

# 成本最优与减排约束下中国能源结构演化路径<sup>①</sup>

石莹<sup>1,2</sup>, 朱永彬<sup>1</sup>, 王铮<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 基于经济平稳增长与能源成本最优, 本文构建了以经济动力学模型与能源成本最优控制的耦合建模, 对比分析了有无碳排放目标的中国能源成本和能源技术发展的演化趋势. 模型模拟的结果发现: 1) 若单纯从经济利益上考虑, 按成本最优的能源结构发展, 煤炭仍将是 中国最主要的能源供给方式. 2) 经济平稳增长的路线下, 排放总量约束势将带来碳高峰值的显著下降, 但对碳高峰出现的时间影响有限. 3) 若要实现碳减排, 煤炭占比显著下降; 而天然气、石油在非电力能源中的占比增加; 在电力能源中占比基本保持不变. 4) 考虑成本与减排目标, 水电将成为我国发展最快的电力能源. 5) 化石能源价格的增长以及新能源发电技术的学习效应将刺激新能源发电技术的发展, 并逐渐取代火力发电. 6) 边际减排成本随着减排力度的增加而增加. 若要实现高减排目标, 在不考虑 CCS 技术的情况下, 中国的边际减排成本很高. 因此, 中国以煤为主的能源资源特点也决定了未来有限的减排空间.

**关键词:** 能源模型; 能源结构; 碳排放; 气候政策; 最优控制

**中图分类号:** F713.36    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-9807(2015)10-0026-12

## 0 引言

随着全球气候的不断恶化, 我国快速增长的碳排放趋势也日益受到来自各方的压力. 中国作为负责任的大国也在降低碳排放上做着积极的努力. 在 2009 年的哥本哈根气候大会之前, 中国就制定了到 2020 年单位 GDP 碳排放较 2005 年降低 40%~45% 的目标. 在“十二五”规划纲要中又提出了具体的减排目标, 在规划期内要使单位 GDP 能耗降低 16%, 碳排放强度降低 17%. 然而, 如何实现减排承诺, 是政府间国际谈判的关键所在.

IPCC 的综合评估报告认为, 化石燃料的使用是造成人为温室气体排放、导致全球气候变暖的主要原因<sup>[1]</sup>. 中国科技部副部长刘燕华<sup>[2]</sup>, 就曾

根据我国国家发展规划与科技研发进展, 提出了应对持续增加的 CO<sub>2</sub> 减排压力的八条途径. 其中指出, 改善能源结构调整成为我国减排 CO<sub>2</sub> 的最理想的途径. 田立新和张蓓蓓<sup>[3]</sup> 基于费雪指数法, 郭朝先<sup>[4]</sup> 基于 SDA 分解法得出能源消费是碳排放的主要来源, 如果以煤为主的能源结构未发生根本性的变化, 中国的碳排放将难以得到抑制.

可以发现, 改善能源结构是我国减少二氧化碳最理想的途径. 因此, 本文重点研究能源结构变化对于气候减排的作用与影响. 意在寻求碳排放控制约束下我国能源结构的演化趋势以及各能源技术发展对减排的贡献.

对于能源和气候减排政策的研究, 按照建模方法, 可以大致分为以传统经济学模型为基础, 集

① 收稿日期: 2013-09-18; 修订日期: 2014-03-14.

基金项目: 国家基础研究(973 计划)资助项目(2012CB955804); 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA05150500); 国家自然科学基金资助项目(41201594).

通讯作者: 王铮(1954-), 男, 云南陆良人, 研究员, 博士生导师. Email: wangzheng@mail.casipm.ac.cn

中表现经济与能源消费以及向气候模型延伸的自顶向下模型(top-down)、以工程技术模型为出发点,对能源消费及生产过程中所使用的技术为基础并向气候环境演化的自下而上模型(bottom-up)和将这两类模型信息进行耦合和互补的混合能源模型(hybrid model)。

自顶向下模型从传统经济理论出发,以国民生产部门为基础,善于考察人口、资源与宏观经济之间的关系,尤其适用于宏观经济政策、气候政策以及能源规划方面的研究。其中以可计算一般均衡模型(CGE)为典型代表,这种模型是以瓦尔拉斯一般均衡理论为基础,着重描述经济系统中各部门的行为特征,将能源产品当成与资本、劳动一样的生产要素来处理<sup>[5,6]</sup>。Weyant<sup>[7]</sup>将温室气体排放模块引入到传统CGE模型中,使之具备了研究气候政策下碳排放预测、排放限值对经济系统影响等气候相关问题的能力。然而这一类模型对能源部门的描述相对简化,无法细致考虑多种能源技术的各自发展特征以及相互替代行为,无法解释减排是通过哪些技术实现,是该种模型的一种缺陷。

另一类模型,例如国际上的MARKAL、MES-SAGE、EFOM、MEDEE、LEAP<sup>[8-13]</sup>等都属于自下而上的技术经济优化模型,这一类模型通常基于多目标规划的运筹方法,从而实现能源供给和需求预测,可以充分反映各能源相关部门现有的技术水平及未来技术的选择,了解技术进步对未来能源和环境排放的影响,但对于经济系统刻画则显得不足。

可以发现自顶向下模型和自下而上模型各有优势和不足,在模型构架上具有一定程度的互补性,混合能源模型则是将这两种结构的模型对接起来,从而达到这两种模型的信息共享和融合,兼顾了模型的宏观经济信息和微观技术信息,使得模型更加可靠。

国内方面,对于气候减排,中国的学者拓展了不少的能源模型,特别是自顶向下模型。朱永彬和王铮<sup>[14]</sup>建立的最优经济增长模型,能平衡能源消费与经济增长,从宏观的角度在平稳轨道上预测能源消费,但却缺少能源技术的扩展。沈可挺等<sup>[15]</sup>、庞军和邹骥<sup>[16]</sup>、周晟吕等<sup>[17]</sup>、石敏俊等<sup>[18]</sup>应用CGE模型研究了碳税对于能源结构及减排

的影响。虽然划分出能源部门,但对能源技术进步的表现依然欠缺,且采用的动态递归的机制相对简单,并不适合做长期的动态模拟。另一方面,陈文颖等<sup>[19]</sup>虽然建立了中国的MARKAL-MACRO混合模型,可惜的是宏观经济模块中,经济产出只是简单的外推。中国能源环境综合政策评价模型(IPAC)其中包括能源与排放模型、环境模型和影响模型三个部分且各模型间有较好的反馈机制,然而不得不说的是在将模型进行了细化和扩展后,更多的技术信息反映在模型中,也因此会导致模型参数数量的大幅上升,使得模型的稳态结果需要花费很长时间得到,甚至无法获得稳态结果<sup>[20]</sup>。因此,本文以能源供需均衡为连接,建立最优经济增长模型与动态能源优化模型的耦合模型,保证经济增长与能源投入之间的动力学机制,综合考虑各能源技术间的替代作用与技术成本对能源演化的影响,并以此寻求在最优平稳增长路径下,成本最小的能源结构演化路径以及减排目标下的我国能源结构的演化趋势。

