。⁵这个值远远超过了我们目前的GDP增长现状，由此可见我国要实现2020年的碳减排目标难度很大。

4. 产业结构与碳排放强度

从产业结构与碳排放强度这个方面讲，式（8）表明在人均GDP保持不变的情况下，第二产业构成越高或者说对第二产业依赖度越高，碳排放强度越高。这正印证了前面所述的一个事实：在两市GDP相当的情况下，第二产业比重大的省份其碳排放强度大。例如，山西和湖北在2007年的人均GDP相当，但由于山西的第

⁵ 2007年我国的第二产业构成为48.6%，到2020年短短的13年内，我们对第二产业构成的变化定的这个可能的取值范围应该是合理的。

二产业比重大于湖北，它的碳排放强度要大于湖北。这从另外一个角度给我们传递了这样一个信号：如果我们减少对第二产业的过分依赖，大力发展第三产业，我们不仅能够达到同等的GDP水平，而且达到了碳排放下降、环境改善的目的。

表 3. 2020 年不同经济发展水平下碳排放强度情景（假定 2020 年第二产业构成为 47.55%）

GDP 增长率	8.50%	9.00%	9.50%	10.00%	10.50%	11.00%
碳排放强度下降	-9.40%	-9.45%	-9.50%	-9.55%	-9.59%	-9.64%

5. 产业结构、人均二氧化碳排放密度及其峰值

为研究产业结构与二氧化碳排放密度强度之间的关系及找出碳排放强度的峰值，我们事实上可以通过二氧化碳排放强度回归方程推导出，我们首先重新写出二氧化碳排放强度回归方程式（8）如下，

$$CO2PGDP = 97.04 - 27.62GDP + 2.89GDP^2 - 0.102GDP^3 + 0.012SECT \quad (8')$$

(4.83) (4.00) (3.66) (3.42) (6.00)

因为式（8'）左边因变量为人均二氧化碳排放除以人均 GDP 的对数，右边自变量 GDP 为省总产值的对数，所以在回归方程的两边同时加上 GDP，（8'）就转化成了二氧化碳排放强度的回归方程，⁶

$$CO2PP = 97.05 - 26.62GDP + 2.89GDP^2 - 0.102GDP^3 + 0.013SECT \quad (9)$$

(4.83) (4.00) (3.66) (3.42) (6.00)

式（9）表明GDP跟CO2排放密度之间呈现出”N”型关系（∩型）。具体的讲，碳排放密度随着GDP的提高有一个先下降再上升然后再下降的趋势（图6）。在GDP等于7.98时（对应的人均实际GDP为2921.93元，1995=100），碳排放密度降到最低，然后出现反弹直到GDP等于10.94（对应的人均GDP为56387.34元，1995=100）。之后碳排放密度再次呈现下降趋势。本文研究的时间跨度为1995-2007，在2007年，我国各省的GDP系数取值范围为 [8.62, 10.88]，由此表明，在工业结构保持

⁶ 从数学分析的角度上讲，经过转换后，除了 GDP 的系数在原有的基础上加上 1 的话，其它的系数都应该不变。在计量分析上，我们看也可以证实了这一点，我们可以看出常数项和 SECT 的系数稍有不同，但我们看出他们的区别及其微小，且对应的 t 值都应该一样。

