

引用格式:钟帅,沈镭,赵建安,等. 国际能源价格波动与中国碳税政策的协同模拟分析[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2310-2322.
[Zhong S, Shen L, Zhao J A, et al. Collaborative simulation analysis on international energy price volatility and China's carbon tax policy[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2310-2322.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.10

国际能源价格波动与中国碳税政策的协同模拟分析

钟 帅^{1,2,3}, 沈 镭^{1,2}, 赵建安^{1,2}, 孙艳芝^{1,2}, 武 娜^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 湖北师范大学资源枯竭城市转型与发展研究中心, 黄石 435002)

摘 要: 国际能源价格波动和碳税政策都会对能源成本产生直接作用, 从而对能源安全状况和减排效果产生影响。现有研究往往基于外部条件不变的假设分别探讨两者的影响效应。然而, 国际能源价格波动在现实中已成为常态, 实施碳税可能无法实现预期减排效果, 也可能影响能源安全。因此, 评估国际能源价格波动与碳税政策的交互影响效应, 有助于协调能源安全与碳减排的冲突问题。本研究构建了中国“产业-能源-碳排放”CGE模型, 探讨了国际化石能源价格波动和碳税政策对实现2030年碳减排60%~65%目标的交互影响效应, 研究结果显示: 无论国际化石能源价格上升还是下降, 碳税政策都能实现减排60%以上的目标; 而当国际化石能源价格下降, 碳税政策无法缓解能源对外依存度的提高, 能源安全存在隐患。

关键词: 能源价格; 碳税政策; 减排目标; 交互影响效应; CGE模型; 国际; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.10

1 引言

国际能源价格波动是能源安全问题产生的直接原因。在20世纪70年代两次大的石油危机爆发之前, 国际石油市场名义价格一直很平稳且低廉, 第一次石油危机使国际原油价格从最初3美元翻了近4倍, 第二次石油危机又使油价进一步暴涨至36.83美元/桶。油价的大幅度剧烈波动对市场供需主体都产生了显著的负面影响, 甚至危害到一国的经济安全和国家安全^[1]。另一方面, 对全球气候变化的持续争论将影响人们对能源消费的预期。Seneviratne等警告在当前的碳减排力度下, 全球气温上升可能超过以往预计的水平^[2]。然而, 国际气候谈判依然在减排目标设定、减排对象认定和减排措施选择等方面存在一些争议^[3,4]。

各国对于能源安全内涵的理解普遍倾向于保障国家利益并采取竞争性策略, 而寻求全球合作解决能源短缺的尝试远未达成共识^[5-7], 也不存在一种

普遍认可的资源保有水平以进行长期规划^[8]。因此保障稳定的能源供应常常作为第一前提, 而碳减排目标常常作为一种补充策略来迎合国际社会对气候变化问题的关注。发展中国家的能源安全政策一般需要优先服务于经济发展目标而非碳减排目标; 发达国家则往往对未来气候变化状况过于乐观而设置不符合现实的能源政策, 结果往往是能源安全问题或碳排放问题之间的某一个得到缓解, 但另一个问题却会恶化^[9]。已有经验表明, 包括温室气体减排目标和排放规则在内的一系列气候政策可以产生激励效果, 但如果实施过程出现问题, 则可能会产生相反的效果^[10]。

国际能源价格日益剧烈的动荡已经对中国能源安全状况产生了深刻的影响, 如国际能源价格剧烈波动会侵蚀中国本土企业的利润空间甚至使他们陷入亏损^[11]。同时, 中国政府在能源效率改善、促进节能和总能耗下降、排放控制、煤层气开发和可

收稿日期: 2017-09-07; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFA0602802); 国家自然科学基金青年基金项目(41501604; 41501590); 国家自然科学基金面上项目(41771566)。

作者简介: 钟帅, 男, 海南文昌人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为资源经济与政策。E-mail: zhongshuai@igsrr.ac.cn

通讯作者: 沈镭, E-mail: shenl@igsrr.ac.cn

2017年12月

再生能源发展等方面常常难以实现既定政策目标^[12,13],而中国宏观经济改革目标常常对能源政策造成限制,直接导致中国能源安全状况30年来几乎完全没有改善^[14]。Odgaard等认为,中国未来的能源供应将很难满足需求,尤其是石油进口需求到2030年仅能保障10%^[15]。

中国政府在2015年“巴黎气候峰会”上正式承诺到2030年左右达到峰值并争取尽早达峰,单位GDP(2005年不变价)的碳排放量减少60%~65%。据国家发展与改革委员会(简称发改委)气候变化司副司长蒋兆理介绍,从2015年开始,建设全国碳市场的各项工作已经开始,2016—2020年为全国碳市场第一阶段,参与企业范围涵盖石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力、航空八大行业,预计首批纳入企业数量约为7000~8000家。目前,国内各试点的碳价约为(15~30)元/t^[16]。碳价对于企业而言实际上是一种碳税。

关于能源价格波动和碳税政策的影响问题在国内外都已有了大量研究,如魏一鸣等^[1]、Nel等^[8]、Höök等^[9]、Mulhall等^[11]、石敏俊等^[17]、范英等^[18]。然而,现有研究往往在外部条件不变的假设下分别关注能源价格波动和碳税政策,即在衡量能源价格波动时假定政策环境不变,或在评估碳税政策时假定能源价格平稳,而缺乏对两者的交互影响效应进行探讨。在国际能源价格波动已成为常态的情况下,碳税政策能否实现中国2030年减排目标是一个值得关注的问题,其实际上是保障能源安全与应对气候变化的政策协调问题,本研究将对此进行探讨。