## 1 模型与数据

### 1.1 模型

#### 1.1.1 能源消费模块

对于能源消费模块,采用朱永彬和王铮<sup>[14]</sup>的经济动力学模型。该模型确定了在保持经济平稳增长时,由能源强度确定的能使社会福利达到最大的增长率。“平稳”维持了经济增长与消费增长平衡,从而不会因为需求不足或需求过大引起经济危机。

其生产函数是将能源、资本、劳动力三种生产要素一起引入的

$$Y(t) = A_0 e^{vt} K(t)^\alpha E(t)^{1-\alpha} L(t)^\gamma, \quad (1)$$

$$0 < \alpha < 1$$

式中 $Y$ 为经济总产出, $E$ 、 $K$ 和 $L$ 分别为能源投入、资本投入和劳动力投入。 $A_0$ 为初始全要素生产率水平, $v$ 为全要素生产率的年增长速度,反映技术进步促进生产效率的提高, $\alpha$ 与 $\gamma$ 分别为资本和劳动力的产出弹性。

能源强度 $\tau$ 为生产一单位经济产出所需要投入的能量,即能源投入 $E$ 与经济产出 $Y$ 的比

$$\tau(t) = \frac{E(t)}{Y(t)} \quad (2)$$

在保持经济与人口平衡的平稳增长轨道上,拉姆齐(Ramsey)效用最大化时可以求出最优增长率  $g$  [20].

$$g(t) = \left( n - \frac{\rho + \delta}{\sigma} \right) + \frac{1}{\sigma} \left[ [1 - \theta(t) \tau(t)] \times \left( A_0 \exp(\nu t) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \tau(t)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} L(t)^{\frac{\alpha}{\alpha}} \right] \quad (3)$$

由能源强度  $\tau$  及最优增长率  $g$  确定的产出  $Y$  再反推能源消费量  $E$ .

### 1.1.2 能源供给模块

对于本文所构建的能源供给模型主要技术途径是以能源系统的总成本最小化为目标的优化模型,对不同能源供应及利用的经济成本(包括投资成本和运行成本)经过贴现后进行对比,以系统总成本最小的组合作为模型的优化解. 最终选

择是使得所选择的技术组合将整个能源供应系统在满足能源需求的前提下成本最小,因此,重点关注的是不同能源技术的替代性及成本变化.

因替代弹性参数能较好地反映能源技术之间的相互替代关系. 因此本文对于各能源技术间采用常替代弹性函数(CES)进行复合,来刻画各能源技术之间的相互替代作用 [21].

对于具体的能源生产技术,采用两层嵌套形式. 首先,以煤炭、石油、天然气作为非电力能源投入,考虑到不同的化石能源间存在着一定的替代弹性,这里采用 CES 的函数形式进行复合;同样地,利用 CES 函数,将燃煤发电、燃油发电、燃气发电、核电、风能发电、水电及太阳能发电复合为电力能源. 最后,对非电力能源及电力能源投入进行 CES 加成,得到总能源,如图 1 的能源结构图所示.

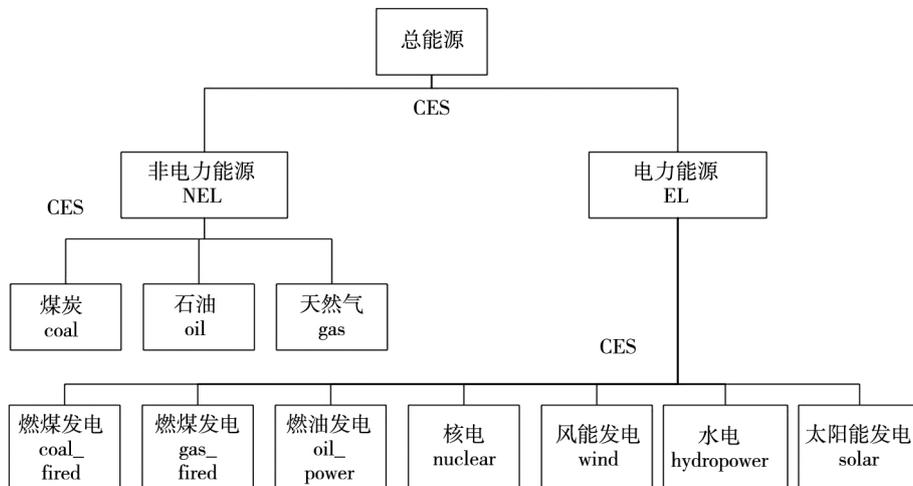


图 1 能源结构复合图<sup>②</sup>

Fig. 1 Layer structure of energy technology in the energy sector

其中,各能源复合形式可表示为

$$E_{EN} = A_{EN} \cdot \left( \lambda_{EL} E_{EL}^{\rho_{EN}} + \lambda_{NEL} E_{NEL}^{\rho_{EN}} \right)^{\frac{1}{\rho_{EN}}}, \quad \lambda_{EL} + \lambda_{NEL} = 1 \quad (4)$$

$$E_{EL} = A_{EL} \cdot \left( \sum_j \lambda_{ELj} E_{ELj}^{\rho_{EL}} \right)^{\frac{1}{\rho_{EL}}}, \quad \sum_j \lambda_{ELj} = 1 \quad (5)$$

这里,  $j = \text{coal\_fired}, \text{gas\_fired}, \text{oil\_power}, \text{nuclear}, \text{wind}, \text{hydropower}, \text{solar}$ .

$$E_{NEL} = A_{NEL} \cdot \left( \sum_f \lambda_{NELf} E_{NELf}^{\rho_{NEL}} \right)^{\frac{1}{\rho_{NEL}}}$$

$$\sum_f \lambda = 1, f = \text{coal oil gas} \quad (6)$$

式(4)中,  $E_{EN}$  为总能源供给量,  $E_{EL}$  为电力能源供给量,  $E_{NEL}$  为非电力能源供给量,  $A_{EN}$ 、 $\lambda_{EL}$  和  $\lambda_{NEL}$  分别代表规模系数以及电力能源、非电力能源的份额参数.  $\rho_{EN}$  为非电力能源及电力能源间的替代弹性参数(替代弹性为  $\frac{1}{1 - \rho_{EN}}$ ). 式(5)中的各电力技术分别代表燃煤发电、燃气发电、燃油发电、核电、风能发电、水电以及太阳能发电. 式(6)中的非电力能源分

② 因 CCS 技术尚不成熟,此文暂不考虑 CCS 技术.

