

基于内生能源效率改进的宏观减排结构分析^①

段宏波¹, 张古鹏², 范 英³, 汪寿阳¹

(1. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100190; 3. 北京航空航天大学经济与管理学院, 北京 100191)

摘要: 本文将内生能源效率进步机制引入到综合评估模型 E3METL 中, 并将其区域化构建了中国能源—经济—环境系统综合模型, 从宏观层面揭示中国未来减排量分担结构的变化, 着重分析不同排放约束情景下各排放驱动因素的减排贡献的动态演变特征。研究发现: 碳强度和能源强度是对碳排放产生显著负向影响的因素, 而人均收入和人口因素则正向促进排放的增长。排放控制初期, 能效改进是最大的减排力量来源, 其次是人均收入代表的经济因素; 而在排放控制的中后期, 无碳能源对传统含碳能源的大规模替代将成为碳减排最大的贡献途径。这意味着政府和企业应当充分重视减排力量结构的时期特征和变化规律, 前者应根据减排贡献主体的变化调整其宏观政策扶持导向和力度, 逐步推动产业转型; 后者则需对减排技术发展和研发投入方向进行适时调整, 继而更加成本有效地完成碳减排任务。

关键词: 内生能效改进; 综合评估建模; 排放空间约束; 减排贡献分析

中图分类号: N945; X96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2016)07-0010-14

0 引 言

改革开放以来, 中国经济取得了前所未有的增长。过去 30 年我国的年均 GDP 增速达到 9%, 而近 10 年的经济增速甚至接近 10%, 这远高于同期世界经济的平均增速 3.9%^[1]。自 2010 年开始中国经济总量已超越日本, 跃居全球第二, 其占世界经济的比重也由 2000 年的不足 4% 升至 10% 左右^[2]。高速的经济增长是以持续而快速的能源消耗为支撑的, 从 2000 年到 2012 年, 我国的一次能源消费量一直以高于世界平均水平 7% 的年均增速增长^[3]。能源消费的主体依然是含碳的化石能源, 尤其是煤炭 (其消费份额稳居 70% 左右)。在此背景下, CO₂ 等温室气体排放量的急剧增加是不可避免的结果。到 2012 年, 中国的 CO₂ 排放量已占到全球碳排放总量的 26.7%^[3]。

这意味着中国注定将在未来全球气候谈判中扮演不可或缺的角色, 而这种高耗能、高排放的经济增长方式显然是不可持续的^[4]。

如何处理经济发展和温室气体减排之间的矛盾一直以来都是各国密切关注的重要问题, 而可行的途径主要有两条: 其一是大力发展替代能源技术, 逐步实现能源消费由含碳能源向无碳能源的转换; 其二是提高传统能源的利用效率, 最大可能地降低含碳能源使用的环境负影响^[5]。对中国而言, 提高能效是现阶段较之发展新能源技术更为合适的选择。这主要基于以下两点考虑: 首先, 从世界范围来看, 几种主要的无碳能源技术均处于市场扩散的早期阶段, 这一阶段的显著特点是技术本身仍不完善, 使用成本较高, 作为发展中国家, 中国在短时间内难以有充足的资金来支持相关技术的研发和推广; 其次, 煤炭等化石

① 收稿日期: 2014-08-26; 修订日期: 2015-10-19。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71503242; 71210005); 教育部人文社科青年基金资助项目 (14YJC630029)。

作者简介: 段宏波 (1985—), 男, 湖南益阳人, 博士, 讲师。Email: hbduan@ucas.ac.cn

能源一直以来都主导了我国的能源消费市场,在资源禀赋约束和产业惯性的作用下,这种能源消费结构在未来相当长的一段时期内将难以改变。在此背景下,提高传统能源利用效率的重要性是不言而喻的。

事实上,能效改进被广泛认为是成本有效的排放控制选择,其碳减排潜力十分可观。从全球来看,充分的能效改进可以将2035年之前的全球能源需求平均增速降低0.4%^[6];如果以每tCO₂当量的减排成本不高于60欧元的水平为界线,能效提高所带来的减排贡献最高可以达到40%^[7]。从地区来看,我国“十一五”期间,由能效改进所带来的化石能源节约量达到6.3亿t标准煤,这相当于减少了约17亿tCO₂排放。如果关键的能效技术得以充分发展,2011年至2030年由能源效率改进所带来的累积CO₂减排量最高可达48亿t^[8]。从部门来看,能效改进可以大幅降低水泥生产过程的碳减排,这一减排比重最高可达40%;而能源效率改进在电力部门的净减排贡献约为13%,在钢铁行业的潜在减排贡献达15%~40%^[8,9]。

关于能源效率的相关研究一直以来都是能源经济领域的研究热点,这些研究为估算部门或区域的能源效率水平,分析能效改进的影响因素提供了充分的证据。Wang等^[10]估算了2006年~2010年我国各省份的能源效率,指出大部分区域的能源效率还有较大的改进空间,而技术创新将是影响能效水平进一步提高的关键因素。Lin等^[11]利用随机前沿分析方法分析了我国钢铁行业能效水平的区域差异,指出经济结构调整是影响能效提高的重要因素。Hasanbeigi等^[12]认为到2030年通过提高能效可以为中国钢铁行业累计节约电力252TWh,由此带来的碳减排潜力达到1.39亿t。Filippini等^[13]对欧盟27个成员国居民部门的能效值进行了估算,认为财政激励和能效强化标准能显著促进能源效率的提高,而情报性措施对能效改进的影响十分有限。Nordhaus^[14]认为较高的化石能源价格不仅可以促进能效改进投资活动的开展,同时也能有效推动能源消费行为的转变。例如,有研究表明,日益高企的能源价格是近年来我国工业部门能源强度不断下降的关

键影响因素^[15]。

值得注意的是,能效改进并不一定会导致能源节约,忽视回弹效应的影响可能会高估技术进步带来的资源和能源节约效应^[16]。Brännlund等^[16]指出能源效率改进确实会引起能源消费回弹,且能效每提高20%会导致碳排放增加约5%,而抵消这些排放则需将碳税水平提高130%。Mahmood和Marpaung^[17]研究指出:碳税与能效改进的组合政策可以有效降低能源消费和碳排放,同时引起能源消费回弹效应。查冬兰和周德群^[18]利用CGE模型模拟了能效提高所带来的回弹效应,指出:当能效提高4%时,各考察部门的回弹效应都在30%以上。此外,更多有关能源效率回弹效应的研究集中在行业层面,包括道路货运交通行业、居民建筑行业以及重工业部门等^[19,20]。Lin等^[19]发现:就居民建筑用能而言,城市能效的回弹效应要远小于农村地区;从全国来看,如果回弹效应可以完全规避,那么全国居民建筑行业每年的电力消费量将下降20%。由此可见,单独的旨在节能的能效改进政策的效果可能远达不到预期^[21]。

因此,现有关于能源效率的研究主要集中在微观实证层面,较少有研究从宏观角度出发,考察未来我国能源效率水平的长期变化,分析排放控制约束的引入对减排力量结构的影响,揭示各减排驱动因素的减排潜力的演变特征。事实上,要从宏观层面研究碳减排背景下的区域能源效率问题至少需要应对两方面的挑战:首先,气候变暖是典型的全球性问题,基于此,当前主流的研究工具—气候变化综合评估模型(IAM)—的模型尺度也是全球性的。因此,如何将IAM模型框架区域化,并建立中国气候变化综合模型是完成该研究任务面临的第一个挑战;其次,当前主流的气候变化综合评估模型,例如:DICE模型和WITCH模型等,多利用所谓的自发性能源效率进步参数(AEEI)来外生设定能效进步水平^[22,23]。一般而言,AEEI仅包括消费行为的自发调整以及能源结构转换等所有非价格因素所引起的能效改进^[24]。然而,驱动能源效率改进的因素有很多,包括能源价格的波动、价格驱动的消费行为的变化以及能源研发政策的支持等,忽视内生能源效率进步将在很大程度上影响综合模型