2 研究方法 with 数据来源

可计算一般均衡(Computable General Equilibrium, CGE)模型在国内外已广泛应用于区域规

划、政策分析、资源环境效应等方面。CGE模型构建主要包括两个方面:一是构建社会核算矩阵(Social Accounting Matrix, SAM),二是以SAM为数据基础建立CGE模型。

2.1 “产业-能源-碳排放”SAM的构建

与标准SAM表式结构一致,中国2012年“产业-能源-碳排放SAM”(以下简称为“产-能-碳SAM”)包含生产部门、要素部门、机构部门、投资/储蓄和世界其它地区等部门。本研究在部门方面进行了调整。标准SAM是由投入产出表扩展而来:投入产出表描述了要素投入与中间投入实现生产、生产满足消费的过程,因此投入产出表包括中间投入、要素投入、最终消费三个部分;而SAM在数据结构上是一个行列相同的方阵,其扩展在于引入了第四部分,描述要素投入所形成的要素收入在居民、政府等机构部门以及投资部门之间的分配,也即各机构部门对收入的分配过程。因此,构建SAM需要整合投入产出表与其他描述要素收入分配的数据。

“产-能-碳SAM”的简要表式结构见表1,其中,投入产出数据来源于《2012年中国投入产出表》^[19],其它如要素收入分配数据来源于“中国经济社会大数据研究平台”(data.cnki.net)的相关数据资料并参考了赵永等的编制方法^[20]。最后,采用交互熵法消除《2012年中国投入产出表》^[19]中的误差项:

(1)生产部门包含45个部门,与《中国能源统计年鉴2014》^[21]的部门设置一致,避免能源消费的实物量与价值量不一致的问题。其中,“能源部门”包括“煤炭开采和洗选业”(下文简称“煤炭”)、“石油和天然气开采业”(“油气”)、“石油加工、炼焦和核燃料加工业”(“焦炭/成品油”)、“燃气生产和供应

表1 产-能-碳SAM的简要表式结构和数据来源

Table 1 Simplified table structure and data sources of Industry-Energy-Carbon SAM

	生产部门	要素部门	机构部门	投资	世界其它地区	总计
生产部门	中间投入*		机构消费*	固定资本形成*	出口*	总需求
要素部门	要素投入*				国外要素净收入**	要素总收入
机构部门	生产税*	要素收入分配**	机构转移收支**		国外对机构净转移**	机构总收入
储蓄			机构储蓄**		外资净流入**	总储蓄
世界其它地区	进口*					外汇总支出
总计	总供给	要素总支出	机构总支出	总投资	外汇总收入	

数据来源: * 表示数据来源于参考文献[19]; **表示数据来源于中国经济社会大数据研究平台(data.cnki.net),以及参考了文献[20]。

业”(“燃气”)、“电力生产和供应业”(“电力”)等5个部门。

(2)要素部门包含劳动力和资本。

(3)机构部门包含农村居民、城镇居民、政府和企业。

(4)其它部门包含投资/储蓄、直接税、间接税、关税、世界其它地区等。

2.2 部门碳排放和碳税的核算

碳排放包括来自煤炭产品、焦炭/成品油产品和燃气产品作为生产投入以及被居民消费所产生的排放量。其中,油气产品作为生产投入不核算碳排放,因为其大多是经过加工之后才成为燃料;核算燃气产品作为生产投入的碳排放时应用天然气的碳排放系数。煤炭、焦炭/成品油和燃气等三种能源投入的碳排放系数参考了Dong等^[22]的取值。

碳税是对碳排放量的实物量进行征收,即按每吨计算,而CGE模型中的投入量是价值量,以万元为单位。因此,碳税税率在引入CGE模型时需要按照公式(1)进行单位调整,最终所征收的碳税实际上是按照每万元能源投入量(2012年不变价)进行征收。

$$ca_tax_{sec} = \frac{EP_{sec}}{E_{sec}} \times \frac{Ca_{sec}}{EP_{sec}} \times \frac{CaP_{sec}}{Ca_{sec}} \quad (1)$$

式中下标 sec 表示生产部门集合; ca_tax_{sec} 为每万元能源投入的碳税税率; EP_{sec} 为能源投入的实物量(万t); E_{sec} 为能源投入的价值量(万元); Ca_{sec} 为碳排放量(t); CaP_{sec} 为每吨碳排放量所收取的碳价(元)。

本研究核算的碳排放总量为100.02亿t,与碳排放核算的权威机构之一——丁铎尔气候变化研究中心所发布的“全球碳计划”2012年度报告和2013年度所估算的中国2012年和2013年碳排放总量数值接近(分别为99.68亿t和104.4亿t)^[23,24]。

2.3 “产业-能源-碳排放”CGE模型的构建

中国“产业-能源-碳排放”CGE模型(以下简称“产-能-碳CGE”)是由标准CGE模型扩展而来,在微观上采用完全竞争条件下生产部门利润最大化和消费者效用最大化同时实现的假设,通过设定商品市场均衡、要素市场均衡、国际贸易均衡、宏观经济变量均衡和各经济主体收支平衡实现从微观到宏观的链接。本研究主要扩展是在生产部门增加能源模块、碳排放模块和政策模拟模块等。

2.3.1 生产部门的能源模块扩展

生产部门的生产函数结构采用嵌套常替代弹性(Constant Elasticity Substitution, CES)函数结构(图1),作为生产投入的5种能源产品构成能源模