别为煤、石油、天然气。

首先考虑化石能源技术的演化,关于化石燃料价格,本文所采用的观点为 Nordhaus<sup>[22]</sup>的观点,认为化石能源作为可耗资源,其总量是一定的,并且随着逐年消耗,其成本会不断上升,因而,对于化石能源成本  $P_j(t)$  的演化,如式(7)~(9)所示。

$$P_j(t) = \chi_j(t) + \pi_j [Q_j(t-1) / \bar{Q}_j(t)]^{\psi_j} \quad (7)$$

$$Q_j(t-1) = Q_j(0) + \sum_0^{t-1} X_j(t) \quad (8)$$

$$\bar{Q}_j(t+1) = (1 + \eta) \bar{Q}_j(t) - Q_j(t) \quad (9)$$

在式(7)~(9)中:  $\chi_j$  表示除燃料成本之外的所有其他成本,包括:交通成本、分配成本以及能源税收成本等,并假设这些外部成本是不随时间变化的常数。 $\pi_j$ 、 $\psi_j$  为弹性参数;  $Q_j$  及  $\bar{Q}_j$  分别表示累积开采量及剩余储量。 $X_j$  为化石能源消费量。外生参数  $\eta$  为剩余储量的变动率。

对于每一种电力技术  $E_{ELj}$ , 电力生产需要 3 种要素投入的固定结合: 1) 装机容量  $KD$  2) 运行维护费  $O\&M$  3) 燃料的消耗  $X$ 。由于这三种投入之间无法进行替代,因此需采用 Leontief 形式复合

$$E_{ELj}(t) = \min\{\mu_j KD_j(t); \tau_j O\&M_j(t); \xi_j X_j(t)\} \quad (10)$$

式中,为了考察这三种投入对电力生产的影响,加入技术进步参数  $\mu_j$ 、 $\tau_j$  及  $\xi_j$ 。 $\mu_j$  即为设备利用效率 (TW 转为 TWh),此参数考虑了诸如风能发电及太阳能发电相对较低的设备利用效率。 $\tau_j$  的意义在于区别了每单位电能需要的运行维护费用,诸如核能产生运行维护费用相对很高。 $\xi_j$  代表生产每单位电能所需的化石能源燃料量,即将燃料转化为电能的效率,对于核电、水电、风能发电及太阳能发电不存在化石燃料消耗。

因此,对于电力能源总成本  $C_{ELtot}$  是由装机投资  $C_I$ 、运行维护费用  $C_{OM}$  及电力生产对应所需的化石燃料成本  $C_F$  三项构成。如式(11)所示

$$C_{ELtot} = C_I + C_{OM} + C_F \quad (11)$$

$$C_I = \sum_j I_j, C_{OM} = \sum_j OM_j, C_F = \sum_j P_j \cdot X_j$$

$C_F$  中,  $j = \text{coal\_fired gas\_fired oil\_power}$  学习是技术进步的内在驱动力<sup>[23]</sup>。因此,本

文的技术成本是通过学习曲线将内生技术变化引入。对于发电技术  $j$ ,他所对应的装机成本  $SC$  可以表示为

$$SC_j(t) = B_j KD_j(t)^{\ln 2 PR_j} \quad (12)$$

其中  $PR_j$  为进步率 (progress rate),即用来鉴定技术学习和进步成就的百分率。也就是累积装机容量翻倍时成本的下降幅度,  $B_j$  可理解为  $j$  技术初始的装机成本。装机容量的累积过程可以表示为

$$KD_j(t+1) = KD_j(t)(1 - \delta_j) + \frac{I_j(t)}{SC_j(t)} \quad (13)$$

式(13)中,  $\delta_j$  为装机折旧率,此处装机投资  $I_j(t)$  根据边际装机容量产出做最优投资选择。

由此总能源供给成本为

$$C_{tot} = \sum_j (P_{fj} X_{fj}) + \sum_j (OM_{j} + I_{j}) \quad (14)$$

其中  $X_j$  为一次化石能源消费总量。

考虑碳排放总量控制及能源供需约束

$$\text{s. t. } \begin{cases} E_{EN} \geq \bar{E}_{EN} \\ \sum_{fj} \kappa_j X_{fj} \leq \bar{E}_m \end{cases} \quad (15)$$

$E_{EN}$  为能源总供给量,  $\bar{E}_{EN}$  为能源总需求量。碳排放主要来源是化石能源的使用,设  $\kappa_j$  为化石能源碳排放系数,也就是单位化石燃料产生的碳排放量,  $\sum_{fj} \kappa_j X_{fj}$  即累积碳排放量,  $\bar{E}_m$  为碳排放控制总量,由外生给定。

考虑折现率  $r$ ,在此条件下可得到最小能源总供给成本<sup>③</sup>。

$$\min C = \sum_{t_1}^{t_2} C_{tot}(t) \cdot (1 + r)^{(1-t)} \quad (16)$$

## 1.2 数据来源

本文所采用的化石能源数据主要来源为中国统计年鉴和中国能源统计年鉴、GTAP 数据库以及 EIA 官网。电力能源数据来源于电力统计年报数据一览表以及 IEA、NEA 数据<sup>[24]</sup>。

## 2 模拟结果与分析

由式(3)得到最优平稳增长下的 GDP 增长率,能源强度由历史数据指数拟合得出。再由式

③ 本文中,  $t_1$  取 2010 年,  $t_2$  取 2050 年。

(2) 可以得到能源消费量  $E_t$ , 其累积值即为式 (15) 中总能源需求量  $\bar{E}_{EN}$ . 由此可以得到在保证经济最优平稳增长状态下的满足能源消费成

本最优的动态能源结构演化趋势及碳排放趋势.

对于具体模型流程图, 如图 2 所示.

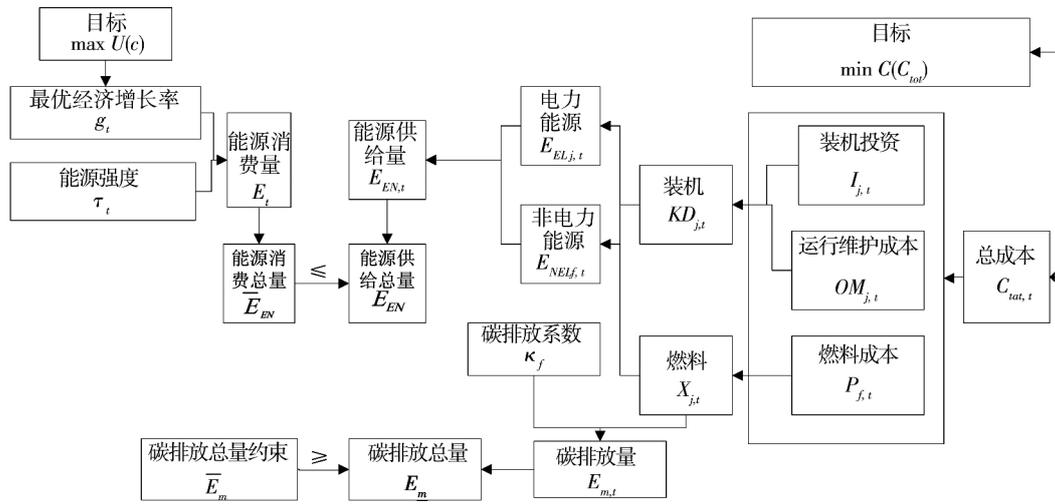


图 2 能源优化模型流程图

Fig. 2 Model diagram of the optimization of energy mix

### 2.1 无碳排放约束情景

在经济最优平稳增长下获得能源消费量后,

由动态能源优化模型得到能源经济成本最小下的碳排放情景. 由图 3 所示.