中经济增长和排放强度演变等结果^[25]。因此，完成本研究待解决的第二个问题是如何在系统综合模型中引入基于 R&D 的内生能源效率改进机制 (EEEI)，同时考虑内生和外生能效改进，继而有效避免能效机制不完善可能给模型结果带来的偏差。

基于此，本文工作将从以下几方面展开：1) 将全球尺度的系统综合模型 E3METL 拓展到区域层面，构建我国单部门经济 - 能源 - 环境系统综合模型 CE3METL；2) 发展内生能效刻画机制，将基于 R&D 投资的内生能源效率改进从传统能源效率部门分离出来，完善现有系统综合模型的能效刻画机制；3) 利用基于内生和外生双重能源改进的 CE3METL 模型考察 2010 年 ~ 2050 年我国能源效率的动态演变趋势和特征，并利用 Kaya 分解方法对排放空间约束情景下各种减排力量的潜在贡献进行分解分析。

1 模型与方法

E3METL 模型是一个典型的以新古典最优经济增长理论为基础的气候变化系统综合模型，与经典的 DICE 模型一样，E3METL 模型也可以看成是 Ramsey 模型的扩展。这类模型的特点是除了传统投资还包括环境相关投资，于是，存在与传统资本存量相对应的环境资本存量，即大气中的温室气体浓度^[26]。由于环境资本累积一般会对经济产生负向影响，因此环境资本也被称作负资本。显然，排放的增加将加速负资本的累积，而与减排相关的投资则可减少温室气体排放量，继而降低总的负资本存量。模型总体目标是通过采取减排行动来降低环境负资本，以防止灾难性的气候损害的出现，这实际上是通过牺牲当前消费来换取未来更多可能的消费^[27]。

1.1 经济部门

E3METL 模型的生产过程主要通过 Cobb-Douglas 生产函数来描述，投入要素包括资本 K 、劳动 L 和能源 E ，其中，资本由投资驱动，劳动人口根据世界银行的预测数据外生给定，能源则包括含碳能源、无碳新能源和能源相关的知识资本。于是，生产方程可表示为

$$Output_t = A_t K_t^\sigma L^{1-\sigma-\eta} E_t^\eta \quad (1)$$

A 表示全要素生产率，它由初始值和年递减率决定。产出主要用来投资 I 、提供居民消费 C 、支付能源成本 EC ，以及进行温室气体减排 AC ，即

$$Output_t = C_t + I_t + EC_t + AC_t \quad (2)$$

其中能源成本为各种能源消费量与相应价格的乘积，碳减排成本则主要指含碳能源税收。

1.2 能源技术部门

能源部门是 IAM 不可或缺的重要部分，它既是生产部门能源投入的提供者，同时也是 CO_2 等温室气体排放的来源。此外，技术进步也往往隐含在能源部门各种能源技术的演变过程中。E3METL 模型技术部门的特点集中在两个方面，即多重能源技术演变机制与内生能源效率改进机制。

从已有研究来看，自顶向下的综合评估模型一般利用常弹性替代函数方法来刻画技术间的替代演变关系，而这种方法难以支持多种能源技术的引入^[28]。基于此，提出了多重能源技术演变机制，该技术机制的主体是修改的 Logistic 技术扩散模型。这种机制最大的特点是允许 IAM 进行多种能源技术的引入和刻画，使得自顶向下的 IAM 具有更多的自底向上的技术特征^[29]。假设 $S_{i,t}$ 为第 i 种无碳能源技术的市场份额，且最大的市场潜力为 $\hat{S}_i (0 < \hat{S}_i \leq 1)$ ，则多重能源技术演变机制可描述为

$$\frac{dS_{i,t}}{dP_{i,t}} = a_i S_{i,t} (\hat{S}_i (1 - \sum_{j \neq i} S_{j,t}) - S_{i,t}) \quad (3)$$

其中 a_i 为替代参数，描述无碳能源技术 i 对化石能源技术的替代难易程度。 $P_{i,t}$ 表示标杆技术（化石能源技术）成本 $C_{f,t}$ 与无碳能源技术成本 $C_{i,t}$ 的相对比值，即

$$P_{i,t} = C_{f,t} (1 + \tau_t) / C_{i,t} (1 - v_{i,t}) \quad (4)$$

因此，从成本角度来看，相对成本 $P_{i,t}$ 越接近于 1，两种技术间的替代可能性越大；当 $P_{i,t} = 1$ 时，标杆技术与无碳技术在理论上将实现完全替代。 $P_{i,t}$ 的变化受两方面因素的影响，即碳税 τ_t 与补贴 $v_{i,t}$ 的政策实施力度和化石能源技术与无碳能源技术的成本差异。显然， $P_{i,t}$ 会随着碳税水平的提高或替代技术成本的下降而增加。受能源技术进步的影响，替代能源技术的成本将随着

时间的推移而不断下降。这里的内生能源技术进步主要通过双因素学习曲线模型来刻画, 所谓的双因素即“干中学”(learning-by-doing, LBD)和“研中学”(learning-by-searching, LBS)。“干中学”过程是指技术的发展(如装机容量或产量的增加)会带来经验或知识的累积, 而知识累积到一定程度之后可以促进技术进步, 继而降低技术使用成本。“研中学”过程是促进技术进步的另一内在因素, 它通过针对性的技术研发投入来累积知识或经验, 来自研发的知识最终将与来自LBD过程的知识共同作用于技术成本的下降过程。假设 $KD_{i,t}$ 和 $KS_{i,t}$ 分别表示LBD过程和LBS过程的知识存量, 则双因素内生学习模型可如下表示

$$C_{i,t} = \Theta_i (KD_{i,t})^{-b_i} (KS_{i,t})^{-c_i} \quad (5)$$

上式中的 b_i 和 c_i 分别为LBD过程和LBS过程的学习指数, 代表技术学习的速率。 Θ_i 由初始知识存量 $KD_{i,0}$ 和 $KS_{i,0}$ 决定。