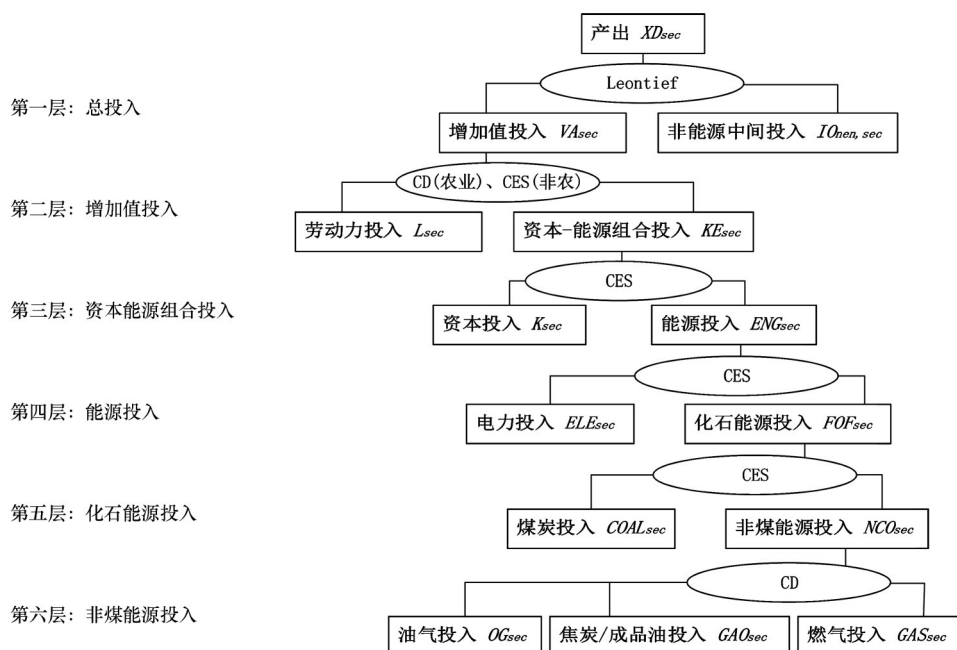


图1 产-能-碳CGE模型生产部门的生产函数结构

Figure 1 Production function structure in Industry-Energy-Carbon CGE model

2017年12月

块,包括煤炭产品、油气产品、焦炭/成品油产品、燃气产品、电力产品等。生产函数结构有六层。在模型中呈现的方程是通过拉格朗日在约束条件下求解最优化的方程形式。本研究主要扩展在第三到六层。其它结构与标准CGE模型相同。嵌套CES函数结构设置描述了不同生产投入之间的价格替代关系,从而刻画能源价格变化条件下,生产者基于能源成本变化所做出的适应性决策。

第六层:由Cobb-Douglas(CD)函数表现油气、焦炭/成品油、燃气等投入组成非煤能源投入。最优化求解得到油气投入 OG_{sec} 需求方程(公式(2))、焦炭/成品油投入 GAO_{sec} 需求方程(公式(3))、燃气投入 GAS_{sec} 需求方程(公式(4)),以及非煤能源投入 NCO_{sec} 需求方程(公式(5))。

$$OG_{sec} = \beta OG_{sec} \times PNC O_{sec} \times NCO_{sec} / (POG + OGcm_{sec} \times OGctx_{sec}) \quad (2)$$

$$GAO_{sec} = \beta GAO_{sec} \times PNC O_{sec} \times NCO_{sec} / (PGA O + GAOcm_{sec} \times GAOctx_{sec}) \quad (3)$$

$$GAS_{sec} = \beta GAS_{sec} \times PNC O_{sec} \times NCO_{sec} / (PGAS + GAScm_{sec} \times GASctx_{sec}) \quad (4)$$

$$NCO_{sec} = bNCO_{sec} \times (OG_{sec}^{\beta OG_{sec}} \times GAO_{sec}^{\beta GAO_{sec}} \times GAS_{sec}^{\beta GAS_{sec}}) \quad (5)$$

式中 POG 、 $PGA O$ 、 $PGAS$ 分别代表油气、焦炭/成品油和燃气等投入的销售价格; $PNC O_{sec}$ 为非煤组合投入的价格; βOG_{sec} 、 βGAO_{sec} 、 βGAS_{sec} 分别表示油气投入、焦炭/成品油投入、燃气投入在 Cobb-Douglas 函数中的份额参数; $OGcm_{sec}$ 、 $GAOcm_{sec}$ 、 $GAScm_{sec}$ 分别表示油气、焦炭/成品油和燃气等能源投入在使用过程中的碳排放系数; $OGctx_{sec}$ 、 $GAOctx_{sec}$ 、 $GASctx_{sec}$ 分别表示针对油气、焦炭/成品油和燃气等能源使用所征收的碳税。在这里根据中国目前碳税的试点情况采用从量税设置。

第五层:化石能源投入 FOF_{sec} 由煤炭投入和非煤组合投入组成,以CES函数形式表现。将最优化得到煤炭投入 $COAL_{sec}$ 需求方程(公式(6))、非煤组合投入 NCO_{sec} 需求方程(公式(7)),公式(5)已表达了 NCO_{sec} ,故此公式实际是求其价格 $PNC O_{sec}$,以及化石能源投入价格 $PFOF_{sec}$ 的零利润条件方程(公式(8))。

$$COAL_{sec} = \left(\frac{FOF_{sec}}{\alpha FOF_{sec}} \right) \times \left(\frac{\gamma FOF_{sec}}{PCOAL + COALcm_{sec} \times COALctx_{sec}} \right)^{\sigma FOF_{sec}} \times \left(\frac{\gamma FOF_{sec}^{\sigma FOF_{sec}} \times (PCOAL + COALcm_{sec} \times COALctx_{sec})^{(1-\sigma FOF_{sec})}}{(1-\gamma FOF_{sec})^{\sigma FOF_{sec}} \times PNC O_{sec}} \right)^{\frac{\sigma FOF_{sec}}{(1-\sigma FOF_{sec})}} \quad (6)$$

$$NCO_{sec} = \left(\frac{FOF_{sec}}{\alpha FOF_{sec}} \right) \times \left(\frac{1-\gamma FOF_{sec}}{PNC O_{sec}} \right)^{\sigma FOF_{sec}} \times \left(\frac{\gamma FOF_{sec}^{\sigma FOF_{sec}} \times (PCOAL + COALcm_{sec} \times COALctx_{sec})^{(1-\sigma FOF_{sec})}}{(1-\gamma FOF_{sec})^{\sigma FOF_{sec}} \times PNC O_{sec}} \right)^{\frac{\sigma FOF_{sec}}{(1-\sigma FOF_{sec})}} \quad (7)$$

$$PFOF_{sec} \times FOF_{sec} = (PCOAL + COALcm_{sec} \times COALctx_{sec}) \times COAL_{sec} + PNC O_{sec} \times NCO_{sec} \quad (8)$$

