

技术进步推动下的多国多部门 碳排放与能源使用趋势研究

顾高翔 王 铮

摘要 由经济生产过程中生产工艺的提高所带来的过程技术进步可以降低中间投入的需求,从而减少对能源的需求,降低碳排放。因此,提高过程技术水平是各国减少碳排放量的重要途径。作者以 2012 年的 Jin 模型为基础,构建了一个基于一般均衡的多国多部门经济模型,并将其与 RICE 模型的气候系统相结合,建立了一个经济系统与气候系统相互作用的气候-经济集成评估模型。在此模型基础上,对不同过程技术进步速率下各国、各部门碳排放与能源使用进行了模拟,模拟结果显示:过程技术进步速率的提高可以使各国各部门的能源使用高峰和碳排放高峰提前。在三种情景下,中国分别在 2034 年、2030 年和 2022 年达到碳排放高峰,而在较激进的情景 3 下,中国从 2007 到 2050 年的累计碳排放可以减小到 930 亿吨碳 (Gigatonnes of Carbon, GtC),可以满足 100GtC 的排放目标。此外,随着过程技术进步速率的提高,中国和印度的减排潜力最大;在各行业中,能源业的减排潜力最大,服务业次之。

关键词 过程技术进步 一般均衡 碳高峰 能源使用

[中图分类号] F062.1 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2014) 01-0050-18

一、引言

全球气候变化与气候保护问题是近年来的热点问题,也是最具挑战性的问题 (Gardiner and Hartzell-Nichols, 2012), 在世界范围内得到广泛而激烈的讨论。气候变化是全球面临的共同挑战,由人类活动所导致的温室气体排放,尤其是二氧化碳 (CO₂) 排放,是造成大气温度上升的主要原因 (IPCC, 2007)。因此,在全球范围内控制和减少由于人类经济活动排放的 CO₂, 对于阻止和减缓全球气候变化,促进人类社会未来的发展,具有非常重要的意义。

[基金项目] 国家重大研究计划 (973) 项目“气候变化经济过程的复杂性机制、新型集成评估模型簇与政策模拟平台研发”(批准号:2012CB955800); 国家自然科学基金项目“面向国家经济安全的地缘政治经济学研究”(批准号:41171104); 国家自然科学基金重点项目“基于国土分异机制的区域协调管理模式研究”(批准号:70933002)。

[作者简介] 顾高翔 (1985-), 博士, 华东师范大学人口研究所, 邮政编码: 200241; 王铮 (1954-), 中国科学院科技政策与管理科学研究所研究员、博士生导师, 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室教授、博士生导师, 为本文通讯作者, 邮政编码: 100190。

促进能源节约型技术进步对实现 CO₂ 减排具有非常重要的意义 (De Groot et al., 2001)。能源节约型技术的使用可以降低单位 GDP 的能耗, 是减少经济活动中温室气体排放的重要途径。尽管一直以来都有一种观点认为由生产过程中工艺革新导致的能源强度下降会引起能源产品价格的下降, 反而会导致能源的过量消耗 (Herring and Roy, 2009), 但是从宏观和长期的角度来说, 产品生产工艺的提高, 使得生产过程中能源和其他中间投入减少, 这对于能源使用的减少从而导致碳排放减少, 进而实现气候保护的目标具有非常重要的意义。

狭义的能源节约型技术单指能够降低生产过程中能源使用的技术, 而广义的能源节约型技术应该包括所有能够降低中间投入的技术, 即过程技术或工艺技术, 因为所有中间投入品的生产也是需要消耗能源的, 降低中间产品的投入, 本身就会降低能源使用量。本文考虑的是广义上的能源节约型技术。

研究过程技术进步和能源强度下降之间的关系是近年来的热点问题。Popp (2004) 认为技术革新对于能源消费的减少起着非常重要的作用, 尤其是从长期的角度来讲, 具有比要素替代更加显著的作用。Fisher-Vanden 等 (2004) 研究发现, 研发投入、产业结构变化和能源价格是中国能源强度下降的重要驱动因素。Gallagher 等 (2006) 认为能源技术创新是保持世界经济繁荣和保证全球气候不会因为使用化石燃料而被破坏的关键。冯泰文等 (2008) 认为, 技术进步与第三产业占 GDP 份额的提升可以显著降低中国的能源强度, 而从长期看, 能源强度的降低最终还是要依靠技术进步。Sagar 和 Van der Zwaana (2006) 研究了以研发和干中学为基础的技术创新和技术创新的扩散速度对能源经济的影响。De Groot 等 (2001) 以荷兰为例研究了不同环境政策下不同部门企业的技术改进选择及其对能源强度的影响。Sue Wing (2008) 通过计量的方法分析了过去 50 年美国能源强度下降的动力来源, 研究发现产业结构的变化和能源使用效率的提高是其最重要的动力来源, 而由价格引发的能源替代只具有短期作用。上述工作主要以统计、计量和数据分析方法为主, 某些研究尺度偏微观, 仅仅针对某一特定国家进行研究, 没有研究能源使用技术进步对全球气候变化和经济发展的影响。

本文认为, 研究全球范围内能源强度下降及对各国经济发展和碳排放的影响, 需要在全球气候变化的背景下进行, 以体现气候变化与经济发展之间的相互作用, 从而提高研究的准确性和现实性, 这就产生了一个世界经济发展与气候变化的综合问题。对于这类问题, 国际上比较流行的是使用集成评估模型 (Integrated Assessment Model, IAM) 进行研究, 尤以 Nordhaus (1992) 的 DICE 模型以及 Nordhaus 和 Yang (1996)、Nordhaus 和 Boyer (2000) 的 RICE 模型为代表, 还包括 Link 和 Tol (2004) 的 FUND 模型、Manne 等 (1995) 以及 Manne 和 Richels (2004) 的 MERGE 模型等。但是, 这些 IAM 的经济系统都存在一定的缺陷, 主要问题是其经济系统过于简单, 没有考虑全球经济的一般均衡, 或者外生定义能源强度的下降, 没有考虑技术进步的内生化。

其中, RICE 和 DICE 模型的经济机制过于简单, 没有考虑市场的均衡, 其技术进步模式也没有内生性; 同时, RICE 模型中没有考虑国家间的经济联系, 而是将各国的经济增长看成相互独立的事件; 此外, RICE 模型的区域划分也相对简单。MERGE 模型存在的问题同样是对世界经济的划分只到国家层面, 没有细分到生产部门, 且国家之间缺乏经济联系, 因此对于各部门的经济发展与产业结构变化缺乏更加细致的研究。而 FUND 模型虽

然将经济划分到了部门层面，也考虑了区域间经济的联系，但却没有考虑气候变化对经济发展的反馈作用。

在对 RICE 模型的改进工作中，Popp (2004) 对 RICE 模型做出改进，在模型中加入了内生技术进步模式，但是在经济层面上将世界简化为一个国家，没有考虑各国之间的差异，因此无法研究不同发展程度的国家在面对 CO₂ 减排时会遇到不同的经济问题。王铮课题组在 RICE 模型基础上构建的 MRICES 模型系列考虑了世界各国之间的经济联系和内生技术进步模式，但其经济联系以 GDP 溢出形式表达，无法准确描述全球经济一体化下国家间的经济关系，且其模型的经济系统只划分到国家层面，无法描述部门产业结构变化对能源强度的影响(王铮等，2012；张帅，2012；朱潜挺，2012；刘昌新，2013)。

针对上述工作中的缺陷，本文采用一般均衡的方法，在 Jin (2012) 模型的基础上进行修改和扩充，构建了一个生产技术水平内生化的多国多部门一般均衡经济模型，刻画国家和生产部门间的经济相互作用。其中，Jin (2012) 模型是一个两区域多部门的一般均衡经济模型，在此基础上，本文引入了 Leontief 生产函数和 Cobb-Douglas 生产函数复合的形式表达投入产出结构和基于 Lorentz 和 Savona (2008) 的过程技术进步模式，设计了新的国际资本流动模式，最终构建了一个多国多部门的一般均衡经济模型。同时，本文将 RICE 模型的气候模块嵌入经济模型中，使得经济模型与气候模型相互作用，最终构建了一个基于一般均衡的动态多国多部门经济相互作用的气候变化集成评估模型，并通过改变过程技术的进步速率，研究不同能源强度下降速度情景下各国各部门的经济发展状况、能源使用和碳排放量的变化，比较各国各部门的 CO₂ 减排潜力。