能源效率刻画是E3METL模型的第二个重要的特色。从已有研究来看, 系统综合模型中的能源效率多为外生设定, 外生的途径主要有两条: 其一, 将能效改进效应暗含在满足希克斯中性生产率假设的全要素生产率参数中^[25, 26]; 其二, 引入自发性能率效率进步参数(AEEI)来刻画所有非价格变动因素引起的能效改进^[28]。显然, 当前的外生能效处理方法一方面难以囊括价格变动所带来的能源消费结构调整和消费行为的变化, 另一方面也无法考虑R&D政策实施对能效提高的影响。因此, 单纯的外生能源效率处理方法一直以来饱受争议^[30]。本文尝试发展基于R&D投入的内生能效改进机制, 将同时考虑内生和外生能效进步的混合机制引入到E3METL中。外生能效改进的总体思路是通过提高能源利用效率, 单位化石能源投入的产值创造能力得到提升, 而单位化石能源消耗的碳排放量(碳强度)则沿既定的轨迹随时间递减, 即

$$F'_t = F_t / \phi_t \quad (6)$$

且

$$\phi_t = e^{(g_t/d)(1-e^{-dt})} \quad (7)$$

此处 ϕ_t 的轨迹由排放增长率 g_t 和增长率的递减率 d 两个参数决定。由于 $g_t < 0$, 故而 $\phi_t < 1$ 。因

此, 能效提高之后的化石能源投入量 F'_t 将大于基础化石能源投入 F_t ^[28]。

内生能效改进的思路是通过针对性的研发资金投入, 促使能源使用相关知识资本的形成和积累, 而这种知识资本对传统化石能源的替代作用使得生产能够在排放更少的情况下进行。此时, 能源投入可以分为两部分: 即传统化石能源和能源相关的知识资本。假设 $S_{F,t}$ 为化石能源的市场份额, KDE_t 为能源相关的知识存量, 则内生能效改进机制可描述为

$$E_t = \frac{1}{S_{F,t}} (\alpha_{ee} KDE_t^\rho + F_t^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (8)$$

方程(8)中 α_{ee} 为知识资本的规模因子, 用以刻画研发知识所带来的能源节约效应的大小。 ρ 为知识资本与化石能源间的替代难易程度, 一般而言 $\rho \leq 1$ 。能源相关的知识资本 KDE_t 来自能源R&D投入, 创新可能性前沿方法描述了研发创造知识的过程

$$IPF(RD_t) = b \cdot KDE_t^{\psi_1} \cdot RD_t^{\psi_2} \quad (9)$$

由于研发回报率是随时间变化而递减的, 因此创新可能性前沿函数 IPF 一般需要满足两个条件: 1) IPF 关于研发投入的一阶导数为正, 而其关于研发的二阶导数则为负; 2) IPF 关于 RD 和 KDE 的混合二阶导数小于0。这两个条件同时成立要求 $\psi_1, \psi_2 \in (0, 1)$ 。综合式(7)和式(8), 可以得到内生能效和外生能效的混合处理机制, 即

$$E_t = \frac{1}{S_{F,t}} \left(\alpha_{ee} KDE_t^\rho + \left(\frac{F_t}{\alpha_F \phi_t} \right)^\rho \right)^{1/\rho} \quad (10)$$

α_F 为外生能效改进或碳强度下降的规模因子。

1.3 气候部门

这部分旨在计算 CO_2 排放、引入碳循环过程、描述由辐射强迫到温室效应形成的过程, 以及刻画温室效应与气候反馈损失之间的关系。E3METL模型内生计算的温室气体(GHG_s)主要指人为 CO_2 排放, 其它来源的碳排放(如土地使用方式变化所带来的碳排放)与 CH_4 等非 CO_2 排放, 以及气溶胶粒子等排放均外生设定^[26]。碳循环过程通过引入三层碳库模型(three-reservoir model)来描述, 温室效应则利用全球平均地表温度的变化来刻画。其它有关辐射强迫、平均温度变化以及气候损害三者之间关系的描述可参见

DICE 模型^[26].

1.4 E3METL 模型的区域化

由于本研究的目的在于从宏观层面考察排放约束背景下我国能源效率的长期演变特征,并分析各种减排力量的减排分担结构和减排贡献的变化.因此,需要将全球尺度的综合评估模型 E3METL 区域化,以构建中国能源—经济—环境系统综合模型 CE3METL. 要完成这一任务需要做三方面的工作:

1) 进行区域边界闭合处理. 通过设定进口占 GDP 比重的上限值和出口占 GDP 比重的下限值来使进出口在效用目标最大化时跟从最优 GDP 路径的变化而变化,进而避免由于市场不完全闭合导致的不合理经济波动的出现^[31]. 具体地,假设 θ_1 和 θ_2 分别代表进口占 GDP 的最大比重和出口占 GDP 的最小比重,且 EXP_t 和 IMP_t 分别表示出口和进口价值量,则上述边界处理可公式化为

$$IMP_t \leq \theta_1 GDP_t \quad (11)$$

$$EXP_t \geq \theta_2 GDP_t \quad (12)$$

2) 简化气候部门. 由于气候变化是全球性的问题,在单区域情况下,区域排放对全球平均气温升高的贡献以及全球气候变暖对区域的反馈影响均无法确定. 因此,中国版的 CE3METL 模型仅计算内生的人为 CO₂ 排放,对外生的其它碳和非碳排放,以及由 GHGs 排放产生的温室效应和气候反馈影响等均不予考虑.

3) 更新数据库. 将 E3METL 模型中所有的初始数据替换为中国数据,相关参数根据国内历史数据予以估计和校准.

1.5 Kaya 等式与 LMDI 分解法

大量的实证研究表明,经济增长、人口演变、能源效率改进和新能源技术发展是影响碳排放的几个关键因素^[32-34]. 因此,为了研究减排任务的分担结构变化,首先需要考虑如何分离这些关键的减排驱动因素,而 Kaya 等式是常见的排放分解方法. 基于此,本小节将简单介绍 Kaya 排放分解方法.

一般而言,上述排放影响因素可以具体地表述为:单位能源消费的碳排放量(碳强度)、单位

GDP 的能源消费量(能源强度)、人均收入水平和人口数量^[33]. 日本学者 Yoichi Kaya 最早对 CO₂ 排放的影响因素进行了分解,得到了所谓的 Kaya 等式

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{GDP} \cdot \frac{GDP}{POP} \cdot POP = C \cdot I \cdot G \cdot P \quad (13)$$

其中 CO_2 、 GDP 、 E 和 POP 分别代表 CO₂ 排放量、经济总量、能源消费量和人口总量,而 C 、 I 、 G 和 P 则分别表示碳强度、能源强度、人均收入和人口. 显然, Kaya 等式直观地揭示了各排放影响因素之间的相互关系. 为了方便对排放变化进行因素分解, Kaya 等式可进一步变换为^[34]

$$\begin{aligned} \Delta CO_2(t) &= CO_2(t) - CO_2(0) \\ &= \Delta CI_t + \Delta EI_t + \Delta GI_t + \Delta LI_t \quad (14) \end{aligned}$$

式中 ΔCI_t 、 ΔEI_t 、 ΔGI_t 和 ΔLI_t 分别表示引起排放变化的碳强度影响效应、能源强度影响效应、经济影响效应和人口影响效应的大小. 为了计算这些驱动因素对排放的具体影响,此处引入对数平均迪氏分解法(LMDI),通过对式(14)进行差分和乘法分解,可以得到各个排放驱动因素的具体表达式^{[34]②}

$$\Delta CI_t = \frac{CO_2(t) - CO_2(0)}{\ln CO_2(t) - \ln CO_2(0)} \ln \frac{C_t}{C_0} \quad (15)$$

$$\Delta EI_t = \frac{CO_2(t) - CO_2(0)}{\ln CO_2(t) - \ln CO_2(0)} \ln \frac{E_t}{E_0} \quad (16)$$

$$\Delta GI_t = \frac{CO_2(t) - CO_2(0)}{\ln CO_2(t) - \ln CO_2(0)} \ln \frac{G_t}{G_0} \quad (17)$$

$$\Delta LI_t = \frac{CO_2(t) - CO_2(0)}{\ln CO_2(t) - \ln CO_2(0)} \ln \frac{L_t}{L_0} \quad (18)$$

对于既定的碳减排量 ΔCO_2 ,利用式(15)~式(18)可以方便地计算出各个驱动因素的减排量大小,继而推算出各自相应的减排贡献,即 $\Delta CI_t/\Delta CO_2$ 、 $\Delta EI_t/\Delta CO_2$ 、 $\Delta GI_t/\Delta CO_2$ 和 $\Delta LI_t/\Delta CO_2$.