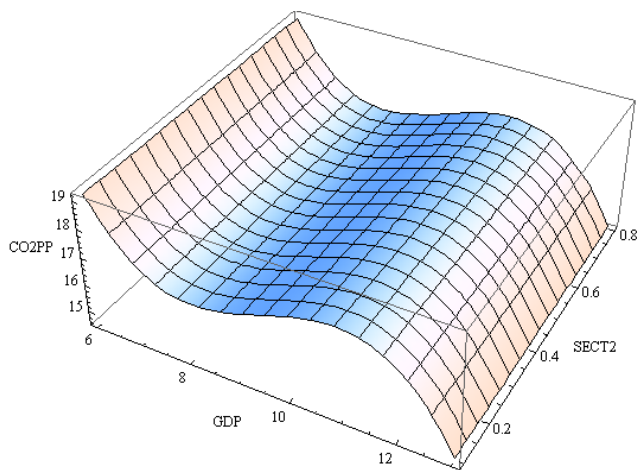


图 6. 人均碳排放随 GDP 变化趋势图

不变的情况下，有的省份随着经济的发展CO2排放密度在上升，而有的省份在经济发展的同时正处于CO2排放密度下降阶段。

从整体来看，在1995-2007年期间，我国的GDP系数取值范围在[8.60, 9.82]，也就是说总体而言，我国的人均碳排放还没有达到峰值。2007年我国的GDP=9.82，对应的人均实际GDP（1995=100）为18553.06元，如果我们假设人均实际GDP的增长率为8.5-9%的话，我们发现人均碳排放达到峰值的时间就在2018-2021年！这个预期要比科技部的预期结果提前了10年⁷。

综合碳强度和碳密度的分析，我们可以预期的总结果是，我国人均二氧化碳排放的峰值年份在2018-2021年，但是在2020年要实现单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%-45%的目标相当困难。

六、结论与政策涵义

利用我国29个省市自治区1995-2007年间的面板数据，本文分析二氧化碳排放强度、密度同经济发展水平、以及产业结构之间的关系。通过多项计量检验，比较了不同计量模型之后，我们选取了能够修正面板异相关和自相关的可行的广义最小二乘法（FGLS）模型。研究发现：1）碳排放强度（单位GDP二氧化碳排放）同人均GDP之间存在“N”型关系，碳排放强度随着GDP的提高先有一个以递减的速度下降再过渡到以递增的速度急剧下降的趋势；2）碳排放密度（人均二

⁷ 科技部部长万钢首次公布中国碳排放峰值年份(<http://news.qq.com/a/20091209/000239.htm>).

氧化碳排放)同GDP间同样存在“N”型关系,即碳排放密度随着GDP的提高有一个先下降再上升然后再下降的趋势;3)第二产业比重同碳排放强度(或密度)之间存在正相关关系,即第二产业比重越高,二氧化碳排放强度(或密度)就越高;4)对经济发展与碳排放强度(或密度)之间关系进行的情景分析表明,我国人均二氧化碳排放(碳排放密度)目前还处于上升的阶段,达到峰值年份在2018-2021年。但我们的研究发现单位GDP二氧化碳排放(碳排放强度)一直处于下降阶段,然而即便如此,如果产业结构不改变且没有实施另外的政策,经济增长速度本身难以引致碳排放强度的大幅下降,2020年我国要实现二氧化碳排放强度下降40-45%的目标难以实现。

本文的实证分析表明似乎存在一种明显的“自发机制”(automatism)使得碳排放随着GDP水平的上升而呈下降趋势,然而该机制发挥的影响力不足以使碳排放降低到我们预期的水平。因此,要履行2020年的人均GDP二氧化碳减少45%的承诺,我国需要出台一个新的政策框架来引发经济发展的结构性突变(structural break),从而改变碳排放与GDP之间的关系,进而实现我们的减排承诺。那么政策制定者应该出台一系列政策,应该出台大力调整和优化产业结构的政策,其中包括大力开发和利用绿色能源与清洁能源以减少二氧化碳的排放量,以及减少对第二产业的过分依赖,大力发展第三产业,减少整个社会的能源消耗。当然,在制定新政策的同时,我们应该清醒的认识到,我国以煤为主的能源结构在短期内难以改变,在保持经济持续发展的前提下要实现大幅度二氧化碳减排是件艰巨的任务,需付出巨大努力。

参考文献

- 张红霞和郑新业(2010),《什么因素决定了碳排放强度的下降?》,中国人民大学环境与发展研究中心工作论文, No. 2010002.
- Baltagi, B. H. (2005) *Econometric Analysis of Panel Data*, 3rd edition. NY: John Wiley & Sons.
- Birgit Friedl and Michael Getzner (2003), “Determinants of CO₂ Emissions in a Small Open Economy,” *Ecological Economics*, vol. 45, no. 1, pp. 133-148.
- Daniel Millimet, John List, and Thanasis Stengos (2003), “The Environmental Kuznets Curve: Real Progress or Misspecified Models?” *Review of Economics and Statistics*, vol. 85, no. 4, pp. 1038-1047.
- David Drukker (2003), “Testing for Serial Correlation in Linear Panel-data Models,” *Stata Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 168-177.