二、模型设计与数据来源

本文模型包括一个基于一般均衡的多国多部门经济模型、一个气候模型，以及相关的碳核算模块。在模型中，全世界被划分成若干个国家和生产部门，在本文中以 j 表示国家，以 i 表示部门。假设国家之间资本和商品自由流动，不存在贸易壁垒；国家之间不存在劳动力流动；国家内部劳动力自由流动。

(一) 经济模块

本文以两层嵌套的形式描述各部门的生产行为，即部门总产出由增加值和中间投入构成，而增加值由劳动力和固定资本复合，即以 Leontief 生产函数定义总产出的构成形式，以 Cobb-Douglas 生产函数定义增加值的构成形式，并沿用 Jin (2012) 对生产过程的假设：同一部门具有唯一的产出弹性；同一国家具有唯一的生产技术水平；产品生产技术水平完全作用于劳动力，形成有效劳动力。

$$X_{i,t}^j = \min \left\{ \frac{M_{1,i,t}^j}{a_{1,j,i,t}}, \dots, \frac{M_{k,i,t}^j}{a_{k,j,i,t}}, \dots, \frac{M_{l,i,t}^j}{a_{l,j,i,t}}, X_{i,j,t} \right\}, k = 1, \dots, l \quad (1)$$

$$X_{i,j,t}^* = (K_{i,t}^j)^{\alpha_i} (A_{i,t}^j L_{i,t}^j)^{1-\alpha_i} (Z_t)^{\beta_i} \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中， $X_{i,t}^j$ 表示国家 j 部门 i 在第 t 期的增加值， $X_{i,j,t}^*$ 表示由劳动力和资本复合形成的初始增加值， $M_{k,i,t}^j$ 表示部门 i 在生产过程中实际投入部门 k 产品的数量，

$a_{k,j,i,t}$ 表示对各部门的中间需求系数；式（2）中， $K_{i,t}^j$ 表示国家 j 部门 i 在第 t 期的固定资本量， $L_{i,t}^j$ 表示劳动力数量， A_i^j 是产品生产过程中的劳动力技术水平， α_i 是部门 i 的产出弹性。

劳动者的工资率等于劳动力的边际产出，由于劳动者在本国内具有完全流动性，因此在均衡条件下，同一国家各部门的工资率相同。

$$w_{i,t}^j = \frac{\partial X_{i,t}^j}{\partial L_{i,t}^j} p_{i,t} = (1 - \alpha_i) \frac{X_{i,t}^j}{L_{i,t}^j} p_{i,t} \quad (3)$$

式（3）中， $p_{i,t}$ 表示产品 i 在第 t 期的价格，由于国家之间没有贸易壁垒，因此同一期一种产品的市场价格是统一的。依照 Abel（2003）和 Jin（2012）的模型，本文以 Cobb-Douglas 生产函数的形式表示资本的更新累加：

$$K_{i,t+1}^j = a(\bar{I}_{i,t}^j)^\phi (K_{i,t}^j)^{1-\phi} \quad (4)$$

式（4）中， $\bar{I}_{i,t}^j$ 表示第 t 期国家 j 部门 i 的投资数，包含了国内投资和国外投资两部分， ϕ 是资本生产的产出弹性， a 是资本生产过程中的生产技术水平。对式（4）求 $\bar{I}_{i,t}^j$ 的偏导，可以得出投资的边际产出，其倒数即为资本的价格：

$$q_{i,t}^j = 1 / \frac{\partial K_{i,t+1}^j}{\partial \bar{I}_{i,t}^j} = \frac{1}{a\phi} \left(\frac{\bar{I}_{i,t}^j}{K_{i,t}^j} \right)^{1-\phi} \quad (5)$$

各国每期的 GDP 由两部分组成，产品生产增加值和资本生产增加值：

$$GDP_t^j = \sum_i p_{i,t} X_{i,t}^j + \frac{1}{\phi} \bar{I}_t^j - I_t^j = X_t^j + \frac{1-\phi}{\phi} \bar{I}_t^j \quad (6)$$

式（6）中， $\sum_i p_{i,t} X_{i,t}^j$ 表示产品生产的增加值， $\frac{1}{\phi} \bar{I}_t^j - I_t^j$ 表示资本生产的增加值。

产品市场的出清条件是每种产品的总产出与该种产品的中间消费、最终消费和投资相等。假设部门 i 在第 t 期的全球总产出为 $Y_{i,t}^g$ ，则产品 i 的出清条件为：

$$Y_{i,t}^g = \sum_j Y_{i,t}^j = \sum_j C_{i,t}^j + \sum_j \sum_i X_{i,k,t}^j + \sum_j \sum_i \sum_k M_{k,i,t}^j P_i^k \quad (7)$$

根据 Jin（2012），各部门产品的价格出清方程为：

$$p_{i,t} = \frac{\gamma_i}{X_{i,t}^g} X_t^g \quad (8)$$

各国劳动力的出清方程为：

$$\sum_i L_{i,t}^j = L_t^j \quad (9)$$

（二）资本流动模块

由一般均衡条件下得到的工资方程和价格方程，可以得到全市场的总工资数为：

$$W_t^g = \sum_j \sum_i (1 - \alpha_i) X_{i,t}^j \frac{X_t^g}{X_{i,t}^g} \gamma_i = X_t^g \sum_i (1 - \alpha_i) \gamma_i \quad (10)$$

可见全市场总工资为总产出的固定份额 $\sum_i (1 - \alpha_i) \gamma_i$ ，则每期的全市场投资数占总产出的比例为：

$$I_t^E = \phi \sum_j s_j \sum_i (1 - \alpha_i) \gamma_i X_i^j \quad (11)$$

式 (11) 中， s_j 表示 j 国的储蓄率。假设资本的流动由两部分组成，该假设兼具了对经济体规模的追求和对资本回报率的追求，则各国各部门所获得投资占总投资数的比例为：

$$R_{i,t}^j = \mu R_1(i,j,t) + (1 - \mu) R_2(i,j,t) \quad (12)$$

式 (12) 中， R_1 和 R_2 分别是在追求经济体规模和追求资本回报率情况下的投资占比； $\mu \in [0, 1]$ 是权重系数。 R_1 的表达式与 Jin (2012) 的国际资本流动模式一致，其设计的基本思想是保证单位投资在各国各部门所获得的回报相等：

$$R_1(i,j,t) = \frac{\alpha_i \gamma_i}{s_k + (1 - \phi) s_j s_l} E \left[\frac{X_{i,t+1}^j}{X_{i,t+1}^E} \right] + \frac{(1 - \phi) s_{i,t}^j s_l}{s_k + (1 - \phi) s_j s_l} E [R_{i,t+1}^j] \quad (13)$$

从式 (13) 来看， R_1 是一种以增加值占划分全球总投资的资本分配模式，即以国家 j 部门 i 的增加值占部门 i 增加值的比例来划分投资。

R_2 是基于资本吸引力的各国各部门投资占比。与 R_1 不同， R_2 从微观角度出发，采取自下而上的视角，体现资本流动过程中的逐利性，即资本向回报率高的部门流动。本文参考了 Caniëls (2000)、Caniëls 和 Verspagen (2001) 的知识溢出强度模型来表示地区间知识溢出的强度。由于研究的是地区间的资本流动，因此使用资本存量、工资总数和资本边际产出作为资本吸引力强度的影响因子，使用地区间的产出差代替知识溢出模型中的知识资本差。本文采用王铮等 (2007) 的方法，以指数形式表示地区间的产出差，得到地区间资本吸引力强度公式：

$$TK_{i,j}^{x,y} = K_{i,t}^j w_i^y L_i^y \frac{\alpha_x X_{x,t}^y}{K_{x,t}^y} \exp \left(-v \left| \ln \frac{X_t^j}{X_t^i} \right| + 1 \right) \quad (14)$$

$$R_2(i,j,t) = \frac{\sum_{x,y} \frac{TK_{x,y}^{i,j}}{\sum_{i,j} TK_{x,y}^{i,j}} \left(\frac{\phi \bar{\beta}}{1 + \beta} S_{x,t}^y \right)}{I_t^E} \quad (15)$$