2 数据与情景

2.1 数据处理与关键参数取值

CE3METL 的程序基于 GAMS 软件平台编写,借助 GAMS 内置的 CONOPT 求解器和非线性规划

② 常用的碳排放分解方法有简单平均分解法(SAD)、加权迪氏分解法(AWD)和对数平均迪氏分解法(LMDI)等,但相较而言,LMDI 分解法的实用性较好,且能减少分解残差给结果带来的可能影响^[34]. 基于此,本文也采用 LMDI 法对排放进行分解.

算法 (NLP) 进行动态最优化求解。模型以 2010 年为初始年, 模拟的时间区间为 2010 年 ~ 2050 年。各种能源技术的初始消费量、市场份额等能源相关数据来自于中国能源统计年鉴 2012, 并以电力监管年度报告 2010 中的相关数据予以补充^[35, 36]; GDP、消费、投资和资本存量等宏观经济数据来自于中国统计年鉴 2012^[1]。初始化石能源复合成本取国内煤炭价格、国际原油价格和天然气进口价格平均值 (以消费份额加权)。对非化石能源而言, 其成本分布区间较大, 且不同地区、不同装机规模和技术利用方式下的成本分布区间也不尽相同。一般而言, 除了水电和核能的利用成本与化石能源接近之外, 陆上风能和生物质能的成本为传统能源的 2 倍左右, 而光伏太阳能以及海上风电等新能源技术的成本甚至达到化石能源的 5 倍 ~ 8 倍^[37]。据此, 设定生物质能、核能、水电和其它可再生能源的成本分别表示为: 8 136 元 /t 标煤、4 068 元 /t 标煤、1 627 元 /t 标煤和 5 811 元 /t 标煤。

中国科技统计年鉴的数据显示, 2010 年我国总研发投入为 7 062.58 亿元^[38]。高昌林等^[39] 研究指出我国能源研发占总研发的比重将从 2000 年的 6.4% 增加到 2010 年的 7% 左右。此外, 从国际经验来看, 能源研发资金的主要用途是提高

传统能源利用效率, 用于新能源研发的投资比重仅占 10% 左右^[39]。据此, 可计算出基年我国的能源研发的支出为 494.38 亿元, 其中能效研发支出和无碳能源研发支出分别为 444.94 亿元和 49.44 亿元。此外, 还假定各种无碳能源技术的初始研发资金按照各自相应的技术市场份额来进行分配。

模型运行依赖的关键参数包括技术学习率、研发投入回报率、知识资本折旧率以及知识资本与传统能源间的替代率等。一般而言, 学习率的大小与技术所处的发展阶段密切相关, 成熟的技术 (如水电和核电) 学习率普遍较小; 快速发展中的技术 (如风电和地热能) 学习率较大, 约为 9.8% ~ 12.9%; 而处在发展早期的技术 (如光伏和潮汐能) 的潜在学习效果最强, 其学习率最高可达 20% 以上^[40, 41]。能源相关知识与化石能源间的替代难易程度在很大程度上依赖于能源研发与能源价格间的长期替代弹性^[42]。以能源研发与能源价格间的替代弹性为初始值, 再根据不断升高的化石能源价格, 可以迭代得出给定历史时期的能源研发投入水平, 当该研发投入路径与真实研发支出路径最大可能地接近时, 即得到了能效相关的知识资本与化石能源间的替代难易程度参数值。详细的参数取值见表 1。

表 1 关键参数值选取

Table 1 Summary of values for key parameters

参数名称	研发回报率	知识资本折旧率	能效知识替代能力	能源技术学习率			
				生物质能	水电	核能	其它
取值	0.336	0.50	0.38	14%	1%	9%	13.8%
参考来源	Popp ^[28]	Bibas 等 ^[30]	Popp ^[42]	McDonald 和 Schrattenholzer ^[40] , 邱元等 ^[41] , Weiss 等 ^[43]			

2.2 碳排放约束情景设置

为了考察不同碳排放空间约束下能源效率的减排贡献及其动态演变特征, 本节需要引入排放空间约束情景。事实上, 已有一些文献就未来我国的碳排放路径和空间分配问题进行了探讨。如: Garnaut^[44] 认为与 2001 年相比, 中国 2020 年的碳排放将增长 195%, 而 2050 年的排放则将降低 45%; 联合国开发计划署 (UNDP) 报告预测中国 2020 年的排放量将比 2004 年增长近 80%, 而 2050 年的碳排放需在 1990 年的基础上降低

20%^[45]; 国内学者丁仲礼等^[46] 估算了两摄氏度温控目标下各国的排放配额, 认为中国 2006 年 ~ 2050 年的排放空间约为 109.9 GtC。据此, 设定了除参考情景 (REF) 以外的三种排放空间约束情景, 并估算了各种情景下我国 2010 年至 2050 年的碳排放配额, 详见表 2。值得注意的是, 从价碳税作为主要的政策减排选项被外生引入到 CE3METL 中, 碳税税率的设定标准是使考察期内的累积 CO₂ 排放总量达到各空间约束情景下的碳排放控制要求。

表2 情景设置和排放空间估算
Table 2 Scenarios setting and estimation of carbon space

情景	REF	DING	GARN	UNDP
排放空间 (GtC)	无排放约束	102.64	84.16	73.28
参考来源	—	丁仲礼等 ^[46]	Garnaut ^[44]	UNDP ^[45]

3 结果与分析

3.1 参考情景

参考情景 (REF), 即不考虑碳排放约束的情景, 在此情景下能源效率改进包括内生和外生两部分. 从图1可知, REF情景下, GDP将从2010年的40.12万亿增加到2030年的124.41万亿 (2010年价格), 这一阶段的平均GDP增速约为5.8%; 到2050年, 我国GDP总量达到189.58万亿元,

整个模拟期内的平均GDP增速约为4%^③. 2010年~2050年, 能源消费量持续增加, 但增速明显放缓. 2050年的能源消费量较2010年增长2.67倍左右, 且模拟期内一次能源消费平均增速约为3.3%, 这一结果与UNDP参考情景的预测结果较为接近^[48]. 此外, 考察期内, 碳排放未出现峰值点; 到2050年, 我国的CO₂排放量达到5.53 GtC, 该水平较IEA基准情景下的排放值偏高, 而与UNDP参考情景下的碳排放水平相当^[49].