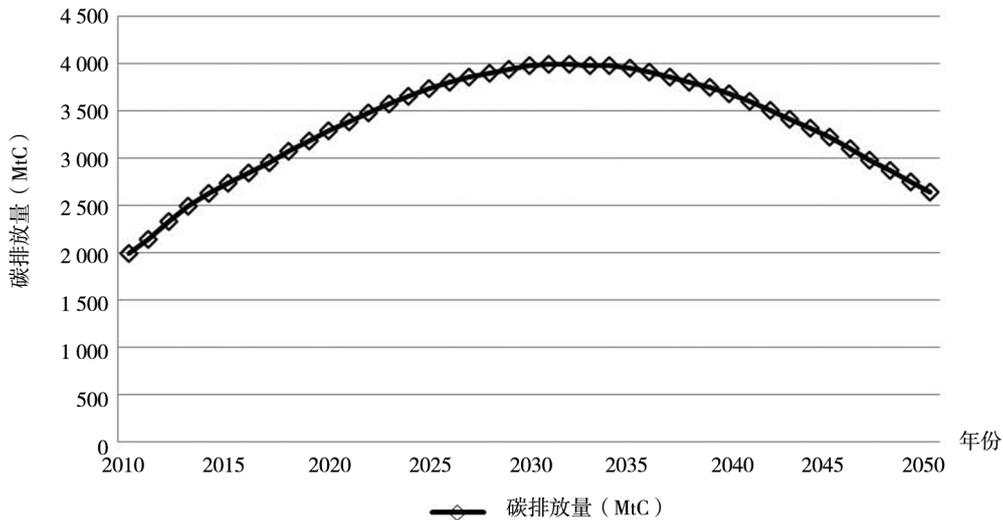


图 3 平稳路径上最优成本下(黄金增长路径)的中国碳排放量

Fig. 3 Carbon emission pathway in China under the cost effective and balance growth condition

由图 3 可以看出在成本最优的目标下, 中国产生碳排放量较大, 2010 年至 2050 年碳排放总量为 139 262.7MtC, 碳高峰发生在 2032 年, 峰值为 3 990.48MtC, 约为 2010 年 1 990.39MtC 的两倍, 这个值相比于人均排放权均等原则下 2008 年 2050 年获得的 500ppm 浓度碳排放配额<sup>[25]</sup> 要高出很多. 与王铮, 朱永彬<sup>[20]</sup> 的碳峰值 2 637 MtC 相比, 相差也

较大. 这是因为在能源成本最小的条件下, 中国将大量使用煤造成的. 可见, 若单纯从经济利益上考虑, 按成本最优的能源结构发展, 势必会对气候及环境造成严重影响, 难以完成减排目标.

碳排放的产生主要是由于化石能源的使用所得, 在最优成本下获得的 2010 年 2050 年的化石能源结构如表 1 所示.

表 1 无碳排放约束下中国化石能源结构的演化趋势

|      | 非电力     |       |       | 电力      |       |       | 化石能源总量  |
|------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|
|      | 煤       | 天然气   | 石油    | 煤       | 天然气   | 石油    |         |
| 2010 | 1 046.9 | 86.1  | 217.5 | 856.6   | 18.7  | 9.0   | 2 234.9 |
|      | 46.84%  | 3.85% | 9.73% | 38.33%  | 0.84% | 0.40% |         |
| 2020 | 1 656.9 | 95.2  | 232.0 | 1 355.6 | 27.1  | 13.0  | 3 379.8 |
|      | 49.02%  | 2.82% | 6.86% | 40.11%  | 0.80% | 0.39% |         |
| 2030 | 2 029.2 | 95.3  | 228.6 | 1 660.2 | 40.8  | 19.1  | 4 073.2 |
|      | 49.82%  | 2.34% | 5.61% | 40.76%  | 1.00% | 0.47% |         |
| 2040 | 1 892.5 | 71.3  | 173.7 | 1 548.4 | 49.9  | 22.9  | 3 758.8 |
|      | 50.35%  | 1.90% | 4.62% | 41.20%  | 1.33% | 0.61% |         |
| 2050 | 1 360.5 | 46.2  | 115.9 | 1 113.1 | 39.4  | 18.0  | 2 693.0 |
|      | 50.52%  | 1.71% | 4.30% | 41.33%  | 1.46% | 0.67% |         |

从表 1 可以看出从化石能源角度来看煤炭在三种化石能源中的使用仍是占主导地位。非电力能源中的使用如此(供热等),在火电中亦是主要的发电燃料。2010 年,煤炭在非电力能源中的供给占化石能源总量的 46.84%,用于火电发电占化石能源总量的 38.33%。各化石能源在非电力及电力上的供给都呈现一种倒 U 型的趋势。其中煤炭在非电力中的使用高峰为 2032 年的 2 039.7Mtoe,用于火电发电的煤炭高峰同时发生在 2032 年,峰值为 1 668.8Mtoe。而石油、天然气在非电力能源中的使用的高峰相对较早,高峰都发生在 2025 年,其峰值分别为 240.3Mtoe、99.9Mtoe。产生这样的结果主要还是由于煤炭作为中国的主要能源资

源,价格要比石油、天然气等低廉,且我国石油和天然气相对稀缺的原因造成的。

将电力能源技术进步以学习曲线的形式考虑进来,各电力技术的装机成本均有下降,而其中又以水电装机成本下降得最为明显,可以算得从 2010 年的 2.93cUSD/KWh(美分/千瓦时)下降到 2050 年的 2.49cUSD/KWh。而对于燃料成本而言,因资源的有限性,燃料成本的上升是迅速的。2010 年煤电、气电、油电的燃料成本分别为 1.3cUSD/kWh、2.5cUSD/kWh、5.8cUSD/kWh,至 2050 年则分别上升了 5 倍、4.4 倍以及 4.5 倍。装机成本及燃料成本的变动也因此导致了电力结构的演变趋势,对于具体的电力结构演化如表 2 所示。

表 2 无碳排放约束下的电力结构演化趋势

|      | 煤电       | 气电      | 油电    | 核电      | 风电      | 水电       | 太阳能发电 | 总发电量      |
|------|----------|---------|-------|---------|---------|----------|-------|-----------|
| 2010 | 28 506.1 | 786.2   | 167.4 | 796.2   | 446.3   | 5 296.3  | 8.7   | 36 007.21 |
|      | 79.17%   | 2.18%   | 0.46% | 2.21%   | 1.24%   | 14.71%   | 0.02% |           |
| 2020 | 50 139.6 | 1 488.5 | 405.1 | 1 305.5 | 585.5   | 6 177.8  | 16.8  | 60 118.8  |
|      | 83.40%   | 2.48%   | 0.67% | 2.17%   | 0.97%   | 10.28%   | 0.03% |           |
| 2030 | 61 407.1 | 2 236.5 | 593.7 | 2 229.4 | 1 009.1 | 10 581.0 | 28.9  | 78 085.64 |
|      | 78.64%   | 2.86%   | 0.76% | 2.86%   | 1.29%   | 13.55%   | 0.04% |           |
| 2040 | 57 271.7 | 2 735.4 | 711.7 | 4 010.0 | 1 840.5 | 19 099.4 | 52.6  | 85 721.37 |
|      | 66.81%   | 3.19%   | 0.83% | 4.68%   | 2.15%   | 22.28%   | 0.06% |           |
| 2050 | 41 169.7 | 2 158.3 | 560.7 | 6 656.6 | 4 540.0 | 30 159.4 | 79.5  | 85 324.32 |
|      | 48.25%   | 2.53%   | 0.66% | 7.80%   | 5.32%   | 35.35%   | 0.09% |           |