式 (14) 中， $TK_{i,j}^{x,y}$ 表示国家 y 部门 x 对国家 j 部门 i 的资本吸引力强度， v 表示两国总增加值的比值对资本吸引力的影响系数， $S_{x,t}^y$ 表示国家 y 部门 x 的储蓄。式 (15) 表示国家 y 部门 x 的储蓄 $S_{x,t}^y$ 根据资本吸引力的大小投资到不同的国家/部门，而国家 j 部门 i 在第 t 期得到的投资数是所有国家/部门对其投资的总和。

由于现实中，国际资本流动往往存在各种障碍，且各国应对资本投资问题的政策各有不同，因此国际资本无法实现完全的自由流动。本文引入投资权重 ξ^j 来修正国际资本投资行为，克服模拟中带来的误差。 ξ^j 体现国际地缘政治因素对资本流动造成的干扰。这样，各国最终获得的投资比例可以表示为：

$$R_{i,j,t}^* = A \xi^j R_{i,t}^j \quad (16)$$

式 (16) 中, A 表示归一化参数, 式 (16) 的意义是在加入修正因子 ξ^j 之后, 需要对各国各部门的投资占比系数重新归一化, 保证 $\sum_j \sum_i R_{i,j,t}^* = 1$ 。这样, 各国各部门所获得的实际投资数为:

$$\hat{I}_{i,t}^j = R_{i,j,t}^* I_t^E \quad (17)$$

(三) 技术进步模块

本文中的技术进步体现在两个方面, 分别是生产技术水平 A_t^j 的提高和中间需求系数 $a_{i,t}^{j,k}$ 的下降。前者体现部门生产能力的提升, 后者则体现生产过程中对中间投入需求的减少, 即过程技术进步。对于生产技术水平 A_t^j , 本文参考 Arrow (1962)、Romer (1986) 的假设, 设置了一个内生化的方式, 认为生产技术水平与部门的资本累积相关, 表达方式如下:

$$A_t^j = B_t^j (K_t^j)^\varphi \quad (18)$$

在过程技术进步中, 对于中间需求系数 $a_{i,t}^{j,k}$, 本文参考 Lorentz 和 Savona (2008) 的工作, 采取循环随机冲击方法, 每一期对各国各部门的中间需求系数进行多次随机对数冲击, 模拟部门生产过程中对中间品需求的减少。

$$\begin{aligned} \ln(a'_{k,j,i,t}) &= \ln(a_{k,j,i,t,n}^*) + \varepsilon_{j,k,i,t,n}, \\ \varepsilon_{j,k,i,t,n} &\in N(0; \sigma) \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) 中, n 表示第 n 次迭代, $a_{k,j,i,t,n}^*$ 表示 n 次迭代后第 t 期国家 j 部门 i 对产品 k 的中间需求系数, $\varepsilon_{j,k,i,t,n}$ 是服从 $N(0; \sigma)$ 分布的随机数。这样就产生了一组新的中间需求系数 $(a'_{1,j,i,t}, \dots, a'_{k,j,i,t}, \dots, a'_{l,j,i,t})$ 。若这组新的中间需求系数所产生的单位生产成本 $\sum_{k=1}^J a'_{k,j,i,t} p_{i,t}$ 小于冲击之前的单位生产成本, 则接受这组新的中间需求系数, 否则维持原先的中间需求系数。

$$\begin{aligned} &(a_{1,j,i,t,n+1}^*, \dots, a_{k,j,i,t,n+1}^*, \dots, a_{l,j,i,t,n+1}^*) = \\ &\begin{cases} (a'_{1,j,i,t}, \dots, a'_{k,j,i,t}, \dots, a'_{l,j,i,t}) & \text{if } \sum_{k=1}^J a'_{k,j,i,t} p_{i,t} < \sum_{k=1}^J a_{k,j,i,t,n}^* p_{i,t} \\ (a_{1,j,i,t,n}^*, \dots, a_{k,j,i,t,n}^*, \dots, a_{l,j,i,t,n}^*) & \text{Otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

当 N 次循环迭代结束后, 将得到的 $(a_{1,j,i,t,N}^*, \dots, a_{l,j,i,t,N}^*)$ 赋予下一期的中间需求系数:

$$(a_{1,j,i,t+1}, \dots, a_{l,j,i,t+1}) = (a_{1,j,i,t,N}^*, \dots, a_{l,j,i,t,N}^*) \quad (21)$$

(四) 碳核算与气候反馈

在本文模型中, 各部门生产过程中使用的能源由能源部门供给, 因此能源的使用量可以根据各部门对能源部门的中间需求系数和部门增加值计算得到。

$$E_{i,t}^j = \tau_{i,j}^E a_{E,j,i,t} X_{i,t}^j \quad (22)$$

式 (22) 中, $a_{E,j,i,t}$ 表示国家 j 部门 i 在第 t 期对能源部门的中间需求系数, 即该部门单位增加值所需要的能源投入量; $\tau_{i,j}^E$ 表示国家 j 部门 i 使用一单位能源部门产品折合成能源使用量的比例, 即能源强度。能源部门所提供的能源有多种来源, 不同的能源有不同的碳排放强度, 因此在计算一国总的碳排放量时, 需要考虑该国的能源结构及其变化。本文

中,一国的碳排放总量需要根据其总的能源使用量、能源结构和各化石能源的碳排放强度得到。

$$Q_t^j = \sum_e \tau_{j,e}^c \kappa_{e,i,t} \sum_i E_{i,t}^j \quad (23)$$

式(23)中, $\kappa_{e,i,t}$ 表示国家 j 在第 t 期化石能源 e 所提供的能源使用量占该国当期总能源使用量的比例, $\tau_{j,e}^c$ 表示国家 j 能源 e 的碳排放强度, Q_t^j 表示国家 j 在第 t 期总的碳排放量。本文中,化石能源被分为石油、煤炭和天然气三种。能源部门各种化石能源使用占比的变化趋势由美国能源信息局(Energy Information Administration, EIA)提供的能源数据拟合得到。

碳排放的增加会导致碳排放浓度的上升,进而导致大气辐射强度和大气温度的上升,而大气温度的上升反过来会对经济生产造成影响。本文的气候模块参考 Nordhaus 和 Yang (1996) 的 RICE 模型和 Pizer (1999) 的工作,温度上升对经济生产的影响可以表示为:

$$\Omega_{j,t} = \frac{1 - b_{1,j}}{1 + \left(\frac{D_{0,j}}{9}\right) T_t^2} \quad (24)$$

式(24)中, $b_{1,j}$ 表示各国的生产型破坏系数, $D_{0,j}$ 是温度上升 3°C 所导致的 GDP 损失, T_t 表示第 t 期温度的变化, T_t 由气候变化系统根据当期碳排放量、大气碳浓度和地表温度得到,具体的模型参照 Nordhaus 和 Yang (1996)、Pizer (1999)、李刚强 (2008), 本文不再详述。

(五) 数据来源

本文模型初始的经济参数主要来源于 GTAP-2007 数据库,包括总产出值、增加值、固定资本数、总人口数、中间需求系数、能源使用强度。人口数由联合国发布的未来世界人口资源增长率计算得到,人口结构数据来源于世界银行发布的数据。资本的产出弹性根据 GTAP-2007 数据库的增加值与劳动力工资估算得出。各国的真实储蓄率参考 Ma 和 Yi (2010) 的研究。全球碳循环系统的参数参考 Nordhaus 和 Yang (1996)、Pizer (1999)、李刚强 (2008) 的研究。各国温度上升破坏系数和生产型减排破坏系数参考 Nordhaus 和 Yang (1996)、Pizer (1999)、朱潜挺 (2012)、刘昌新 (2013) 的工作。

本文将 GTAP-2007 数据库中的 57 个部门合并为 8 个:农业、能源开采与加工、金属及其他矿业、化工业、制造业、建筑业、交通运输业和其他服务业。全世界则被划分为 7 个国家和地区:中国、美国、欧盟、日本、俄罗斯、印度和世界其他国家。

三、不同技术进步速率下各国各部门能源使用与碳排放分析

提高部门生产过程中的技术和工艺,使企业对于中间产品投入量减少是企业降低生产成本的主要途径,而中间产品需求的减少与整个国民生产过程中能源使用的减少密切相关。在模型的基础上,本部分将对不同过程技术进步速度下世界各国 2007 年~2050 年的能源使用量和碳排放量进行模拟。本文采取的方法是改变每期对过程技术水平随机对数冲击所设的正态分布方差 σ 设计的三种不同情景,分别代表不同的中间需求系数下降率,研究不同过程技术进步速率下各国各部门能源使用和碳排放的变化趋势。三种情景分别