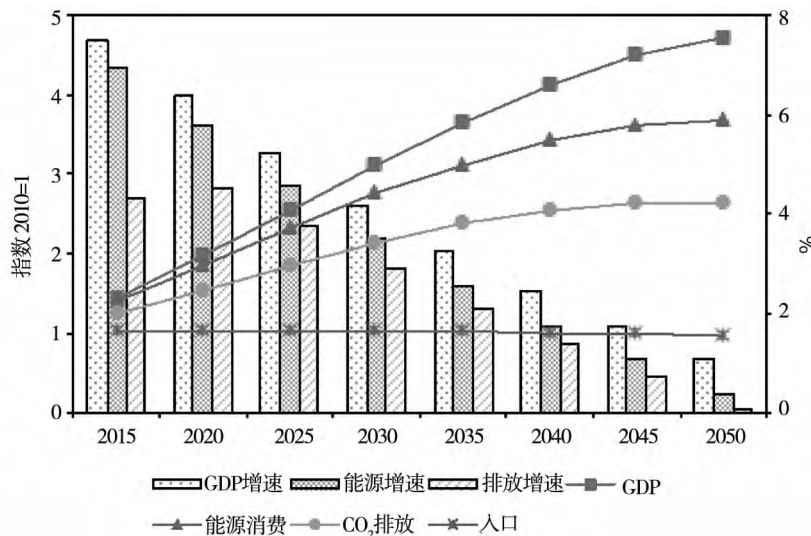


图1 参考情景下各关键变量的增长演变

Fig. 1 Evolution of the key variables under the REF case

3.2 内生能效改进机制的引入对减排结构的影响

为了方便考察内生能效改进机制下各个排放驱动因素对碳排放增长的贡献, 本小节引入无内生能效改进情景作为对比. 为方便区分, 新引入的情景简称为NEEEI情景, 而原有参考情景则换称为EEEI情景. 图2展示了两种情景下的各驱动因素对碳排放增长的影响. 总体看来, 碳强度和能源强度与排放之间始终保持着负相关关系, 而人均收入是唯一一个对排放产生持续正向影响的因素. 显然, 无论是碳排放

强度的下降, 还是能源强度的下降, 其最终的结果都将导致同等产出的碳排放量下降; 而在人口数量相对稳定的情况下, GDP的快速增长势必会带来更多的能源消耗和碳排放. 此外, 图2还显示, 人口增长先是对碳排放产生正向影响, 从2045年开始, 人口与排放的关系发生转变. 这主要受人口增长路径的影响, CE3METL假设人口增长沿世界银行的预测路径变化, 在该路径下, 我国的人口数量呈现先增加后下降的趋势, 并于2030年达到人口峰值.

③ 通过校准和对比, CE3METL的GDP增长路径与石敏俊等^[47]研究中的GDP增长趋势较为一致.

显然,随着模拟后期人口数量的下降,受人口驱动的排放量也将相应地下降,但由于人口下

降的速度远低于 GDP 的增长速度,使得影响关系的转变出现一定程度的滞后.

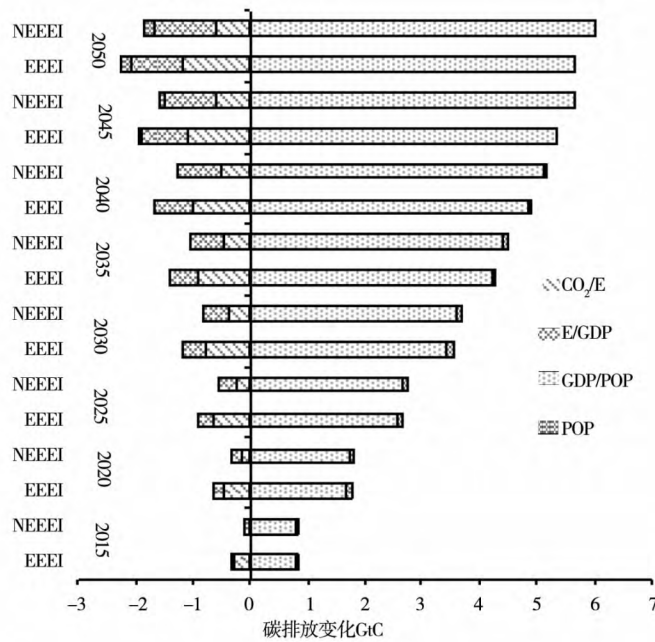


图 2 内生能效改进机制下各排放驱动因素对碳排放增长路径的影响

Fig. 2 The impacts of key driving factors on the growth of CO₂ emissions with and without EEI

从图 2 还可以看出,与 EEI 情景相比, NEEEI 情景下的碳排放量会显著增加,2020 年时,增幅为 9.9%,而到 2050 年,排放增幅将接近 13%. 显然,基于 R&D 的内生能源效率改进的减排效果是十分明显的. 事实上,两种情景下由人均收入因素驱动的碳排放变化并不显著,这表明: 内生能效改进所带来的碳减排效应主要得

益于碳强度和能源强度的下降. 从排放分解的贡献比率来看,内生能源效率的引入会较大幅度的提高人均收入因素在碳排放变化中的贡献值. 例如: 2015 年,EEI 情景下人均收入因素对排放增长的贡献率为 162.46%,而在 NEEEI 情景下,这一贡献比重仅为 110.81% (图 3). 此外,内生能源效率改进引入以后,能源相关的知识资本开始

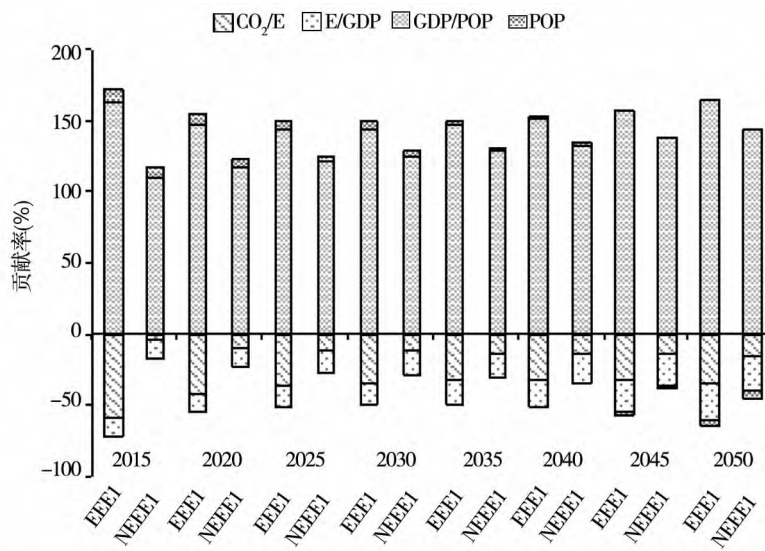


图 3 内生能效改进机制下各排放分解因素对排放增长的贡献份额

Fig. 3 The contributions of various decomposition factors to the growth of CO₂ emissions with and without EEI

替代传统含碳能源,这使得 EEEI 情景下的碳强度出现明显下降,继而促使该情景下由碳强度带来的减排贡献率的显著升高.例如:2015 年时,内生能效情景下能源强度变化对排放的贡献比率约为 -59.26% ,而不考虑内生能源改进时这一数值仅为 -0.03% (图 3).显然,由人均收入变化给碳排放带来的正向效应的增幅要远小于由碳强度变化给碳排放带来的负向影响效应,这也从另一角度解释了为何内生能源效率改进的引入能够显著降低碳排放水平.

3.3 排放约束下的减排贡献分析

图 4 左侧显示的是不同排放空间约束情景下各个分解因素对减排量的分担情况,图 4 右侧展示了各个排放驱动因素的具体减排贡献的变化(相对于 REF 情景).总体看来,排放约束越严格,减排行动开始得越早,同时减排力度也越大.在 DING 情景下,排放轨迹将在 2045 年左右出现峰值,而在更为严格的 UNDP 情景下,排放峰值点则将提前到 2035 年左右.