式中 $PCOAL$ 为煤炭投入的价格; αFOF_{sec} 为CES函数的效率参数; γFOF_{sec} 为煤炭投入的份额参数,因此非煤组合投入的份额参数为 $(1-\gamma FOF_{sec})$; σFOF_{sec} 为煤炭投入与非煤组合投入的价格替代弹性参数; $COALcm_{sec}$ 为煤炭投入在使用过程中的碳排放系数; $COALctx_{sec}$ 为针对煤炭使用所征收的碳税,同样采用从量税设置。

第四层:能源投入 ENG_{sec} 由电力投入和化石能源投入组成,以CES函数形式表现。最优化求解得到电力投入 ELE_{sec} 需求方程(公式(9))、化石组合投入 FOF_{sec} 需求方程(公式(10)),以及能源投入价格 $PENG_{sec}$ 的零利润条件方程(公式(11))。

$$ELE_{sec} = \left(\frac{ENG_{sec}}{\alpha ENG_{sec}} \right) \times \left(\frac{\gamma ENG_{sec}}{PELE} \right)^{\sigma ENG_{sec}} \times \left(\frac{\gamma ENG_{sec}^{\sigma ENG_{sec}} \times PELE^{(1-\sigma ENG_{sec})}}{(1-\gamma ENG_{sec})^{\sigma ENG_{sec}} \times PFOF_{sec}} \right)^{\frac{\sigma ENG_{sec}}{(1-\sigma ENG_{sec})}} \quad (9)$$

$$FOF_{sec} = \left(\frac{ENG_{sec}}{\alpha ENG_{sec}} \right) \times \left(\frac{1-\gamma ENG_{sec}}{PFOF_{sec}} \right)^{\sigma ENG_{sec}} \times \left(\frac{\gamma ENG_{sec}^{\sigma ENG_{sec}} \times PELE^{(1-\sigma ENG_{sec})}}{(1-\gamma ENG_{sec})^{\sigma ENG_{sec}} \times PFOF_{sec}} \right)^{\frac{\sigma ENG_{sec}}{(1-\sigma ENG_{sec})}} \quad (10)$$

$$PENG_{sec} \times ENG_{sec} = PELE \times ELE_{sec} + PFOF_{sec} \times FOF_{sec} \quad (11)$$

式中 $PELE$ 为电力投入的价格; αENG_{sec} 为 CES 函数的效率参数; γENG_{sec} 为电力投入的份额参数, 因此化石能源投入的份额参数为 $(1 - \gamma ENG_{sec})$; σENG_{sec} 为电力投入与化石能源投入的价格替代弹性参数。

第三层: 资本-能源组合投入 (KE_{sec}), 由资本投入和能源投入组成, 以 CES 函数形式表现。最优化得到电力投入 K_{sec} 需求方程 (公式 (12))、能源投入 ENG_{sec} 需求方程 (公式 (13)) 和资本-能源组合投入价格 PKE_{sec} 的零利润条件方程 (公式 (14))。

$$K_{sec} = \left(\frac{KE_{sec}}{\alpha KE_{sec}} \right) \times \left(\frac{\gamma KE_{sec}}{PK_{sec}} \right)^{\sigma KE_{sec}} \times \left(\frac{\gamma KE_{sec}^{\sigma KE_{sec}} \times PK_{sec}^{(1-\sigma KE_{sec})}}{+(1-\gamma KE_{sec})^{\sigma KE_{sec}} \times PENG_{sec}^{(1-\sigma KE_{sec})}} \right)^{\frac{\sigma KE_{sec}}{(1-\sigma KE_{sec})}} \quad (12)$$

$$ENG_{sec} = \left(\frac{KE_{sec}}{\alpha KE_{sec}} \right) \times \left(\frac{1-\gamma KE_{sec}}{PENG_{sec}} \right)^{\sigma KE_{sec}} \times \left(\frac{\gamma KE_{sec}^{\sigma KE_{sec}} \times PK_{sec}^{(1-\sigma KE_{sec})}}{+(1-\gamma KE_{sec})^{\sigma KE_{sec}} \times PENG_{sec}^{(1-\sigma KE_{sec})}} \right)^{\frac{\sigma KE_{sec}}{(1-\sigma KE_{sec})}} \quad (13)$$

$$PKE_{sec} \times KE_{sec} = PK_{sec} \times K_{sec} + PENG_{sec} \times ENG_{sec} \quad (14)$$

式中 αKE_{sec} 为 CES 函数的效率参数; γKE_{sec} 为资本投入的份额参数, 因此能源投入的份额参数为 $(1 - \gamma KE_{sec})$; σKE_{sec} 为资本投入与能源投入的价格替代弹性参数。