为：情景 1, $\sigma = 0.00035$ ；情景 2, $\sigma = 0.0004$ ；情景 3, $\sigma = 0.00045$ 。在这三种情景中，国际资本流动模式权重系数 μ 的取值为 0.48，这个取值是通过模拟过程中参数的调整所得到的模拟结果与现实最为贴近的参数值。

本部分对模拟得到的经济数据进行校验，由于三种情景下各国的经济数据差别不大，因此本文采取情景 1 下得到的模拟结果，从各国的 GDP 和经常账户占 GDP 的百分比两个方面对模拟结果进行校验。其中，经常账户指各国总储蓄和总投资之间的差值，体现一个国家的资本净流入/流出状态，反映一个国家在国际资本流动中的地位。

表 1 显示了情景 1 模拟得到的各国 2007 年~2011 年 GDP 数值与通过 EIA 数据折算得到的各国以 2005 年不变价格衡量的真实 GDP 之间的比较。可以看到，两者的相关系数达到了 0.9953，具有非常高的一致性；Z 检验得到的 Z 值为 0.3601，低于其单位临界 1.6449 和双尾临界 1.9600；方差分析得到的 P 值为 0.7202，大于差异存在的校验水准 0.05。校验结果表明模拟结果可以较好地反映现实世界的经济发展状况。

表 1 各国 2007 年~2011 年 GDP 与真实数据比较

单位： 10^{12} 美元

| | 相关系数 | 国家 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|---------------|--------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 真实数据 (EIA) | 0.9953 | 中国 | 2.9046 | 3.1833 | 3.4766 | 3.8396 | 4.1950 |
| | | 美国 | 13.2063 | 13.1620 | 12.7580 | 13.0631 | 13.2990 |
| | | 日本 | 4.7533 | 4.6976 | 4.4010 | 4.5819 | 4.5727 |
| | | 欧盟 | 14.6310 | 14.6597 | 14.0418 | 14.3048 | 14.5353 |
| | | 印度 | 1.0048 | 1.0543 | 1.1503 | 1.2516 | 1.3430 |
| | | 俄罗斯 | 0.8969 | 0.9439 | 0.8702 | 0.9053 | 0.9418 |
| 模拟结果 | 0.9953 | 中国 | 3.0944 | 3.5127 | 3.9548 | 4.4152 | 4.8977 |
| | | 美国 | 11.7190 | 11.6621 | 11.7087 | 11.9445 | 12.3184 |
| | | 日本 | 3.5424 | 3.5848 | 3.6585 | 3.7703 | 3.9045 |
| | | 欧盟 | 12.2861 | 12.2826 | 12.3786 | 12.6091 | 13.0394 |
| | | 印度 | 1.1032 | 1.3463 | 1.5972 | 1.8587 | 2.1350 |
| | | 俄罗斯 | 1.0868 | 1.1221 | 1.1731 | 1.2392 | 1.3155 |

表 2 显示情景 1 得到的各国经常账户占 GDP 百分比模拟结果与国际货币基金组织^①提供的真实数据之间的比较。从相关系数看，模拟结果与真实数据同样具有很高的一致性，其相关系数达到了 0.9562；Z 检验得到的 Z 值为 0.2323；而方差分析得到的 P 值为 0.8170，大于差异存在的校验水准 0.05。校验结果表明模拟结果可以较好地反映现实中的国际资本流动趋势。

因此，从总体上看，模拟得到的经济数据与现实数据具有较好的拟合度，可以反映现实世界的经济变化。

^① 国际货币基金组织世界经济展望数据库 (World Economic Outlook Databases)，网址 <http://www.imf.org>。

表2 各国2007年~2012年经常账户占GDP百分比模拟结果与真实数据比较

单位: %

| | 相关系数 | 国家 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---------------|--------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 真实数据 (IMF) | | 中国 | 10.1281 | 9.1240 | 5.2299 | 5.1937 | 5.1590 | 5.5726 |
| | | 美国 | -5.0632 | -4.7380 | -2.7014 | -3.2416 | -3.1042 | -2.1255 |
| | | 日本 | 4.8188 | 3.2189 | 2.8164 | 3.5879 | 2.5110 | 2.8167 |
| | | 欧盟 | -0.5602 | -1.0165 | -0.0859 | -0.1439 | -0.1822 | 0.0438 |
| | | 印度 | -0.7006 | -1.9874 | -2.8277 | -2.6230 | -2.1848 | -2.1840 |
| | | 俄罗斯 | 5.9254 | 6.2451 | 4.0522 | 4.8066 | 5.5176 | 3.4650 |
| 模拟结果 | 0.9562 | 中国 | 10.6433 | 10.0875 | 9.6416 | 9.2642 | 8.9419 | 8.6703 |
| | | 美国 | -4.1171 | -4.4443 | -4.4955 | -4.4110 | -4.2877 | -4.0752 |
| | | 日本 | 3.3494 | 3.6639 | 3.7640 | 3.8049 | 3.8217 | 3.8281 |
| | | 欧盟 | -0.8146 | -0.8319 | -0.8746 | -0.8888 | -0.8363 | -0.7840 |
| | | 印度 | -1.1327 | -2.1718 | -3.1280 | -3.9144 | -4.5578 | -5.0824 |
| | | 俄罗斯 | 5.4478 | 5.2616 | 5.5559 | 5.9467 | 6.3180 | 6.6286 |

(一) 三种情景下全世界碳排放变化趋势

表3显示了三种情景下各国在模拟期间平均能源强度下降率和分年度的能源强度。在三种情景下,中国的平均能源下降率分别为4.79%、5.40%和5.98%。王铮等(2010)认为在考虑产业结构变化趋势的情况下,中国的能源强度下降率可以控制在5%左右。因此

表3 三种情景下各国平均能源强度下降率(%)和分年度能源强度(Mtoe/10⁹美元)

| | | 中国 | 美国 | 日本 | 欧盟 | 印度 | 俄罗斯 |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 初始能源强度 | 2007年 | 0.6947 | 0.2134 | 0.1793 | 0.1662 | 0.4856 | 0.7226 |
| | 平均下降率 | 4.7907% | 3.4358% | 2.8395% | 3.4826% | 4.8813% | 5.2451% |
| 情景1 | 2020年 | 0.3416 | 0.1445 | 0.1401 | 0.1146 | 0.2241 | 0.3242 |
| | 2030年 | 0.2053 | 0.1036 | 0.1050 | 0.0800 | 0.1365 | 0.1867 |
| | 2040年 | 0.1304 | 0.0701 | 0.0754 | 0.0533 | 0.0861 | 0.1126 |
| | 2050年 | 0.0841 | 0.0474 | 0.0519 | 0.0362 | 0.0563 | 0.0712 |
| | 平均下降率 | 5.4020% | 4.0818% | 3.5263% | 4.1376% | 5.5164% | 5.8576% |
| 情景2 | 2020年 | 0.3067 | 0.1295 | 0.1251 | 0.1027 | 0.2004 | 0.2902 |
| | 2030年 | 0.1720 | 0.0864 | 0.0867 | 0.0665 | 0.1134 | 0.1562 |
| | 2040年 | 0.1033 | 0.0552 | 0.0583 | 0.0416 | 0.0672 | 0.0892 |
| | 2050年 | 0.0637 | 0.0355 | 0.0383 | 0.0270 | 0.0422 | 0.0538 |
| | 平均下降率 | 5.9785% | 4.6722% | 4.1667% | 4.7571% | 6.1131% | 6.4457% |
| 情景3 | 2020年 | 0.2762 | 0.1160 | 0.1119 | 0.0922 | 0.1795 | 0.2600 |
| | 2030年 | 0.1450 | 0.0725 | 0.0718 | 0.0556 | 0.0944 | 0.1312 |
| | 2040年 | 0.0828 | 0.0440 | 0.0457 | 0.0330 | 0.0532 | 0.0712 |
| | 2050年 | 0.0490 | 0.0273 | 0.0287 | 0.0204 | 0.0321 | 0.0411 |

可认为，情景1和情景2与现实的情况较为符合，而情景3则是一种较为激进的过程技术进步预测。在情景1中，中国的能源强度在2035年达到2007年的世界最先进水平（即欧盟水平： $0.1662 \text{ Mtoe}/10^9 \text{ 美元}$ ）；在情景2中，中国的能源强度达到欧盟2007年水平的时间为2031年；而在情景3中，这一时间可以提前到2028年。