从减排贡献的变化情况来看,尽管随着时间的推移和排放控制力度的增强人均收入因子所分担的减排量有不同程度的增加,但是其减排贡献却呈递减趋势,从 2015 年的 40% 左右降至 2050 年的 20% 左右.由于减排前后的人口变化路径是相同的,因此,人均收入因子所分担的减排绝对量的增加说明了严格的排放约束造成了更大的经济损失,致使能源消费和碳排放量都出现更大幅度的下降.但是相比于其它减排因素,其减排分担量依然较小,使得其减排贡献被不断挤占.能源强度分担的减排量最大,在 DING 情景下,2015 年时能源强度变化带来的减排贡献达到 50.76% ,即使在严格的 UNDP 情景下,其减排贡献依然高达 44.69% ,明显高于其它两种减排力量.与人均收入因素相比,能源强度所分担的减排量也随时间的变化而不断增加;所不同的是,排放约束越严格,其相应的减排贡献的下降速度

越快.例如:在 UNDP 情景下,能源强度的减排贡献将从 2015 年的 45.69% 降至 2050 年的不到 10% .能源强度分担的减排绝对量的增加正好反映了能源效率的提高,这其中包含了内生和外生能效改进的双重效果;而其减排贡献的迅速下降则说明存在严格排放管制时,能源效率并不是贡献最大的减排力量,相反,其减排贡献会被其它因素进一步挤占.

碳强度是三个减排驱动因素中唯一一个减排分担量和减排贡献都随时间的变化和排放管制程度的增强而不断增加的因素.尽管 2015 年时,三种情景下碳强度的减排贡献都不足 10% ,但是随着时间的推移,其减排贡献增长迅速,到 2050 年, DING 情景、GARN 情景和 UNDP 情景下,碳强度的减排贡献分别增至 32.14% 、 54.55% 和 72.65% .显然,在排放控制的中后期,该因素成为了 CO_2 减排的主要力量.事实上,由于本研究将所有的化石能源当作一种复合含碳能源来处理,并没有考虑具体的化石能源结构,故而碳排放因子也是常量.因此,碳强度的变化实际上体现的是传统化石能源与无碳新能源之间组份结构和替代关系的变化.而前面的结果表明,减排的根本途径是无碳能源对传统能源的大规模替代,因此人均收入因素和能源效率因素的减排贡献将在很大程度上被能源结构替代转换的减排贡献所挤占.显然,减排中后期非化石能源技术得到大规模发展的直接推动力是严格的排放管制.一方面,严格的排放约束意味着较高的碳税水平,这将大幅提高化石能源的利用成本;另一方面,在严格的减排目标下,各方发展替代能源的积极性和紧迫性会显著提高,伴随而来的是不断增加的新能源技术研发投入,这使得基于 LBS 和 LBD 的双重技术学习效应不断增强,继而促使替代能源技术成本快速下降.而上述两方面影响的结果是提高无碳能源技术的成本竞争力,最终加速其市场扩散,并大规模地替代传统含碳能源^④.

^④ 事实上,由 Kaya 分解式可知,影响排放的因素总共有四个,但由于与参考情景相比,排放约束情景下的人口演变路径并没有任何变化,故而人口因素带来的减排变化量为零.因此,此处仅对除人口因素以外的其它三个因素进行了分析.

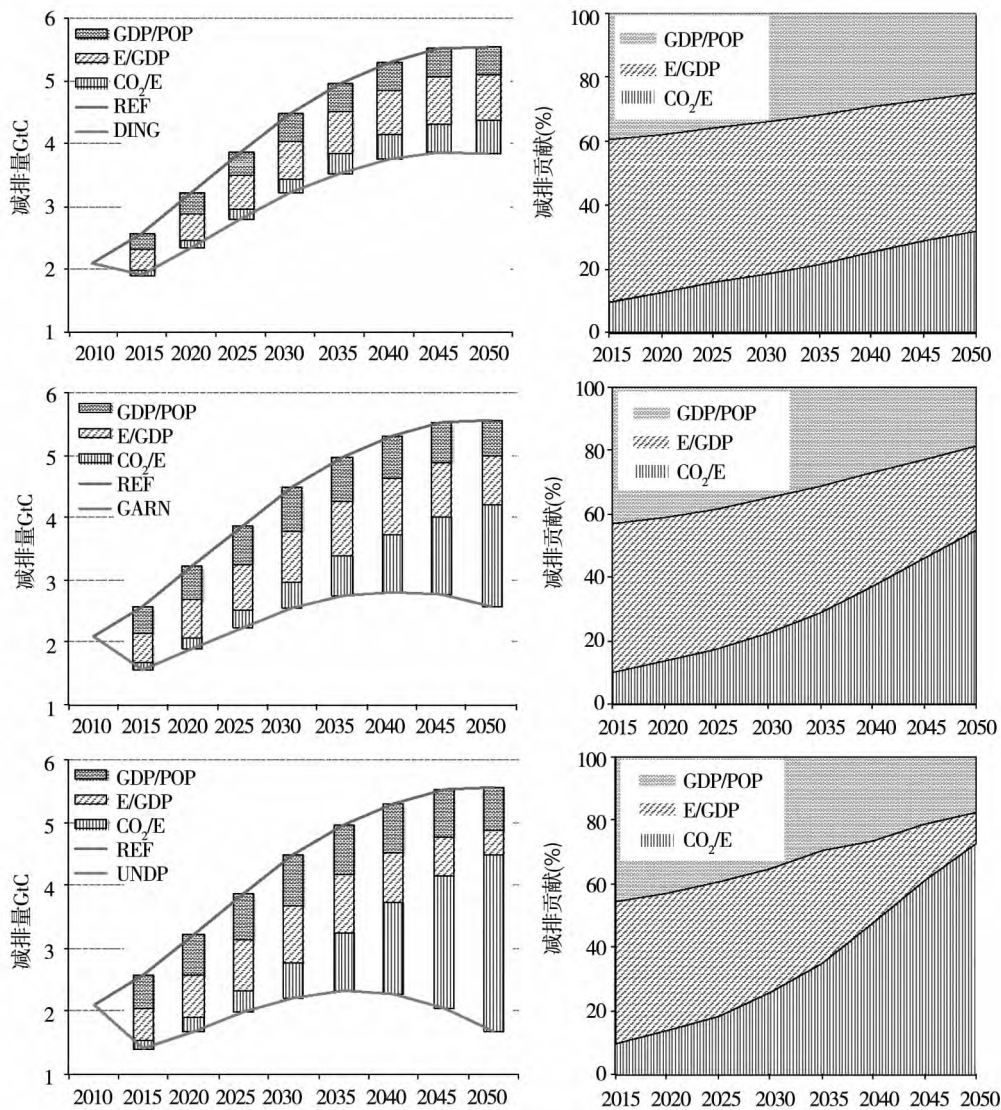


图 4 不同排放空间约束下排放驱动因素的减排分担量和减排贡献的演变特征

Fig. 4 The evolution of carbon reductions for the decomposition factors under various carbon-restrained scenarios

4 结束语

本研究主要围绕内生能效改进机制下不同排放驱动因素的碳减排贡献分析这一主题展开,其特点可以归纳为三个方面:从研究视角来看,当前关于能源效率的研究多集中于微观实证层面,鲜有文献从宏观层面来研究能源效率改进对排放增长的影响,本文通过构建区域能源-经济-环境系统综合模型从宏观层面来探索能源效率,尤其是内生能源效率改进对碳减排的影响。从方法层面看,已有自顶向下的系统综合模型(包括

IAM)多借助 AEEI 参数以外生设定能效改进水平,本文将内生能效改进机制引入到新构建的 CE3METL 模型中,同时考虑了内生和外生的复合能效改进效应。从研究问题来看,目前多数文献关注的是能效改进所带来的宏观减排潜力的大小,少有文章研究碳减排发生时各关键排放影响因素的减排分担和减排贡献结构的变化,尤其对中国而言。本文工作针对性地弥补了这一研究不足。