2.3.2 生产部门的碳排放模块扩展

本研究直接计算化石能源作为燃料的碳排放量, 因此不必区分直接碳排放量和间接碳排放量。以 IPCC 提供的碳排放核算作为参考。参考 IPCC 和 Dong 等的核算方法, 采取基于标准煤消耗的净热值碳排放量核算方法^[22]。公式如下:

$$CO_{2sec,E} = E_{sec} \times cm_{sec,E} \quad (15)$$

$$cm_{sec,E} = convert_{sec,E} \times ems_E \times Oxid_E \quad (16)$$

式中下标 E 为煤炭、油气、焦炭/成品油、燃气等能源产品的集合; $cm_{sec,E}$ 为能源的碳排放系数; $convert_{sec,E}$

为能源转换为标准煤的转换系数; $ems_{CO_{2E}}$ 为能源的碳排放因子; $Oxid_E$ 为能源的氧化率。

2.4 CGE 模型动态机制

CGE 模型动态机制是根据中国经济增速快和经济结构变动显著的特点, 采用递推动态方法。在递推动态过程中, 经济增长主要由要素增长决定, 主要考虑三种驱动因素: 劳动力总供给的增长 ($LS_t \rightarrow LS_{t+1}$) 公式 (17)、新增投资催动的资本存量的增长公式 (22)、以及全要素技术进步过程公式 (23)。计算公式如下:

$$LS_{t+1} = \bar{LS}_t \times (1 + glab_t) \quad (17)$$

$$IT_t = \sum_{sec} I_{sec,t} \quad (18)$$

$$AR_t = \frac{\sum_{sec} PK_{sec,t} K_{sec,t}}{\sum_{sec} K_{sec,t}} \quad (19)$$

$$\alpha INV_{sec} = \frac{\overline{INVZ}_{sec}}{\sum_{sec} INVZ_{sec}} \left(\frac{PK_{sec,t}}{AR_t} \right)^{\rho} \quad (20)$$

$$INV_{sec,t} = \alpha INV_{sec} \times IT_t \quad (21)$$

$$K_{sec,t+1} = (1 - depri_{sec,t}) \bar{K}_{sec,t} + INV_{sec,t} \quad (22)$$

$$bF_{sec,t+1} = bF_{sec,t} (1 + gt_{sec,t}) \quad (23)$$

式中 $glab_t$ 为 t 期的劳动力年均增长率; IT_t 为 t 期可用的投资总额; AR_t 为 t 期的平均收益率; $INVZ_{sec}$ 为基期的新增投资; ρ 为各生产部门资本存量价格的替代弹性, 设其值为 0.5 表示风险中性的特征; $depri_{sec}$ 为各生产部门资本折旧率, 参考现有研究一般设为 0.05; $gt_{sec,t}$ 为各生产部门的全要素增长率。其中, 新增投资催动的资本存量的增长的过程是: t 期的投资集结形成可用投资总额, 可用投资总额根据当期各生产部门资本存量价格与平均资本收益率的比值决定下一期新增投资的分配系数, 即更高的资本收益将获得更多的投入。

2.5 政策模拟的背景与设计

本研究设计了 4 种模拟情景。2012 年是由产-能-碳 SAM 表现的模拟基期; 2013—2015 年为模型调试期, 即对 CGE 模型模拟的发展路径进行调试, 使其 GDP 增长路径符合实际增长路径; 情景模拟的时期为 2016—2030 年, 设置 2016—2030 年的年均增长率为 6%, 这是出于保障就业率和维持社会稳

2017年12月

定的考虑。

第一是基准情景(Baseline Scenario, BS),考虑到人口增长对经济增长、能源安全和碳减排可能存在的重要影响,参考联合国人口司(United Nations Population Division, UNPD, 2015)对中国人口增长速度的3种预测(人口高速增长、人口中速增长和人口低速增长,见图2)^[25],分别设定3种速率的人口增长情景作为3种基准情景。

第二是价格情景(Price Scenario, PS),即假定国际化石能源价格(在模型中即煤炭、油气和焦炭/成品油的国际进出口价格)在2016年之后全部以年均10%的速度持续上升或者持续下降至2030年。参考英国石油公司发布的年度报告^[26],国际化石能源价格在不同时期呈现不同的趋势,而且不同的化石能源价格变化呈现出相似的特征,即在同一时期3种化石能源基本上是同涨同跌,且年均涨跌幅都有超过10%的时期,因此所假定的两种趋势都有可能出现。

第三是碳税情景(Carbon Scenario, CS),即设定碳税为30元/t,对使用煤炭、焦炭/成品油和燃气等产品为能源投入的生产部门进行征收,并假定国际能源价格不变。

第四是综合情景(Integrated Scenario, BPCS=BS+PS+CS),即在碳税情景中分别引入国际化石能源价格持续上涨和持续下跌等两种情景,见图3。

基准情景、价格情景、碳税情景和综合情景等4种情景一共包含了18个子情景(见表2),情景分析首先是将价格情景和碳税情景与基准情景进行对比,以分别衡量国际化石能源价格波动的影响、碳税政策的影响,进而将综合情景与价格情景和碳税情景分别对比,衡量国际化石能源价格波动和碳税政策及其减排效果的交叉影响。

本研究分别引入下列指标进行能源安全和碳减排的政策效果的评估:

(1)在能源安全指标方面,主要探讨能源贸易依存度和能源强度两个指标。能源贸易依存度用

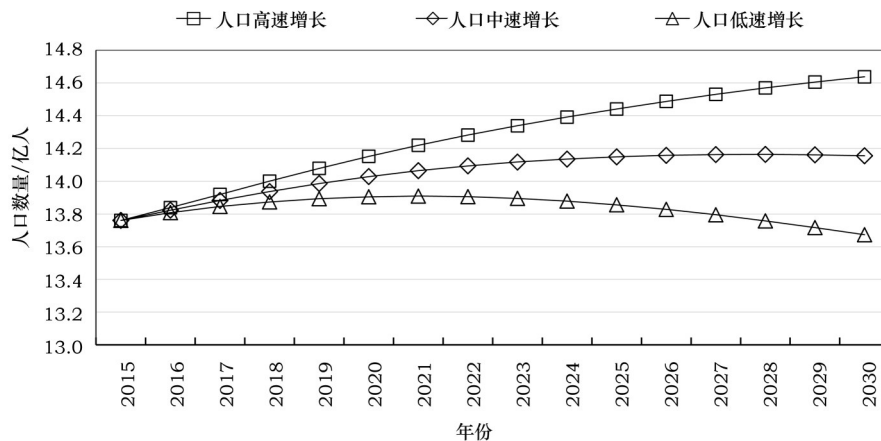


图2 2015—2030年中国人口增长速度的3种情景预测

Figure 2 Three scenarios of prediction for the speed of China's population growth from 2015 to 2030