三种情景下，日本的能源强度平均下降率最小，其次是美国和欧盟，这是由于日本除能源业外，其他行业的初始中间需求系数都很小，因此减排潜力要小于欧盟和美国。而印度和俄罗斯的能源强度下降率均要高于中国。其中，初始2007年能源强度略高于中国的俄罗斯，其能源强度达到欧盟2007年水平的时间点却均比中国略微提前，分别为：情景1的2033年；情景2的2029年；情景3的2027年。而印度初始的能源强度小于中国，其能源强度达到欧盟2007年水平的时间也早于中国，分别为：情景1的2026年；情景2的2023年；情景3的2021年。

图1显示了三种情景下2007年~2050年全世界碳排放变化趋势。三种情景下，全世界碳排放量的变化趋势都呈现先上升后下降的倒U形趋势。情景1中全世界的碳排放高峰在2032年，碳高峰值为 11.08 GtC ，2050年全世界碳排放量则高达 9.97 GtC ，比2007年提高将近 2 GtC ；情景2下全世界的碳排放高峰提前到2024年，碳排放高峰值为 9.41 GtC ，2050年全球碳排放量为 7.68 GtC ，略低于2007年的水平；情景3下，全世界碳排放高峰出现在2017年，碳高峰值为 8.48 GtC ，到2050年全世界碳排放量下降到 5.98 GtC ，为2007年的四分之三。

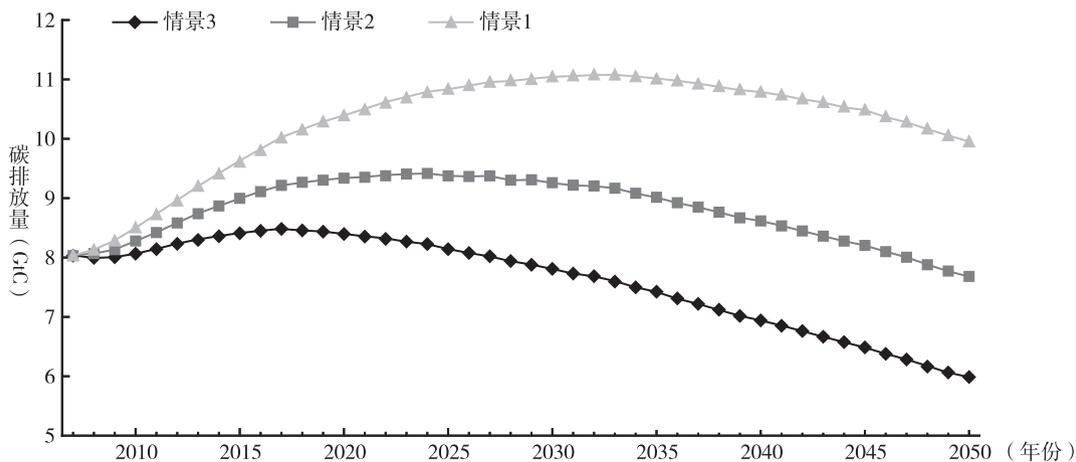


图1 三种情景下2007年~2050年全世界碳排放量变化

(二) 三种情景下各国碳排放趋势

图2至图4显示了三种情景下2007年~2050年各国的碳排放变化趋势。在情景1下，中国的碳排放量变化呈现倒U型趋势，碳排放高峰出现在2034年，高峰值为 3.27 GtC ，到2050年其碳排放量为 2.99 GtC ，比2007年提高 1.5 GtC ，其2007年到2050年的累计碳排放量达到了 127.56 GtC ，接近美欧日累计碳排放量的总和（ 130.01 GtC ）；美国、欧盟、日本的碳排放在2010年以后也呈现倒U型的变化趋势，其中美国的碳排放高峰出现在2025年，峰值为 1.73 GtC ，欧盟的碳排放高峰出现在2018年，峰值为 1.17 GtC ，日本的

碳排放高峰出现在2019年，其峰值为0.39GtC；印度的碳排放量始终处于上升的趋势，将不存在碳排放高峰，2050年的碳排放量为1.45GtC，是2007年的4倍左右；而俄罗斯的碳排放依然处于稳定下降的趋势，2050年的碳排放量为0.22GtC，占到2007年的50%左右。

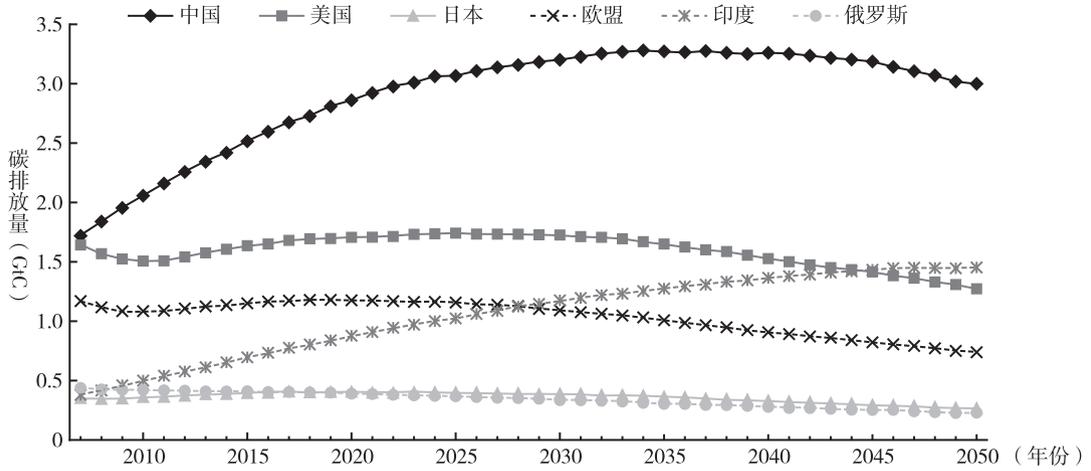


图2 情景1下2007年~2050年各国碳排放量

在情景2中，中国的碳排放高峰较情景1提前，出现在2030年，高峰值也降为2.7GtC，到2050年碳排放量为2.31GtC，比情景1下降约0.68GtC；美国、欧盟、日本的碳排放量在经济危机之后没有出现明显的上升趋势，而是出现一个稳定期，其中，美国和日本的稳定期持续到2020年左右，欧盟的稳定期则持续到2017年；印度的碳排放情景2下2047年出现排放高峰，高峰值为1.11GtC；俄罗斯的碳排放变化与情景1一致，仍然处于稳定下降的趋势。

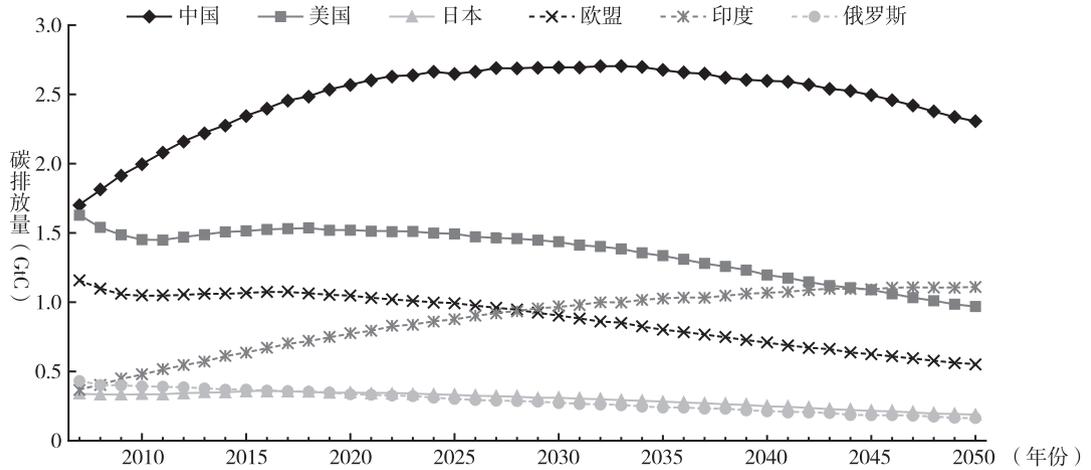


图3 情景2下2007年~2050年各国碳排放量

在情景3中，中国的碳排放高峰提早到2022年，高峰值下降到2.34GtC，到2050年碳排放量为1.804GtC，较情景1降低1.2GtC，较情景2降低0.5GtC。美国、欧盟和日本等发达国家在经历了2007年~2010年的经济危机之后，碳排放量都出现了一个3~5年左右的稳定期，期间各国碳排放量较情景1和情景2变化不大。从2015年开始，发达国家进入碳排放量大幅下降的阶段，到2050年，美国的碳排放量为0.748GtC，是2007年的46%，是情景1中2050年碳排放量的58.96%；欧盟则下降到0.422GtC，是2007年的36.4%，是情景1下2050年的56.92%；而日本2050年碳排放量为0.142GtC，是2007年的41.7%，是情景1下2050年的58.03%；俄罗斯的碳排放量始终处于下降趋势，2050年碳排放量为0.129GtC，是2007年的29.8%。