从电力构成来看,总电力能源呈现的是一种近乎幂函数的增长方式,但是 2045 年达到峰值随后略有回落。煤电仍是未来主要的发电方式。2020 年煤电占总电力能源占比达到 83% 以上,

2032 年煤电发电量达到峰值为 61 724.0 亿千瓦时。随后,因各发电技术存在技术进步,发电成本减少,其他电力能源代替了部分煤电,在 2050 年回落至 41 169.7 亿千瓦时。同样地,由于资源稀

缺性,油电及气电发电量也是呈现一个高峰值后又逐渐回落的过程,其峰值都发生在2040年.总的来说,火电的各年发电量的变化率变化不大.由于火力发电存在着化石能源的消耗,并且由于化石能源的价格上升,发电成本也随之上升的事实,又对于核电、风电、水电及太阳能发电,这些发电技术存在经验学习带来技术进步,且本身的装机容量成本和煤电相比处于初期阶段因而装机容量增

加,发电成本下降较为容易,因此,这些电力能源的发电量都是一个逐年上升的过程.水电在2050年的占比达到35.35%,核电7.80%,这也致使煤电占比在2050年下降至48.25%.

化石能源价格影响着能源供给结构的选择,同样,能源供给的选择也影响着能源价格.由式(7)算得均衡状态下的煤、石油、天然气价格可以发现各能源价格都是一上升的过程,结果如图4所示.

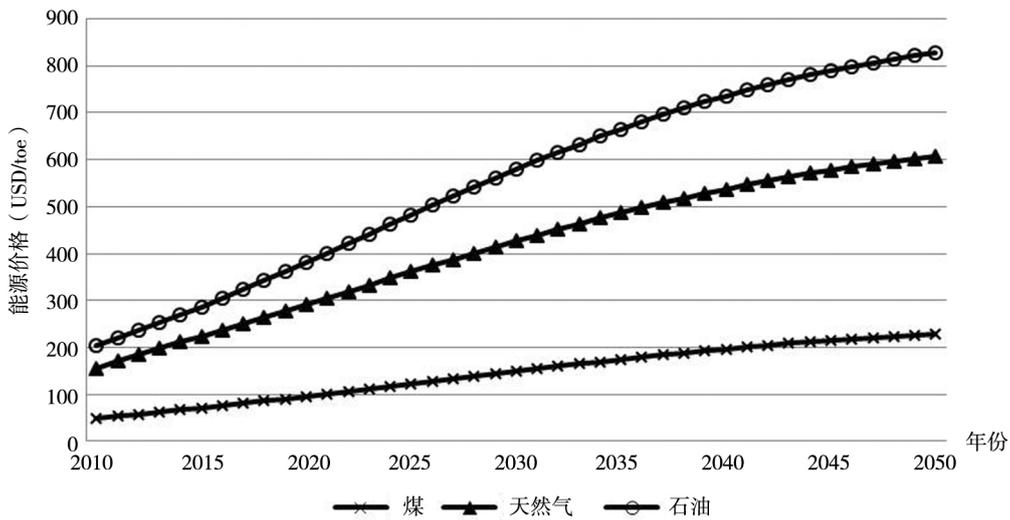


图4 无碳排放约束下中国化石能源价格趋势

Fig. 4 Price trend of fossil energy without constraint of emission budget

从图4中可以看出,我国煤炭价格本身较低,这使得我国的能源结构仍以煤炭供给为主.随煤炭的累积开采增加,到2050年的煤炭价格将是2010年的4.6倍,由49.5美元/toe上升到229.4美元/toe.石油、天然气价格分别将由2010年的203.2美元/toe、138.2美元/toe上升到2050年的828.6美元/toe、608.2美元/toe.虽然价格相比与煤炭仍高出很多,但自身的上升比例要比煤炭价格上升幅度小,2050年分别为2010年的3.9倍与4.0倍.

### 2.2 碳排放总量控制情景

考虑低碳发展要求的因素,本文进行了碳排放总量减排控制目标的设置.国际上,虽然很多国家提出了终期减排目标的方案,如澳大利亚承诺到2020年将在2000年的排放水平上减少5%~15%;日本宣布到2020年将比1990年的排放水平减少25%;美国宣布到2020年将比2005

年的排放水平减少17%等<sup>[27]</sup>的终期减排目标,但终期排放约束作为控制目标会造成突击完成目标的现象,因此本文选择碳排放总量控制作为减排目标.此目标的设置可以避免发生某些类型的风险,并针对目标来寻找最具成效性的排放时间路径.根据我国的自身实际情况,本文设定了在无碳排放约束下总量减少10%及20%的目标,并得出中国减排情况下的总能源供给成本及能源结构演化趋势.

在设置总量减排10%、总量减排20%的约束后,每年的碳排放趋势如图5所示.从图5可以看出,即使我国不实行碳排放控制,我国的经济碳排放过程也满足环境库茨涅茨曲线,这是经济发展与技术进步的必然过程.如果我国实现强制性的总量减排,排放的峰值点只可能稍有提前,这也是经济增长与技术进步速度锁定的,应该引起重视.

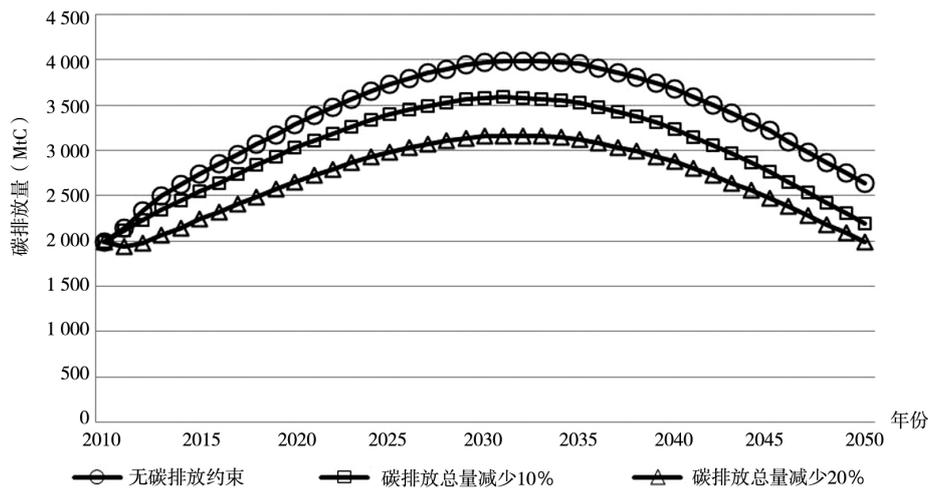


图 5 碳排放总量控制下的排放趋势

Fig. 5 Carbon emission pathway in China with the constraint of emission budgets

从图 5 可以看出,控制碳排放总量减少 10%、20% 后,碳高峰都是比无排放约束时提前 1 年,发生在 2031 年。可见控制总量减排不能很大程度上改善碳高峰的提前发生,碳高峰的出现还是由能源需求高峰决定。但碳峰值有了明显的下降,总量减排 20% 的情景下,峰值为 3 164.87MtC,较不减排情景的峰值减少 825.62MtC。若控制总量减排,可以发现每年的减排率呈现出逐年增加的趋势。总量减排 10% 及 20% 时,2050 年碳排量相比于无减排约束情景分别减少 16.85% 和 24.59%。同时 2010 年—2050 年总能源成本将由不减排时的 11.5 万亿美元分别上升到 12.4 万亿美元和 15.4 万亿美元。