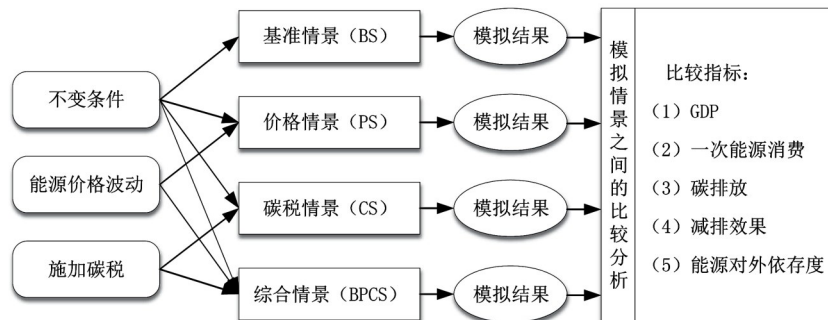


图3 能源价格与碳税的情景设计及比较分析指标

Figure 3 Scenarios of energy price volatility and carbon tax design and indexes for comparative analysis

表2 模拟情景的名称代号设定

Table 2 Name code setting for simulation scenarios

	基准情景(BS)*	价格情景(PS)**		碳税情景(CS)	综合情景(BPCS)	
		价格上升***	价格下降***		价格上升***	价格下降***
人口高速增长	BHS	BHPUS	BHPDS	BHCS	BHPUCS	BHPDCS
人口中速增长	BMS	BMPUS	BMPDS	BMCS	BMPUCS	BMPDCS
人口低速增长	BLS	BLPUS	BLPDS	BLCS	BLPUCS	BLPDCS

注: * “H”、“M”、“L”分别指代单词“High”、“Medium”、“Low”; ** 价格情景设定为化石能源(包括煤炭、油气、焦炭/成品油)的国际进出口价格同时上升或下降; *** “U”、“D”分别指代单词“Up”、“Down”。

绝对值核算,计算公式为:

$$SE_i = \frac{|ME_i - EE_i|}{Q_i} \quad (24)$$

式中 SE_i 为第 i 种能源对外依存度; ME_i 和 EE_i 分别为第 i 种能源的进口量和出口量; Q_i 为第 i 种能源的表观消费量,即净进口量与本地生产量之和。国际公认的安全警戒线为 $SE_i = 0.3$ 。能源强度是各生产部门的能源投入与该部门产出的比值,该比值越小表示能源效率越高。

(2)在碳减排政策方面,主要基于碳排放强度探讨碳税的减排效果,碳强度即单位产出(包括GDP和各部门产出)的碳排放量。其中,考虑中国所承诺的2030年减排目标,即单位GDP(按2005年不变价)的碳排放量减少60%~65%。由于CGE模型得到的2013-2030年实际GDP预测值是基于2012年不变价,因此,需要基于《中国统计年鉴(2015)》^[27]中的GDP增长指数(即公式(25)中的 GDP_index_t)先将2005-2012年的名义GDP转换为2005年不变价核算的实际GDP,从而得到2005年不变价的2012年GDP,然后将其连续乘以由CGE模型预测得到的2013—2030年实际GDP的增长率(即公式(26)中的 $GDP_growthrate_{2013-2030}$),得到2005年不变价的2013—2030年GDP,再用模型预测得到碳排放量分别除以2005年不变价的2013—2030年GDP,分别得到2013—2030年的基于2005年不变价的碳排放强度。在此定义“减排效果”指标,其含义是通过上述方法得到的基于2005年不变价的碳排放强度预测值相对于2005年碳排放强度的变化百分比,见公式(27)。

$$GDP_{2012, 2005 \text{ 不变价}} = \prod_t GDP_{2005} \times GDP_index_t \quad (25)$$

($t = 2006, 2007, \dots, 2012$)

$$GDP_{2013-2030 \text{ 不变价}} = GDP_{2012, 2005} \times GDP_growthrate_{2013-2030} \quad (26)$$

$$Ca_M_{2016-2030} = \frac{Ca_I_{2016-2030, 2005 \text{ 不变价}}}{Ca_I_{2005 \text{ GDP}}} - 1$$

$$= \frac{\frac{Ca_{2016-2030}}{GDP_{2016-2030, 2005}}}{\frac{Ca_{2005}}{GDP_{2005}}} - 1 \quad (27)$$

3 模拟结果及分析

3.1 基准情景

3个基准情景分别预测了2016—2030年GDP、一次化石能源消费总量、一次化石能源强度、CO₂排放总量和CO₂排放强度等宏观指标。比较预测结果发现,人口增长速率高低对于各项宏观指标的影响并不显著,尤其是对于化石能源强度和CO₂强度几乎没有影响(表3)。

3个基准情景中,煤炭、油气、焦炭/成品油等能源的对外依存度不存在显著差别。2020—2030年期间,3种化石能源的对外依存度将逐渐下降(表4)。

2005年碳排放量为50.6亿t,碳排放强度为2.70t/万元。以2005年不变价的CO₂强度在2020—2030年期间逐渐下降,不同基准情景存在较明显的差异,人口低速增长情景更有利于减排。但3种基准情景在2030年都没达到减排60%的目标(表5)。