通过研究发现:碳强度和能源强度是对碳排放产生显著负向影响因素,而人均收入和人口因素则正向促进排放的增长。值得一提的是,随

着人口拐点的到来,人口因素对碳排放的影响将发生转变,人口数量的下降最终会降低碳排放增速.内生能效改进的引入对排放的影响主要体现在两方面:即人均收入因素对排放的促增影响和碳强度因素对排放的抑降影响.然而,碳强度因素对排放的负向影响要远大于人均收入的正向影响,最终使得碳排放总量大幅下降.排放控制初期,能效改进是最大的减排来源,其次是人均收入代表的经济因素.但随着时间的推移,这两个因素的减排贡献都呈现不同程度的下降,尤其对于能源效率因素而言,取而代之的是新能源发展带来的能源结构的变化.事实上,在排放控制的中后期,无碳新能源对传统化石能源的大规模替代成为了碳减排最大的贡献途径,在严格的排放控制情景下其减排贡献最高可达72.65%.

因此,了解减排量的分担结构,掌握各减排驱动因素的减排贡献的动态演变特征,对于政府制定合理的减排目标和适宜减排技术扶持政策,对排放主体企业找准减排技术投资定位,进行成本有效的减排具有十分重要的意义.显然,加大政府在能效改进方面的研发投入,同时引导更多私有资金流向能效改进部门,是减排初期有效的政策方向.在未来相当长的一段时期内,化石能源无疑将继续扮演能源供给主力的角色,这使得

能效改进成为了这一时期化解经济稳定增长和二氧化碳减排之间矛盾的不二选择.针对性的研发活动的开展,能够快速改进传统能源利用效率,从而大幅降低单位产出的CO₂排放.相较于排放控制目标带来的高昂的碳税,对企业而言,通过研发投入来提高能源效率可能是更具经济性的减排选择^[50].在排放控制的中后期,政府和企业减排努力的方向需要逐步调整,因为这一时期化石能源的资源稀缺性表现得更为明显,且能效改进的潜力已十分有限,同时,无碳能源技术开始规模化发展.因此,这一时期大力发展无碳能源技术,并促进其对传统能源的替代转化应当成为有关部门政策减排的重心.具体来看,对政府而言,需要确立替代减排的地位,明确无碳能源技术发展的方向,制定具体的产业发展规划和详实的帮扶计划,为企业发展各种新能源营造良好的政策环境;同时,还需要制定高碳、高耗能设备的逐步淘汰计划,减少支柱产业对传统能源的依赖,既有利于能源结构的转型,也可为新能源的大规模利用创造条件.对企业而言,研发投资的重点应该从提高能效逐步转向发展替代能源技术,制定高碳固定资本的加速折旧计划了;利用良好的政策环境大力推进无碳能源技术的市场化,在完成减排任务的同时实现产业升级转型.

参 考 文 献:

- [1]国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
State Statistics Bureau. Chinese Statistical Yearbook 2011 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [2]World Bank. Global Economic Prospects: Uncertainties and Vulnerabilities [R]. Washington DC, 2012.
- [3]British Petroleum (BP). Statistical Review of World Energy [R]. UK: London, 2013. www.bp.com/statisticalreview.
- [4]卞亦文. 非合作博弈两阶段生产系统的环境效率评价[J]. 管理科学学报, 2012, 15(7): 11-19.
Bian Yiwen. Eco-efficiency evaluation of non-cooperative game two-stage production system [J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(7): 11-19. (in Chinese)
- [5]柴建, 郭菊娥, 席酉民. 我国单位GDP能耗的投入占用产出影响因素分析[J]. 管理科学学报, 2009, 12(5): 40-48.
Chai Jian, Guo Ju'e, Xi Youmin. Input-occupancy-output factor analysis of energy use per unit of GDP in China [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(5): 40-48. (in Chinese)
- [6]McKinsey and Company. Energy Efficiency: A Compelling Global Resource [R]. New York: McKinsey & Company, 2010.

- [7]Xiao H ,Wei Q P , Wang H L. Marginal abatement cost and carbon reduction potential outlook of key energy efficiency technologies in China's building sector to 2030 [J]. *Energy Policy* ,2014 ,69: 92 – 105.
- [8]Worrell E , Bernstein L , Roy J , et al. Industrial energy efficiency and climate change mitigation [J]. *Energy Efficiency* , 2009 ,2(2) : 109 – 123.
- [9]Kim Y , Worrell E. International comparison of CO₂ emissions trends in the iron and steel industry [J]. *Energy Policy* , 2002 ,30(10) : 827 – 838.
- [10]Wang K , Lu B , Wei Y M. China's regional energy and environmental efficiency: A range-adjusted measure based analysis [J]. *Applied Energy* ,2013 ,112: 1403 – 1415.
- [11]Lin B Q , Wang X L. Exploring energy efficiency in China's iron and steel industry: A stochastic frontier approach [J]. *Energy Policy* ,2014 ,72: 87 – 96.
- [12]Hasanbeigi A , Morrow W , Sathaye J , et al. A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry [J]. *Energy* ,2013 ,50: 315 – 325.
- [13]Filippini M , Hunt L C , Zoric J. Impacts of energy policy instruments on the estimated level of underlying energy efficiency in the EU residential sector [J]. *Energy Policy* ,2004 ,69: 73 – 81.
- [14]Nordhaus W D. Modeling Induced Innovation in Climate-change Policy , in: Grubler , A. , Nakicenovic , A. , Nordhaus , W. D(Eds.) , *Technological Change and Environment* [M]. Resources for the Future , Washington , DC ,2002: 182 – 209.
- [15]Fisher-Vanden K , Jefferson G H , Jingkui M , et al. Technology development and energy productivity in China [J]. *Energy Economics* ,2006 ,28(5 – 6) : 690 – 705.
- [16]Brännlund R , Ghalwash T , Nordström J. Increased energy efficiency and the rebound effect: Effects on consumption and emissions [J]. *Energy Economics* ,2007 ,29(1) : 1 – 17.
- [17]Mahmood A , Marpaung C O P. Carbon pricing and energy efficiency improvement-why to miss the interaction for developing economics? An illustrative CGE based application to the Pakistan case [J]. *Energy Policy* ,2014 ,67: 87 – 103.
- [18]查冬兰 ,周德群. 基于 CGE 模型的中国能源效率回弹效应研究 [J]. *数量经济技术经济研究* ,2010 ,12: 39 – 66.
Cha Donglan , Zhou Dequn. The research on China's energy efficiency rebound effect based on CGE model [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics* ,2010 ,12: 39 – 66. (in Chinese)
- [19]Lin B Q , Liu H X. A study on the energy rebound effect of China's residential building energy efficiency [J]. *Energy and Building* ,2015 ,86: 608 – 618.
- [20]Wang Z H , Lu M. An empirical study of direct rebound effect for road freight transport in China [J]. *Applied Energy* , 2014 ,133: 274 – 281.
- [21]Sorrell S , Dimitropoulos J , Sommerville M. Empirical estimates of the direct rebound effect: A review [J]. *Energy Policy* , 2009 ,37(4) : 1356 – 1371.
- [22] Nordhaus W D. *Managing the Global Commons , the Economics of Climate Change* [M]. Cambridge , MA: MIT Press ,1994.
- [23]Bosetti V , Carraro C , Galeotti M , et al. WITCH: A world induced technical change hybrid model [J]. *The Energy Journal* ,2006: S13 – S38.
- [24]Dowlatabadi H , Oravetz M A. US long-term energy intensity: Backcast and projection [J]. *Energy Policy* ,2006 ,34(17) : 3245 – 3256.
- [25]Schumacher K , Sands R D. Where are the industrial technologies in energy-economy models? An innovative CGE approach for steel production in Germany [J]. *Energy Economics* ,2007 ,29(4) : 799 – 825.
- [26]Nordhaus W D. Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* ,2010 ,107(26) : 11721 – 11726.
- [27]Duan H B , Fan Y , Zhu L. What's the most cost-effective policy of CO₂ targeted reduction: An application of aggregated