碳排放总量控制后,能源结构也发生着相应的变化,表 3 和表 4 分别为碳排放总量约束下的化石能源结构演化与电力能源的结构演化趋势。

因碳排放总量控制约束的存在,从表 3 可以看出化石能源供给总量也相应比无约束下的有所减少,由不减排时的 142 767.46Mtoe 分别减少 8.4%、15.8%。作为二氧化碳的主要来源,煤炭相比于无碳排放约束情景,不仅供给总量减少,且在非电力能源中的使用高峰将提前两年发生。2050 年的煤炭在全部化石能源中的占比由不减排时的 91.8% 下降至 63.6%。因煤炭占比的减少,带动了非电力能源中石油、天然气等作为替代能源的增加,若总量减排 20% 时,2050 年天然气、石油将分别上升至 219Mtoe 及 535.9Mtoe。分别是无碳排放约束情景下的 4.7 倍和 4.6 倍。这样

的增长结果也同时造成了这两项能源价格上升迅速,这也是电力能源中,煤炭使用的减排并不由气电及油电代替的原因。

表 4 所示的电力结构中,由于减排的需求,初年的电力投资将会有所增加,不减排时,2010 年的电力投资额为 767.9 亿美元。总量减排 10% 时,增加到 865.1 亿美元,若总量减排 20%,初年的电力投资额为 1 007.8 亿美元。可见,若要实现减排,需初年加大对电力的投资。虽然煤炭发电量仍是呈现一个倒 U 型的趋势,但煤电占比呈现的一直是一下降的过程,并且下降速度逐年增大。总量减排 10% 的情景下,2030 年煤电占比为 71.42%,2050 年煤电占比减至 36.63%。若减排 20%,2050 年的煤电占比将仅为 27.28%。通过模拟还可以发现总量减排约束下气电和油电的发电量占比无约束情景下相比基本无差别,占比变动都小于 0.1%。这与我国石油、天然气资源供应受到资源限制也是相符的。由于非电力能源中石油天然气的使用增加,能源价格也相应上升,从而促使其替代能源的发展,特别是水电,占比将明显增加,并将超越煤电成为发电量第一的发电技术。核电也将得到较快的发展,减排的约束条件下,2050 年的占比将达到 10% 左右。其他可再生能源发电技术也有相应增加。可见,对于碳减排,减少煤炭发电,加快核电、水电发展,发展新能源是必不可少的。

由于总量减排的约束,能源价格也发生着相应的变化,各能源价格的变化趋势如图 6 所示。

表 3 总量减排约束下中国化石能源结构的演化趋势  
Table 3 Fossil energy mix trend with the constraint of emission budgets ( Mtoe)

|      |          | 非电力               |                |                 | 电力                |               |               | 化石能源总量  |
|------|----------|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|---------------|---------------|---------|
|      |          | 煤                 | 天然气            | 石油              | 煤                 | 天然气           | 石油            |         |
| 2010 | 总量减排 10% | 942.0<br>45.04%   | 104.5<br>5.00% | 254.4<br>12.17% | 770.7<br>36.85%   | 14.3<br>0.69% | 5.4<br>0.26%  | 2 091.3 |
|      | 总量减排 20% | 942.0<br>45.01%   | 109.4<br>5.23% | 250.9<br>11.99% | 770.7<br>36.83%   | 14.3<br>0.69% | 5.4<br>0.26%  | 2 092.7 |
| 2020 | 总量减排 10% | 1 485.1<br>47.25% | 118.3<br>3.76% | 276.7<br>8.80%  | 1215.1<br>38.66%  | 32.5<br>1.03% | 15.3<br>0.49% | 3 142.9 |
|      | 总量减排 20% | 1 201.0<br>42.33% | 185.8<br>6.55% | 410.8<br>14.48% | 982.6<br>34.63%   | 39.1<br>1.38% | 18.0<br>0.64% | 2 837.3 |
| 2030 | 总量减排 10% | 1 755.7<br>47.10% | 142.1<br>3.81% | 322.6<br>8.66%  | 1 436.5<br>38.54% | 48.2<br>1.29% | 22.2<br>0.60% | 3 727.3 |
|      | 总量减排 20% | 1 404.7<br>41.37% | 241.2<br>7.10% | 522.4<br>15.39% | 1 149.3<br>33.85% | 53.5<br>1.58% | 24.2<br>0.71% | 3 395.3 |
| 2040 | 总量减排 10% | 1 560.3<br>46.09% | 143.9<br>4.25% | 326.3<br>9.64%  | 1 276.6<br>37.71% | 53.9<br>1.59% | 24.4<br>0.72% | 3 385.3 |
|      | 总量减排 20% | 1 221.2<br>38.97% | 260.1<br>8.30% | 576.4<br>18.40% | 999.2<br>31.89%   | 52.8<br>1.69% | 23.8<br>0.76% | 3 133.5 |
| 2050 | 总量减排 10% | 1 006.1<br>43.12% | 131.6<br>5.64% | 314.9<br>13.50% | 823.2<br>35.28%   | 39.5<br>1.69% | 18.0<br>0.77% | 2 333.4 |
|      | 总量减排 20% | 775.3<br>34.96%   | 219.0<br>9.88% | 535.9<br>24.16% | 634.4<br>28.60%   | 36.6<br>1.65% | 16.6<br>0.75% | 2 217.9 |

表 4 总量减排约束下的电力结构演化趋势  
Table 4 Electricity energy mix trend with the constraint of emission budgets ( 亿千瓦时)