3.2 价格情景

国际化石能源价格持续上升将对GDP和能源消费产生负面影响,能源强度和碳排放强度也随之下降,2030年的减排效果将实现减排53.11%,接近减排目标。反之,国际化石能源持续下降将刺激GDP增长和能源消费增加,碳排放强度也将持续上升,到2030年完全无法实现减排目标(表6,见2318页)。

2017年12月

表3 基准情景中的中国一次化石能源及CO₂排放指标变化Table 3 Changes in the primary fossil energy and CO₂ emission within three baseline scenarios in China

情景	年份	GDP (亿元,不变价=2012年)	一次化石能源消费总量 (万吨ec)	一次化石能源强度 (万吨ec/亿元)	CO ₂ 排放总量 (亿吨)	CO ₂ 强度 (t/万元,不变价=2012年)
BHS	2020	865 169	599 965	0.69	161.70	1.87
	2025	1 163 164	741 615	0.64	201.01	1.73
	2030	1 562 776	893 956	0.57	244.25	1.56
BMS	2020	865 501	598 125	0.69	161.27	1.86
	2025	1 163 732	735 545	0.63	199.56	1.71
	2030	1 563 415	881 165	0.56	241.15	1.54
BLS	2020	865 479	596 164	0.69	160.81	1.86
	2025	1 163 871	729 232	0.63	198.05	1.70
	2030	1 563 707	867 932	0.56	237.93	1.52

注:一次化石能源包括煤炭、石油和天然气。

表4 2020—2030年中国化石能源在3种基准情景下的
对外依存度Table 4 Dependence of foreign energy within three baseline scenarios
from 2020 to 2030

情景	年份	煤炭对外 依存度	油气对外 依存度	焦炭/成品油 对外依存度
BHS	2020	0.07	0.46	0.03
	2025	0.08	0.44	0.02
	2030	0.09	0.43	0.02
BMS	2020	0.07	0.46	0.03
	2025	0.08	0.44	0.02
	2030	0.09	0.43	0.02
BLS	2020	0.07	0.46	0.03
	2025	0.08	0.43	0.02
	2030	0.09	0.43	0.01

国际化石能源价格上升将使化石能源对外依存度下降,不同劳动力增长情景对其没有显著影响。反之,国际化石能源价格下降将使化石能源对

外依存度上升,不同劳动力增长情景对其也没有显著影响(表7)。

3.3 碳税情景

尽管施加碳税能源消费将产生负面影响,能源强度和碳排放及其强度也同时下降,但将对GDP产生正面效应。同时,2030年的减排效果将实现减排66.48%~68.70%,完成减排目标(表8,见第2319页)。

如表9所示,相对于基准情景,施加碳税将使化石能源对外依存度在2030年略有上升,但在2025年之前的变化并不显著。

3.4 综合情景

相对于价格情景(B1P1S、B2P1S、B3P1S)而言,在施加碳税后,国际化石能源价格持续上升有助于实现2030年减排目标;但相对碳税情景而言(B1CS、B2CS、B3CS),国际化石能源价格上升抑制

表5 中国在3种基准情景中的CO₂减排效果Table 5 CO₂ reduction results within three baseline scenarios in China

情景	2005年碳排放 量/亿吨	2005年碳排放 强度/(t/万元)	年份	CO ₂ 强度/(t/万元, 不变价=2005年)	减排效果 (相对2005年强度)/%	是否实现减排目标(2030年相对 2005年强度,不变价=2005年)
BHS	50.60	2.70	2020	2.58	-4.47	否
			2025	2.39	-11.67	
			2030	2.16	-20.11	
BMS	50.60	2.70	2020	2.57	-4.76	否
			2025	2.37	-12.35	
			2030	2.13	-21.16	
BLS	50.60	2.70	2020	2.57	-5.03	否
			2025	2.35	-13.02	
			2030	2.10	-22.23	

注:负号表示下降或者减少。

表6 不同价格情景中化石能源消费和减排效果相对于基准情景的变化

Table 6 Changes in fossil energy consumption and emission reduction results within six price scenarios in comparison to baseline scenarios (%)

情景	年份	GDP 变化	一次化石能源 消费变化	一次化石能源 强度变化	碳排放 变化	碳强度 变化	减排效果 (是否实现目标)
BHPUS	2020	-3.47	-16.26	-13.25	-17.58	-14.62	-18.43
	2025	-5.56	-30.39	-26.29	-32.65	-28.68	-37.00
	2030	-5.88	-41.88	-38.25	-44.75	-41.30	-53.11(否)
BMPUS	2020	-3.45	-16.24	-13.25	-17.56	-14.62	-18.68
	2025	-5.48	-30.32	-26.28	-32.58	-28.67	-37.48
	2030	-5.69	-41.74	-38.22	-44.63	-41.29	-53.72(否)
BLPUS	2020	-3.43	-16.22	-13.24	-17.54	-14.61	-18.91
	2025	-5.40	-30.25	-26.27	-32.52	-28.67	-37.96
	2030	-5.50	-41.60	-38.20	-44.51	-41.28	-54.33(否)
BHPDS	2020	3.67	20.87	16.60	23.79	19.41	14.07
	2025	6.43	46.89	38.02	56.65	47.20	30.02
	2030	9.24	78.20	63.12	102.56	85.43	48.13(否)
BMPDS	2020	3.65	20.84	16.59	23.77	19.41	13.73
	2025	6.36	46.76	37.98	56.58	47.21	29.04
	2030	9.17	77.84	62.90	102.50	85.49	46.24(否)
BLPDS	2020	3.63	20.82	16.59	23.74	19.41	13.41
	2025	6.30	46.63	37.93	56.51	47.23	28.06
	2030	9.10	77.47	62.67	102.44	85.56	44.32(否)