- economic technological model with CCS [J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 866 – 875.
- [28] Popp D. ENTICE: Endogenous technological change in the DICE model of global warming [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 48(1): 742 – 768.
- [29] Duan H B, Zhu L, Fan Y. Modeling the evolutionary paths of multiple carbon-free energy technologies with policy incentives [J]. *Environment Modeling & Assessment*, 2014, 20(1): 55 – 69.
- [30] Bibas R, Méjean A, Hamdi-Cherif M. Energy efficiency policies and the timing of action: An assessment of climate mitigation costs [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2015, 90: 137 – 152.
- [31] Kumbaro-lu G, Karali N, Arıkan Y. CO₂, GDP and RET: An aggregate economic equilibrium analysis for Turkey [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(7): 2694 – 2708.
- [32] Raupach M R, Marland G, Ciais P, et al. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(24): 10288 – 10293.
- [33] 赵 奥, 武春友. 中国 CO₂ 排放量变化的影响因素分解研究: 基于改进的 Kaya 等式与 LMDI 方法 [J]. *软科学*, 2010, 24(12): 55 – 59.
Zhao Ao, Wu Chunyou. Analysis of decomposition of influencing factors of variation in CO₂ emission of China [J]. *Soft Science*, 2010, 24(12): 55 – 59. (in Chinese)
- [34] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867 – 871.
- [35] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
State Statistics Bureau. *Chinese Energy Statistical Yearbook 2011* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [36] 国家电力监管委员会. 中国电力监管年度报告 [R]. 北京, 2012, <http://www.serc.gov.cn>.
State Electricity Regulatory Commission. *Annual Report of China Power Regulation 2011* [R]. Beijing, 2012, <http://www.serc.gov.cn>. (in Chinese)
- [37] Gerlagh R, Van der zwaan B C C. Gross world product and consumption in a global warming model with endogenous technological change [J]. *Resource and Energy Economics*, 2003, 25(1): 35 – 57.
- [38] 国家统计局. 中国科技统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
State Statistics Bureau. *Chinese Statistical Yearbook of Science and Technology 2011* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [39] 高昌林, 施 涵, 吕永波, 等. 中国能源研发政策研究概要 [J]. *能源研究与利用*, 2004, 7(3): 3 – 6.
Gao Changlin, Shi Han, Lü Yongbo, et al. Energy R&D policy research profile of China [J]. *Energy Research & Utilization*, 2004, 7(3): 3 – 6. (in Chinese)
- [40] McDonald A, Schrattenholzer L. Learning rates for energy technologies [J]. *Energy Policy*, 2001, 29(4): 255 – 261.
- [41] 邸 元, 崔潇濛, 刘晓鸥. 中国风电产业技术创新对风电投资成本的影响 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2012, (3): 140 – 150.
Di Yuan, Cui Xiaomeng, Liu Xiaoou. The impact of technology innovations on cost of China's wind-power industry [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, (3): 140 – 150. (in Chinese)
- [42] Popp D. Induced innovation and energy prices [J]. *The American Economic Review*, 2002, 92(1): 160 – 180.
- [43] Weiss M, Junginger M, Patel M K, et al. A review of experience curve analysis for energy demand technologies [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2010, 77(3): 411 – 428.
- [44] Garnaut R. *The Garnaut Climate Change Review* [R]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [45] United Nations Development Program (UNDP). *China Human Development Report, 2009/10: China and a Sustainable Future: Towards a Low Carbon Economy and Society* [M]. Beijing: China Translation and Publishing Corporation, 2009.
- [46] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO₂ 浓度控制: 各国排放权计算 [J]. *中国科学*, 2009, 39(8): 1009

- 1027.

Ding Zhongli , Duan Xiaonan , Ge Quansheng , et al. Control of atmospheric CO₂ concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries [J]. *Science China* , 2009 , 39(8) : 1009 - 1027. (in Chinese)

[47] 石敏俊, 袁永娜, 周晟吕, 等. 碳减排政策: 碳税、碳交易还是两者兼之 [J]. *管理科学学报* , 2013 , 16(9) : 9 - 19.

Shi Minjun , Yuan Yongna , Zhou Shenglü , et al. Carbon tax , cap-and-trade or mixed policy: Which is better for carbon mitigation [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2013 , 16(9) : 9 - 19. (in Chinese)

[48] United Nations Development Program (UNDP) . Human Development Report-Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World [M]. New York: Palgrave Macmillan , 2008.

[49] 李惠民, 齐 晔. 中国 2050 年碳排放情景比较 [J]. *气候变化研究进展* , 2011 , 7(4) : 271 - 280.

Li Huimin , Qi Ye. Comparisons on China's carbon emission scenarios in 2050 [J]. *Advances in Climate Change Research* , 2011 , 7(4) : 271 - 280. (in Chinese)

[50] 许士春, 何正霞, 魏晓平. 资源消耗、污染控制下经济可持续最优增长路径 [J]. *管理科学学报* , 2010 , 13(1) : 20 - 30.

Xu Shichun , He Zhengxia , Wei Xiaoping. Sustainable optimal economic growth path under resource consumption and pollution control [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2010 , 13(1) : 20 - 30. (in Chinese)

China's carbon reduction structure: An analysis based on endogenous energy efficiency improvement

*DUAN Hong-bo*¹ , *ZHANG Gu-peng*² , *FAN Ying*³ , *WANG Shou-yang*¹

1. School of Economics and Management , University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China;

2. School of Public Policy and Management , University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China;

3. School of Economics and Management , Beihang University , Beijing 100191 , China

Abstract: In this paper , an endogenous energy efficiency improvement (EEEI) mechanism is introduced into the Chinese economy-energy-environment integrated model , which is an extended version of the global integrated assessment model (E3METL) . The impact of EEEI on the growth of CO₂ emissions is explored by means of factorization , and the evolution of carbon reduction contributions of the corresponding influencing factor is examined in the presence of carbon controls. It is found that: 1) Both carbon intensity and energy intensity play a positive role in the growth of carbon emissions , while the per capital income and population factor negatively affects the carbon path; 2) In the early stages of carbon control , EEEI is the largest contributor to the cutting of CO₂ emissions; the situation changes in the later stages , and the development of non-carbon technologies acts as the largest contributor instead. Thus , it is of great importance to master the dynamic laws and features of the evolution of carbon reduction factors. For example , the government should adjust the direction and intensity of its macro-driven policies in time; while enterprises have to determine their investment orientation of carbon-reducing technologies duly , so as to achieve their carbon reduction goals more cost-effectively.

Key words: endogenous energy efficiency enhancement; integrated assessment modeling; carbon space constraints; carbon reduction decomposition analysis