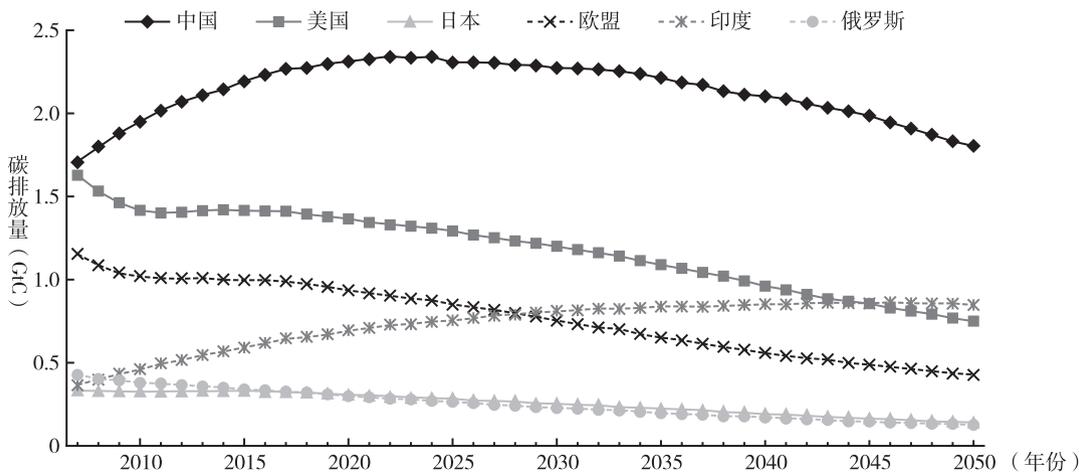


图4 情景3下2007年~2050年各国碳排放量

(三) 三种情景下各国各部门能源使用变化

表4显示了情景1下各国各部门能源使用高峰及其峰值。在情景1下，中国除农业和其他矿业外，其余部门都将在2030年以后才达到能源使用高峰，而化工业、交通运输业和其他服务业的能源高峰都要迟于2040年，其中其他服务业在2050年前无法达到能源高峰。这在一定程度上与中国第三产业较快的增长速度有关。中国能源业的能源高峰在2034年峰值为2786.14Mtoe。发达国家中，美国的能源业、化工业，欧盟的能源业和日本的化工业在情景1下能源使用呈现倒U型，存在能源使用高峰，但其高峰期普遍较早。美国的能源业能源使用高峰出现在2024年，峰值为1923.32Mtoe，欧盟和日本能源业的能源使用高峰则分别出现在2020年和2023年，峰值为1426.84Mtoe和549.80Mtoe。除农业和能源业外，俄罗斯剩余的6个部门在模拟期间都出现能源使用高峰，其中除化工业和其他服务业，其余各部门的能源高峰都出现在2030年前。在情景1下印度各部门的能源使用基本处于不断上升的趋势，其中有5个部门在2050年前无法达到能源高峰，除农业有可能在2022年达到能源高峰外，其余部门都要在2045年以后才能达到能源高峰。

表5显示了情景1下各国各部门2007年~2050年累计能源使用量。从中可见，能源业是各国能源需求的主要来源，占各国累计能源使用的65%以上，其中日本的能源业更是占其累计能源使用的75.77%。其他矿业是中国第二大累计能源使用部门，占全世界该

部门累计能源使用的 34.93%。中国制造业和建筑业的累计能源使用也处于较高的水平,前者接近美国制造业累计能源使用的 2 倍,后者更是占全世界建筑业累计能源使用的 55.73%。交通运输业中,发达国家美国和欧盟的累计能源使用明显高于发展中国家,占全世界该部门累计能源使用的 34.89%。

表 4 情景 1 下各国各部门能源使用高峰(年)和峰值(Mtoe)

| | 中国 | 美国 | 欧盟 | 日本 | 印度 | 俄罗斯 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 农业 | 2014(31.1329) | / | / | / | 2022(25.0089) | / |
| 能源业 | 2034(2786.1410) | 2024(1923.3228) | 2020(1426.8426) | 2023(549.7997) | 2047(1359.3821) | / |
| 其他矿业 | 2030(399.7397) | 2030(57.5744) | / | / | 2050(180.2869) | 2021(33.1121) |
| 化工业 | 2043(274.9800) | 2026(156.3858) | / | 2017(64.3379) | 2050(251.5566) | 2033(105.9218) |
| 制造业 | 2037(168.2214) | / | / | / | 2050(88.8920) | 2029(7.5064) |
| 建筑业 | 2040(79.3347) | / | / | / | 2049(3.2811) | 2020(2.5523) |
| 交通运输业 | 2043(240.7747) | / | / | / | 2050(140.4081) | 2016(78.5712) |
| 其他服务业 | 2050(156.5301) | / | / | / | 2050(75.8339) | 2036(14.9639) |

注:“/”表示该国在该情景下 2007 年或之前即达到能源使用高峰,在模拟期间不存在能源使用高峰。

表 5 情景 1 下各国各部门 2007 年~2050 年累计能源使用量

单位: Mtoe

| | 农业 | 能源业 | 其他矿业 | 化工业 | 制造业 | 建筑业 | 交通运输业 | 其他服务业 |
|------|-----------|-------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|
| 中国 | 1099.7057 | 109833.7168 | 15672.5314 | 9943.5133 | 6192.4319 | 2825.7872 | 8797.9344 | 4755.6561 |
| 美国 | 235.2688 | 76643.9268 | 2366.9682 | 6363.0283 | 3245.7110 | 97.6089 | 15322.7160 | 2891.2262 |
| 欧盟 | 195.0903 | 54638.6507 | 2473.6456 | 4931.7840 | 1808.3472 | 140.9320 | 13186.5330 | 2614.5438 |
| 日本 | 53.9176 | 21357.3664 | 823.4038 | 2449.9103 | 365.0380 | 92.8700 | 1978.9240 | 1067.2276 |
| 印度 | 946.4552 | 45354.4614 | 5299.4305 | 6635.4092 | 2422.9966 | 99.9580 | 4241.2359 | 2007.4918 |
| 俄罗斯 | 95.3680 | 16957.6028 | 1313.7097 | 3976.7782 | 301.7836 | 97.0689 | 3116.3224 | 596.2427 |
| 世界其他 | 1636.3774 | 128163.1714 | 16919.8603 | 30945.8096 | 10320.1265 | 1716.5191 | 35064.5213 | 9862.7160 |

表 6 和表 7 分别显示了情景 2 下各国各部门能源使用高峰和累计能源使用量。在情景 2 中,各国各部门的能源使用高峰出现时间较情景 1 有了明显提前。中国各部门的能源使用高峰普遍提前了 4~5 年,其中提前最多的是能源业,从 2034 年提前到 2024 年,其次是建筑业,提前了 6 年。此外,中国其他矿业的能源使用高峰提前了 1 年,而农业和制造业提前了 2 年。在能源使用高峰值方面,情景 2 中,中国各部门能源峰值明显低于情景 1 的模拟结果,其中能源业降低了约 500Mtoe,其他服务业和交通运输业的降低幅度最大,分别降低了 16.91% 和 17.98%。发达国家中,美国的其他矿业在 2025 年出现能源使用高峰,而日本能源业的能源高峰提前到 2017 年,其峰值也略有下降。情景 2 下俄罗斯的其他矿业在 2015 年出现能源使用高峰,而原先有能源高峰的各部门,其高峰年均提前了 5~6 年,幅度较大。印度各部门的能源高峰在情景 2 下有所提前,较之情景 1,只有 4 个部门在 2050 年前无法达到高峰,而能源业的高峰年维持在 2047 年,但其峰值从 1359.38Mtoe 下降到 1020.57Mtoe,下降了四分之一。情景 2 下印度的能源使用峰值较情