- David Stern, Michael Common, Edward Barbier (1996), "Economic Growth and Environmental Degradation: the Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development," *World Development*, vol. 24, no. 7, pp. 1151-1160.
- Gene Grossman and Alan Krueger (1994), "Economic Growth and the Environment," *NBER Working Paper* 4634, National Bureau of Economic Research Inc.
- Grossman Gene and Alan Krueger (1995), "Economic Growth and the Environment," *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 110, no. 2, pp. 353-377.
- Jie He and Patrick Richard (2010), "Environmental Kuznets curve for CO2 in Canada," *Ecological Economics*, forthcoming.
- Kenneth Arrow et al. (1995), "Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment," *Ecological Economics*, vol. 15, no. 2, pp. 91-95.
- Jan Kmenta (1986), *Elements of Econometrics*, New York: Macmillan.
- Jeffrey Wooldridge (2002), *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, MA: The MIT press.
- Marzio Galeotti and Alessandro Lanza (2005), "Desperately Seeking Environmental Kuznets," *Environmental Modelling & Software*, vol. 20, no. 11, pp. 1379-1388;
- Ming Zhang, Hailin Mu, Yadong Ning and Yongchen Song (2009), "Decomposition of Energy-related CO2 Emission over 1991-2006 in China," *Ecological Economics*, vol. 68, no. 7, pp. 2122-2128.
- Nemat Shafik and Sushenjit Bandyopadhyay (1992), "Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Cross-country Evidence," *Policy Research Working Paper Series* 904, World Bank.
- Richard Parks (1967), "Efficient Estimation of a System of Regression Equations when Disturbances are Both Serially and Contemporaneously Correlated," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 62, no. 318, pp. 500-509.
- Scott Baier and Jeffrey Bergstrand (2007), "Do Free Trade Agreements Actually Increase Members' International Trade?" *Journal of International Economics*, vol. 71, no. 1, pp. 72-95.
- Subhes Bhattacharyya and Arjaree Ussanarassamee (2004), "Decomposition of Energy and CO2 Intensities of Thai Industry between 1981 and 2000," *Energy Economics*, vol. 26, no. 5, pp. 765-781.
- Theodore Panayotou (2000), "Economic Growth and the Environment," *CID Working Paper* 56, Cambridge, MA: Center for International Development at Harvard University.
- Thomas Selden and Daqing Song (1994), "Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?" *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 27, no. 2, pp. 147-162.
- Timmons Roberts and Peter Grimes (1997), "Carbon Intensity and Economic Development 1962-1991: A Brief Exploration of the Environmental Kuznets Curve," *World Development*, vol. 25, no. 2, pp. 191-198.
- Trevor Breusch and Adrian Pagan (1980), "The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification in Econometrics," *The Review of Economic Studies*, vol. 47, no. 1, pp. 239-253.

- Ying Fan, Lan-Cui Liu, Gang Wang, Hsien-Tang Tsai, and Yi-Ming Wei (2007), "Changes in Carbon Intensity in China: Empirical Findings from 1980-2003," *Ecological Economics*, vol. 62, nos. 3-4, pp. 683-691.
- Youguo Zhang (2009), "Structural Decomposition Analysis of Sources of Decarbonizing Economic Development in China; 1992-2006," *Ecological Economics*, vol. 68, no. 8-9, pp. 2399-2405.
- William Greene (2003), *Econometric Analysis*, NJ: Prentice Hall.
- William Harbaugh and Levinson Arik (2002), "Reexamining the Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve," *Review of Economics and Statistics*, vol. 84, no. 3, pp. 541-551.
- William Moomaw and Gregory Unruh (2001), "Are Environmental Kuznets Curves Misleading Us? The Case of CO2 Emissions," *Environment and Development Economics*, vol. 2, no. 4, pp. 451-463.