|      |          | 煤电                 | 气电               | 油电             | 核电                | 风电               | 水电                 | 太阳能发电          | 总发电量     |
|------|----------|--------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|--------------------|----------------|----------|
|      |          |                    |                  |                |                   |                  |                    |                |          |
| 2010 | 总量减排 10% | 28 506.1<br>79.17% | 786.2<br>2.18%   | 167.4<br>0.46% | 796.2<br>2.21%    | 446.3<br>1.24%   | 5 296.3<br>14.71%  | 8.7<br>0.02%   | 36 007.2 |
|      | 总量减排 20% | 28 506.1<br>79.17% | 786.2<br>2.18%   | 167.4<br>0.46% | 796.2<br>2.21%    | 446.3<br>1.24%   | 5 296.3<br>14.71%  | 8.7<br>0.02%   | 36 007.2 |
| 2020 | 总量减排 10% | 44 940.8<br>78.14% | 1 780.0<br>3.09% | 476.1<br>0.83% | 1 660.7<br>2.89%  | 744.4<br>1.29%   | 7 889.9<br>13.72%  | 21.3<br>0.04%  | 57 513.3 |
|      | 总量减排 20% | 36 343.0<br>68.65% | 2 142.8<br>4.05% | 560.4<br>1.06% | 2 229.7<br>4.21%  | 1 000.7<br>1.89% | 10 631.9<br>20.08% | 28.7<br>0.05%  | 52 937.3 |
| 2030 | 总量减排 10% | 53 130.5<br>71.42% | 2 641.3<br>3.55% | 689.9<br>0.93% | 2 877.7<br>3.87%  | 1 302.0<br>1.75% | 13 716.2<br>18.44% | 37.3<br>0.05%  | 74 394.9 |
|      | 总量减排 20% | 42 508.8<br>60.58% | 2 933.9<br>4.18% | 753.2<br>1.07% | 3 834.5<br>5.46%  | 1 736.1<br>2.47% | 18 352.5<br>26.15% | 49.6<br>0.07%  | 70 168.6 |
| 2040 | 总量减排 10% | 47 218.1<br>57.48% | 2 953.3<br>3.60% | 758.7<br>0.92% | 4 993.1<br>6.08%  | 2 292.0<br>2.79% | 23 861.1<br>29.05% | 65.5<br>0.08%  | 82 141.7 |
|      | 总量减排 20% | 36 956.9<br>45.88% | 2 896.3<br>3.60% | 739.1<br>0.92% | 6 377.3<br>7.92%  | 2 936.1<br>3.65% | 30 560.1<br>37.94% | 69.71<br>0.10% | 80 535.4 |
| 2050 | 总量减排 10% | 30 447.8<br>36.63% | 2 168.3<br>2.61% | 558.3<br>0.67% | 8 016.7<br>9.64%  | 5 577.0<br>6.71% | 36 274.9<br>43.64% | 79.5<br>0.10%  | 83 122.6 |
|      | 总量减排 20% | 23 463.3<br>27.28% | 2 008.0<br>2.33% | 517.2<br>0.60% | 9 700.2<br>11.28% | 8 244.6<br>9.59% | 41 989.6<br>48.82% | 92.75<br>0.09% | 86 015.7 |

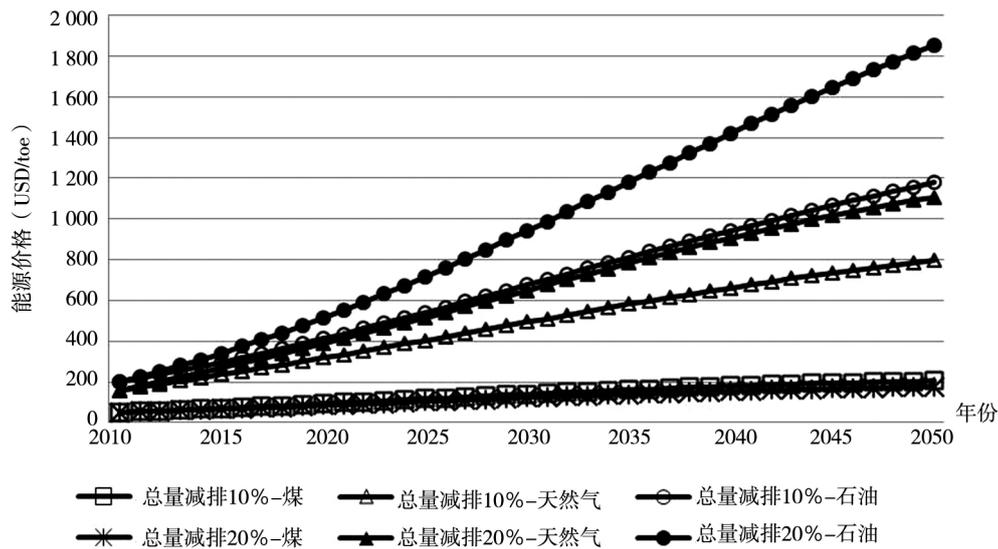


图 6 总量减排约束下中国化石能源价格趋势

Fig. 6 Price trend of fossil energy with the constraint of emission budgets

由图 6 可以发现,因煤炭的使用减少,煤炭的价格相比与不减排时要低。若总量减排 10%,到 2050 年,煤炭价格为 204.5 美元/toe,是 2010 年的 4.1 倍;总量减排 20% 时,煤炭价格为 174.8 美元/toe,是 2010 年的 3.5 倍。而在碳排放总量约束下的天然气和石油价格都要比不减排时上升不少,总量减排 10% 时分别为 2010 年的 5.1 倍及 5.8 倍。若总量减排 20%,天然气及石油的价格更是上升到 2010 年的 7.0 倍和 9.1 倍。这样的上升趋势与我国本身的能源结构特点也是相符的,由于我国石油、天然气储量有限,会导致石油、天然气能源高价格的产生。因此,若想在减排的同时控制总能源成本,能源价格如何控制是需纳入考虑的。

### 3 结束语

本文在保证经济平稳增长与能源成本最小的基础上建立了耦合的能源最优控制模型,分析了中国能源成本和能源技术发展的演化趋势,并就有无碳排放约束设置情景模拟,为政策制定者提供一些参考。

主要的研究结果如下:(1)若单纯从经济利益上考虑,按成本最优的能源结构发展,煤炭仍是中国最主要的能源供给方式,这也因此带来了较大的碳排放。(2)在保证经济平稳增长的路线下,总量减排的约束势必会造成碳峰值下降,但

对碳高峰出现的时间并没有多少提前作用。(3)在保证总能源需求量的前提下,若要实现碳减排,必须减少煤炭在能源中的占比。而天然气、石油在非电力能源中的占比增加,但在电力能源中占比基本保持不变。(4)在减排约束下,我国发展最快的电力能源为水电。(到 2050 年若要达到总量减排 10% 的目标,水电将占全部发电量的 43.64%;若要达到总量减排 20% 的目标,水电将占到全部发电量的 48.82%。)(5)化石能源价格的的增长以及其他电力技术的学习效应可以驱使非化石电力能源逐渐将取代火力发电。(6)边际减排成本随着总量减排的增加而增加。在最优平稳增长下,总量减排 10% 的边际减排成本为 40 美元/tC,总量减排 20% 的边际减排成本为 140 美元/tC。可以推断,若要实现高减排率,在不考虑 CCS 等 CDR(carbon dioxide removal) 二氧化碳去除技术的境况下,中国的边际减排成本将是非常高的,不能不说,中国以煤为主的能源资源特点也因此决定了未来有限的减排空间。这对中国来说,是一个突出的问题。

实际上经济过程可能存在波动,也可能出现不平稳情况。对于经济波动情况,经济的平稳性保障了在平衡点附近的波动的稳定性,所以本文给出的最优路线仍然是可信的。在一定情况下,经济增长不平稳,这可能意味着发生经济危机。在这种情况下,如果经济不能恢复平稳增长,将引

起经济恐慌,这时世界很可能暂时置碳减排于不顾。本文给出的最优减排路径将不确定,但经济危机问题是一个大问题。正如 IPCC 报告显示的,应对气候变化是不考虑经济危机的。如何考虑经济危机下的减排策略,需要经济科学对经济危机理论的突破。本文暂不讨论这个问题。