景 1 下降幅度普遍较大，总的降幅达到 23%。

从各国各部门累计能源使用量来看，情景 2 下各国各部门的累计能源使用都出现了下降。其中能源业的下降率最大，印度的能源业累计能源使用较情景 1 下降率高达 18.03%，中国、美国、欧盟、日本的下降率也在 15% 以上。化工业的累计能源使用较情景 1 的下降率仅次于能源业，其中俄罗斯的下降率达到 15.8%，其余各国也在 11% 以上。交通运输业和其他服务业中，发达国家的下降率小于发展中国家，以其他服务业为例，中国、印度和俄罗斯的下降率都在 11% 以上，而美国、欧盟、日本的下降率分别为 9.41%、8.9% 和 8.95%。此外，各国能源业的累计能源使用占该国总累计能源使用的比例在情景 2 中出现下降。

表 6 情景 2 下各国各部门能源使用高峰（年）和峰值（Mtoe）

| | 中国 | 美国 | 欧盟 | 日本 | 印度 | 俄罗斯 |
|-------|-----------------|---------------|----|----------------|-----------------|---------------|
| 农业 | 2012(29.9484) | / | / | / | 2022(22.5255) | / |
| 能源业 | 2024(2288.1367) | / | / | 2017(489.0659) | 2047(1020.5744) | / |
| 其他矿业 | 2029(352.1645) | 2025(52.1881) | / | / | 2050(144.2467) | 2015(30.5672) |
| 化工业 | 2039(229.0279) | / | / | / | 2050(199.8400) | 2030(87.6140) |
| 制造业 | 2035(147.0825) | / | / | / | 2050(72.7517) | 2025(6.7433) |
| 建筑业 | 2034(68.8359) | / | / | / | 2045(2.7454) | 2019(2.3929) |
| 交通运输业 | 2040(197.4772) | / | / | / | 2049(112.0910) | / |
| 其他服务业 | 2047(130.0546) | / | / | / | 2050(62.1652) | 2029(12.9196) |

注：“/”表示该国在该情景下 2007 年或之前即达到能源使用高峰，在模拟期间不存在能源使用高峰。

表 7 情景 2 下各国各部门 2007 年~2050 年累计能源使用量

单位：Mtoe

| | 农业 | 能源业 | 其他矿业 | 化工业 | 制造业 | 建筑业 | 交通运输业 | 其他服务业 |
|------|-----------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 中国 | 990.6900 | 92390.5699 | 13855.9603 | 8704.6107 | 5541.9368 | 2527.1137 | 7620.9034 | 4201.3059 |
| 美国 | 215.8214 | 65015.3670 | 2122.4854 | 5640.5662 | 2936.8039 | 89.7813 | 13474.2758 | 2619.2343 |
| 欧盟 | 182.9489 | 46319.9090 | 2241.9075 | 4410.5222 | 1651.6972 | 130.3766 | 11701.1333 | 2381.9675 |
| 日本 | 50.7347 | 18005.9900 | 741.6037 | 2175.6696 | 334.3816 | 86.0340 | 1771.3181 | 971.7583 |
| 印度 | 830.8429 | 37178.5037 | 4562.7175 | 5646.6816 | 2122.6578 | 88.7517 | 3639.0087 | 1758.3399 |
| 俄罗斯 | 87.1185 | 14863.7610 | 1158.9631 | 3348.4945 | 268.9092 | 88.0648 | 2723.5395 | 532.0399 |
| 世界其他 | 1472.7856 | 109599.0048 | 14777.4953 | 26674.0975 | 9130.4112 | 1533.5299 | 30271.4088 | 8751.4452 |

表 8 和表 9 显示了情景 3 下各国各部门能源使用高峰情况和累计能源使用量。在情景 3 中，各国各部门的能源使用高峰进一步提前，而峰值也进一步减小。中国除其他服务业和交通运输业外，其余部门都可能在 2035 年前达到能源使用高峰，而农业、能源业和其他矿业都可能在 2030 年前达到能源高峰。其中，中国的化工业能源高峰从情景 2 中的 2039 年提前到 2030 年，提前幅度较大。情景 3 下，美国、欧盟的所有行业在 2007 年前均已达到能源使用高峰；日本除 2015 年达到能源业的能源使用高峰外，其他部门在模拟期间也将不存在能源使用高峰；俄罗斯还有 4 个部门在模拟期间出现能源使用高峰，分别是

化工业、制造业、建筑业和其他服务业，出现年份也均提前到了2025年前。情景3下，印度各部门的能源使用高峰继续提前，其中农业和能源业分别在2019年和2032年达到能源高峰，其余部门的能源高峰都在2040年以后，其中化工业、制造业和其他服务业在2050年之前仍然无法达到能源使用高峰。印度各部门的能源使用峰值在情景3下继续下降，但其降幅有所减小，较情景2各部门的能源使用峰值，平均下降率为21.85%。

情景3下各国各部门的累计能源使用量继续下降。其中，能源业的下降幅度依然最大，各国在情景3下的能源业累计能源使用较情景2的平均下降率达到14.28%，较情景1则平均下降了27.34%；其次是化工业，各国的累计能源使用较情景2平均下降了12.24%，较情景1下降了23.50%。情景3下，各国交通运输业的累计能源使用较情景2的平均下降率为11.81%。

表8 情景3下各国各部门能源使用高峰(年)和峰值(Mtoe)

| | 中国 | 美国 | 欧盟 | 日本 | 印度 | 俄罗斯 |
|-------|-----------------|----|----|----------------|----------------|---------------|
| 农业 | 2011(29.1825) | / | / | / | 2019(20.7094) | / |
| 能源业 | 2022(1996.0616) | / | / | 2015(446.4125) | 2032(780.4229) | / |
| 其他矿业 | 2025(315.9074) | / | / | / | 2045(116.9335) | / |
| 化工业 | 2030(197.1434) | / | / | / | 2050(159.0280) | 2025(74.0875) |
| 制造业 | 2032(129.1917) | / | / | / | 2050(59.5530) | 2023(6.1016) |
| 建筑业 | 2034(60.7461) | / | / | / | 2040(2.3345) | 2014(2.2760) |
| 交通运输业 | 2035(166.1133) | / | / | / | 2049(89.3941) | / |
| 其他服务业 | 2046(108.6920) | / | / | / | 2050(50.9045) | 2025(11.6229) |

注：“/”表示该国在该情景下2007年或之前即达到能源使用高峰，在模拟期间不存在能源使用高峰。

表9 情景3下各国各部门2007年~2050年累计能源使用量

单位：Mtoe

| | 农业 | 能源业 | 其他矿业 | 化工业 | 制造业 | 建筑业 | 交通运输业 | 其他服务业 |
|------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 中国 | 897.4814 | 78622.2919 | 12317.8103 | 7662.1362 | 4968.0464 | 2267.7664 | 6649.3867 | 3719.1819 |
| 美国 | 198.8607 | 55906.5233 | 1909.0251 | 5033.0841 | 2669.9255 | 82.7541 | 11936.0462 | 2380.7774 |
| 欧盟 | 172.0290 | 39771.5272 | 2034.7216 | 3963.0977 | 1513.4043 | 120.9313 | 10458.6975 | 2175.6442 |
| 日本 | 47.9503 | 15355.6163 | 671.2903 | 1949.3027 | 307.3971 | 79.8794 | 1600.1097 | 887.9785 |
| 印度 | 734.8304 | 30888.3461 | 3956.9466 | 4827.1567 | 1865.7438 | 78.8167 | 3134.7999 | 1541.3656 |
| 俄罗斯 | 79.9734 | 13136.3943 | 1029.1696 | 2854.1879 | 240.8535 | 80.1581 | 2408.4824 | 475.8453 |
| 世界其他 | 1331.1961 | 94624.9117 | 12997.3226 | 23179.8458 | 8102.3802 | 1372.7414 | 26400.0689 | 7782.6404 |

四、总结

本文以Jin(2012)模型为基础，构建了一个多国多部门一般均衡经济模型，在模型

中引入了气候模块和内生技术进步模式，以对数冲击的方式降低各部门的中间需求系数，实现过程技术进步。通过分情景模拟，研究了不同过程技术进步速率下各国各部门的能源使用和碳排放变化趋势。

模拟结果显示，过程技术进步速度的提高可以有效地将各国碳排放高峰提前，同时大幅减少各国碳高峰的碳排放量和累计碳排放量。三种情景下，中国分别在 2034 年、2030 年和 2022 年达到碳高峰。在情景 3 下，中国 2007 年~2050 年的累计碳排放可以减小到 93GtC，可以满足 100GtC 的排放目标。其中，情景 1 和情景 2 的模拟结果与现实较为符合，而情景 3 的技术进步速度则较为激进，反映的是未来过程技术进步速度得到提高情况下世界各国能源需求和碳排放量的变化趋势。因此，对于中国来说，加快过程技术进步提高的速度、降低能源强度和 提高能效对于 CO₂ 减排具有重要的现实意义。

随着过程技术进步速率的提高，各国各部门的能源使用高峰提前，其峰值也出现了下降。其中，中国和印度是高峰提前时间最长，高峰值和累计能源使用下降最多的国家，尤其表现在两国的能源业。而第三产业（交通运输业和其他服务业）对于中国、印度这样的发展中国家也具有较大的减排潜力，这是因为在未来的产业结构调整中，服务业将是中国、印度这样的发展中国家经济增长的重要支撑。对于欧美等发达国家来说，由于本身的过程技术水平较高，因此在不同情景下其能源使用的减少幅度明显小于中国、印度这样的发展中国家。

本文的主要不足之处是过程技术进步速率仍然是外生给定，且各国的随机对数冲击所设的正态分布方差 σ 一样。因此，如何将过程技术冲击方差 σ 与各国的经济发展联系起来，真正实现技术进步的内生化，将是下一步工作的重点。

参考文献

冯泰文、孙林岩、何哲（2008）：《技术进步对中国能源强度调节效应的实证研究》，《科学学研究》第 5 期。

李刚强（2008）：《多国 GDP 溢出背景下的气候保护模拟分析系统开发及应用》，北京：中国科学院科技政策与管理科学研究所，第 25~39 页。

刘昌新（2013）：《新型集成评估模型的构建与全球减排合作方案研究》，北京：中国科学院科技政策与管理科学研究所，第 52 页。

王铮、葛昭攀、廖悲雨（2007）：《知识溢出下增长收敛的复杂性》，《财经研究》第 10 期。

王铮、张帅、吴静（2012）：《一个新的 RICE 簇模型及其对全球减排方案的分析》，《科学通报》第 26 期。

王铮、朱永彬、刘昌新、马晓哲（2010）：《最优增长路径下的中国碳排放估计》，《地理学报》第 12 期。

张帅（2012）：《IAM 的 RICE 簇气候保护政策模拟系统设计与实现》，北京：中国科学院科技政策与管理科学研究所，第 28~33 页。

朱潜挺（2012）：《含碳交易环节的气候保护集成评估模型研究》，北京：中国科学院科技政策与管理科学研究所，第 63 页。

朱永彬、刘昌新、王铮、史雅娟（2013）：《我国产业结构演变趋势及其减排潜力分析》，《中国软科学》第 2 期。

Abel, A. B. (2003). The Effects of a Baby Boom on Stock Prices and Capital Accumulation in the Presence of Social Security. *Econometrica*, 71(2).

- Arrow, K. J. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3).
- Caniëls, M. C. J. (2000). *Knowledge spillovers and Economic Growth*. Edward Elgar. Cheltenham.
- Caniëls, M. C. J. and B. Verspagen (2001). Barriers to Knowledge Spillovers and Regional Convergence in an Evolutionary Model. *Journal of Evolutionary Economics*, 11(3).
- Dadush, U. and B. Stancil (2010). The World Order in 2050. *Carnegie Endowment for International Peace Policy Outlook*.
- De Groot, H. L. F., E. T. Verhoef, and P. Nijkamp (2001). Energy Saving by Firms: Decision – Making, Barriers and Policies. *Energy Economics*, 23(6).
- Fisher-Vanden, K., K., Jefferison, and G. H., Liu, et al. (2004). What is Driving China's Decline in Energy Intensity? *Resource and Energy Economics*, 26(1).
- Gallagher, K. S., J. P. Holdren, and A. Sagar (2006). Energy-technology Innovation. *Annual Review of Environment and Resources*, 31.
- Gardiner, S. M. and L. Hartzell-Nichols (2012). Ethics and Global Climate Change. *Nature Education Knowledge*, 3(10).
- Herring, H. and R. Roy (2009). Technological Innovation, Energy Efficient Design and the Rebound Effect. *Technovation*, 27(4).
- Jin, K. (2012). Industrial Structure and Capital Flows. *American Economic Review*, 102(5).
- Link, P. M. and R. S. J. Tol (2004). Possible Economic Impacts of a Shutdown of the Thermohaline Circulation: an Application of FUND. *Portuguese Economic Journal*, 3(2).
- Lorentz, A. and M. Savona (2008). Evolutionary Micro-dynamics and Changes in the Economic Structure. *Journal of Evolutionary Economics*, 18(34).
- Ma, G. and W. Yi (2010). China's High Saving Rate: Myth and Reality. *International Economics*, 122.
- Manne, A. S. and R. Richels (2004). MERGE: A Model for Evaluating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies, <http://www.stanford.edu/group/MERGE/>.
- Manne, A. S., R. Mendelsohn, and R. Richels (1995). MERGE-A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23(1).
- Nordhaus, W. D. (1992). The "DICE" Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. *Cowles Foundation Discussion Paper*, No. 1009. New Haven, CT: Cowles Foundation for Research in Economics.
- Nordhaus, W. D. and J. G. Boyer (2000). *Warming the World: Economic Models of Climate Change*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Nordhaus, W. D. and Z. Yang (1996). RICE: A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Optimal Climate-Change Policy. *The American Economic Review*, 86(4).
- Pizer, W. A. (1999). The Optimal Choice of Climate Change Policy in the Presence of Uncertainty. *Resource and Energy Economics*, 21(3–4).
- Popp, D. (2004). ENTICE: Endogenous Technological Change in the DICE Model of Global Warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48(1).
- Romer, P. M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94(5).
- Sagar, A. D. and B. Van Der Zwaan (2006). Technological Innovation in the Energy Sector: R&D, Deployment, and Learning-by-doing. *Energy Policy*, 34(17).
- Sue wing, I. (2008). Explaining the Declining Energy Intensity of the U. S. Economy. *Resource and Energy Economics*, 30(1).
- Wang, Z. et al. (2010). Policy Modeling on the GDP Spillovers of Carbon Abatement Policies Between China

and the United States. *Economic Modeling*, 27(1).

Wilson, D. and R. Purushothaman (2003). Dreaming with BRICS: the Path to 2050. *Goldman Sachs Global Economics Paper*, No. 99. <http://www.gs.com/insight/research/reports/99.pdf>.

A Research on the Trends of Multi-country-section Carbon Emissions and Energy Uses Driven by Technology Progress

GU Gao-xiang^{1,3}, WANG Zheng^{2,3}

(1. Institute of Population Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

3. Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of State Education of China, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The process-technology progress which is caused by the improvement of the productive technologies can reduce the demands of the intermediate inputs in productive process, and thus reduce the energy demands and carbon emissions. Thus, improving the levels of process technologies is an important way for global carbon emission abatement. In this paper, based on Jin's model (2012), a general equilibrium model of multi-country-section economy was built. Coupled with the climate system of RICE model, a climate-economy integrated assessment model reflecting the interactions between the economic system and the climate system was built. Based on this model, this paper studies the carbon emissions and the energy demands of different countries and sections. The simulated outcomes show that the process-technology progress can bring on early peaks of energy demands and carbon emissions. Under the three different scenarios, China will reach its carbon emission peak at the year 2034, 2030, and 2022, respectively. In the more bold scenario 3, the accumulated carbon emission of China can reduce to 93GtC, accomplishing the abatement target of 100GtC. Besides, along with the progress of the process-technologies, the developing countries like China and India have higher abatement potentials, while in the section, the energy section and the service sections have higher abatement potentials.

Key Words: process-technology progress; general equilibrium; carbon emission peak; energy consumption

责任编辑: 禹 湘