#### 参考文献:

- [1]IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers [OL]. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html), 2007-5.
- [2]刘燕华,葛全胜,何凡能,等. 应对国际 CO<sub>2</sub> 减排压力的途径及我国减排潜力分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 675-682.  
Liu Yanhua, Ge Quansheng, He fanneng, et al. Countermeasures against international pressure of reducing CO<sub>2</sub> emissions and analysis on China's potential of CO<sub>2</sub> emission reduction[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 675-682. (in Chinese)
- [3]田立新,张蓓蓓. 中国碳排放变动的因素分解分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2011, 21(11): 1-7.  
Tian Lixin, Zhang Beibei. Factor decomposition analysis of carbon emissions change in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(11): 1-7. (in Chinese)
- [4]郭朝先. 中国二氧化碳碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术[J]. 中国工业经济, 2010, 273(12): 47-56.  
Guo Chaoxian. An analysis of the increase of CO<sub>2</sub> emission in China based on SDA technique[J]. China Industrial Economic, 2010, 273(12): 47-56. (in Chinese)
- [5]Scarf H E, Hansen T. The Computation of Economic Equilibria[M]. New Haven and London: Yale Univeristy Press, 1973.
- [6]X Xie J, Saltzman S. Environmental policy analysis: An environmental computable general-equilibrium approach for developing countries[J]. Journal of Policy Modeling, 1996, 22(4): 453-489.
- [7]Weyant J. Genral economic equilibrium as a unifying concept in energy economic modeling[J]. Manegement Science, 1985, 31(5): 549-563.
- [8]Manne A S. ETA-MACRO: A model for energy technology assessment[J]. Journal of Economics, 1976, 7: 379-406.
- [9]Manne A S, Mendelsohn R, Richels R G. MERGE: A model for evaluatting regiona and global effects of GHG reduction policies[J]. Energy Policy, 1995, 23: 17-34.
- [10]Messener S, Schrattenholzer L. MESSAGE-MACRO: Linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively[J]. Energy, 2000, 25: 267-282.
- [11]Nakicenovic N A, Grubler A, McDonald A. Golbal Energy Perspectives [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [12]ETSAP. The Energy Technology System Analysis Programme (ETSAP) of IEA [OL]. <http://www.iea-etsap.org/web/reports/markal.html>, 2013-8-12.
- [13]SEL. Long range Energy Alternatives Planning System-A Tool for Energy Policy Analysis and Climate Change Mitigation assessment [OL]. <http://www/sej-us.org/leap>, 2012-9-25.
- [14]朱永彬,王 铮,庞 丽,等. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 935-944.  
Zhu Yongbin, Wang Zheng, Pang Li, et al. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(8): 935-944. (in Chinese)
- [15]沈可挺,徐嵩龄,贺菊煌. 中国实施 CDM 项目的 CO<sub>2</sub> 减排资源: 一种经济-技术-能源-环境条件下 CGE 模型的评估[J]. 中国软科学, 2002, (7): 109-114.  
Shen Keting, Xu Songling, He Juhuang. China's CO<sub>2</sub> emission reduction resulting from CDM implementation: A CGE based evaluation under certain economy-technique-energy-environment condition[J]. China Soft Science, 2002, (7): 109-114. (in Chinese)
- [16]庞 军,邹 驥. 可计算一般均衡模型与环境政策分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2005, (1): 59-63.  
Pang Jun, Zou Ji. Computable general equilibrium (CGE) models and environmental policies analysis [J]. China Population, Resources and Environment, 2005, (1): 59-63. (in Chinese)
- [17]周晟吕,石敏俊,李 娜,等. 碳税对于发展非化石能源的作用——基于能源-环境-经济模型的分析[J]. 自然资源学报, 2012, (7): 1101-1111.

- Zhou Shenglv , Shi Minjun , Li Na , et al. The impact of carbon tax on non-fossil energy development: Based on the analysis of energy-environment-economic model [J]. *Journal of Natural Resources* , 2012 , ( 7 ) : 1101 - 1111. ( in Chinese)
- [18] 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 Shenglv , 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)
- [19] 陈文颖, 高鹏飞, 何建坤. 用 MARKAL-MACRO 模型研究碳减排对中国能源系统的影响 [J]. *清华大学学报: 自然科学版* , 2004 , 44( 3 ) : 342 - 346.
- Chen Wenyong , Gao Pengfei , He Jiankun. Impact of carbon mitigation on China's energy system using China MARKAL-MACRO model [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology* , 2004 , 44( 3 ) : 342 - 346. ( in Chinese)
- [20] 王 铮, 朱永彬, 刘昌新, 等. 最优增长路径下的中国碳排放估计 [J]. *地理学报* , 2010 , 65( 12 ) : 1559 - 1568.
- Wang Zheng , Zhu Yongbin , Liu Changxin , et al. Integrated projection of carbon emission for China under the optimal economic growth path [J]. *Acta Geographica Sinica* , 2010 , 65( 12 ) : 1559 - 1568. ( in Chinese)
- [21] Bosetti V , Massetti E , Tavoni M. The WITCH Model Structure , Baseline , Solutions [OL]. <http://www.feem.it/userfiles/attach/Publication/NDL2007/NDL2007-010.pdf> , 2014 - 2 - 14.
- [22] Nordhaus W D. Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the DICE model [J]. *Economic Modeling Greenhouse Warming* , 1993 , 83( 2 ) : 313 - 317.
- [23] McDonald A , Schrattenholzer L. Learning rates for energy technologies [J]. *Energy Policy* , 2001 , 29: 255 - 261.
- [24] IEA , NEA. Projected Costs of Generating Electricity [M]. Paris: OECD Publishing , 2010.
- [25] 王 铮, 朱永彬, 王丽娟, 等. 中国碳排放控制策略研究 [M]. 北京: 科学出版社 , 2013.
- Wang Zheng , Zhu Yongbin , Wang Lijuan , et al. Strategy for CO<sub>2</sub> Mitigation Control in China [M]. Beijing: Science Press , 2013. ( in Chinese)

## The cost-effective path of energy mix evolution for China under the emissions budgets

SHI Ying<sup>1 2</sup> , ZHU Yong-bin<sup>1</sup> , WANG Zheng<sup>1 3\*</sup>

1. Institute of Policy and Management , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China;
3. Key Laboratory of Geographical Information Science , Ministry of State Education of China , East China Normal University , Shanghai 200062 , China

**Abstract:** This paper introduces the indices of herding behavior and market volatility based on multifractal spectrum. Employing the nonlinear Granger causality test proposed by Diks and Panchenko and the cross-correlation coefficient proposed by Zebende , we investigate the dynamic linkages between herding behavior and market volatility. The empirical results indicate that the relationship between herding behavior and market volatility in the Shenzhen stock market is nonlinear , rather than the simple linear linkage. The correlations and causality relationships between herding behavior and market volatility are largely different between before and after the recent financial crisis. Specifically , before the reform of the shareholders in 2005 , herding behavior and market volatility could not affect each other. During the period of 2005 - 2007 , herding behavior had positive effects on market volatility. However , after 2008 , herding behavior had negative effects on market volatility , meanwhile market volatility also had negative effects on herding behavior. This new finding indicates that herding behavior does not always result in “positive feedback” effects as claimed in conventional studies and “negative feedback” effects are present sometimes.

**Key words:** energy model; energy structure; carbon emission; climate policy; optimal control