注:负号表示下降或者减少。

表7 不同价格情景中的化石能源对外依存度

Table 7 Dependence of foreign energy within six price scenarios

情景	年份	煤炭对外 依存度	油气对外 依存度	焦炭/成品油 对外依存度
BHPUS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BMPUS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BLPUS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BHPDS	2020	0.13	0.63	0.04
	2025	0.25	0.83	0.05
	2030	0.45	0.95	0.07
BMPDS	2020	0.13	0.63	0.04
	2025	0.26	0.83	0.05
	2030	0.45	0.95	0.07
BLPDS	2020	0.13	0.63	0.04
	2025	0.26	0.83	0.05
	2030	0.46	0.95	0.07

了碳税的作用,使得尽管实现减排目标,但不如碳税情景的实现效果。反之,尽管国际化石能源持续下降将会促进GDP增加,但施加碳税有助于减少能源消费量和CO₂排放量,同时降低能源强度和CO₂强度,实现2030年的减排目标,而且减排效果与碳税情景的效果相似(见表10)。

国际化石能源价格上升时施加碳税,化石能源对外依存度相对价格情景几乎没有变化;但低于碳

表9 不同碳税情景下的中国化石能源对外依存度

Table 9 Dependence of foreign energy within three carbon tax scenarios

情景	年份	煤炭对外 依存度	油气对外 依存度	焦炭/成品油 对外依存度
BHCS	2020	0.07	0.47	0.03
	2025	0.08	0.44	0.03
	2030	0.11	0.44	0.02
BMCS	2020	0.07	0.46	0.03
	2025	0.08	0.44	0.03
	2030	0.11	0.44	0.02
BLCS	2020	0.07	0.46	0.03
	2025	0.08	0.44	0.02
	2030	0.11	0.44	0.02

2017年12月

表8 不同碳税情景下化石能源消费和减排效果相对于基准情景的变化

Table 8 Changes in fossil energy consumption and emission reduction results within three carbon tax scenarios

		in comparison to baseline scenarios						(%)
情景	年份	GDP 变化	一次化石能源 消费变化	一次化石能源 强度变化	碳排放 变化	碳强度 变化	减排效果 (是否实现目标)	
BHCS	2020	0.54	-12.02	-12.49	-14.22	-14.68	-18.49	
	2025	1.12	-27.91	-28.71	-31.13	-31.89	-39.84	
	2030	1.93	-54.86	-55.71	-60.07	-60.82	-68.70(是)	
BMCS	2020	0.53	-11.91	-12.38	-14.11	-14.57	-18.63	
	2025	1.08	-27.06	-27.84	-30.26	-31.00	-39.52	
	2030	1.82	-53.15	-53.98	-58.20	-58.95	-67.64(是)	
BLCS	2020	0.53	-11.78	-12.25	-13.98	-14.43	-18.74	
	2025	1.03	-26.15	-26.90	-29.32	-30.04	-39.15	
	2030	1.71	-51.27	-52.09	-56.17	-56.90	-66.48(是)	

注：负号表示下降或者减少。

表10 不同综合情景下化石能源消费和减排效果相对于基准情景的变化

Table 10 Changes in fossil energy consumption and emission reduction results within six integrated scenarios

		in comparison to baseline scenarios						(%)
情景	年份	GDP 变化	一次化石能源 消费变化	一次化石能源 强度变化	碳排放 变化	碳强度 变化	减排效果 (是否实现目标)	
BHPUCS	2020	-3.10	-22.23	-19.74	-25.10	-22.70	-26.16	
	2025	-5.07	-36.60	-33.21	-40.44	-37.26	-44.58	
	2030	-5.00	-50.51	-47.90	-55.10	-52.74	-62.24(是)	
BMPUCS	2020	-3.08	-22.15	-19.68	-25.03	-22.64	-26.32	
	2025	-5.02	-36.27	-32.91	-40.13	-36.97	-44.75	
	2030	-4.92	-49.57	-46.96	-54.22	-51.85	-62.04(是)	
BLPUCS	2020	-3.07	-22.07	-19.60	-24.95	-22.57	-26.46	
	2025	-4.96	-35.94	-32.59	-39.81	-36.66	-44.91	
	2030	-4.82	-48.64	-46.03	-53.34	-50.97	-61.87(是)	
BHPDCS	2020	4.41	-3.50	-7.57	-4.10	-8.15	-12.19	
	2025	7.67	-32.35	-37.17	-33.44	-38.18	-45.39	
	2030	8.97	-48.69	-52.91	-56.52	-60.10	-68.13(是)	
BMPDCS	2020	4.38	-3.33	-7.38	-3.85	-7.88	-12.27	
	2025	7.57	-31.41	-36.24	-32.22	-36.99	-44.77	
	2030	9.03	-47.89	-52.21	-54.83	-58.57	-67.34(是)	
BLPDCS	2020	4.35	-3.12	-7.16	-3.62	-7.65	-12.29	
	2025	7.48	-30.37	-35.21	-30.89	-35.70	-44.08	
	2030	9.07	-47.04	-51.45	-53.00	-56.91	-66.48(是)	

注：负号表示下降或者减少。

税情景。在国际化石能源价格下降时施加碳税,化石能源对外依存度相对价格情景也几乎没有变化;但高于碳税情景。因此,国际化石能源价格波动对于能源对外依存度的影响高于碳税政策对其的影响(表11)。

4 结论与展望

4.1 结论

本研究构建了中国产-能-碳 CGE 模型和相应的中国产-能-碳 SAM,并应用模型模拟了国际化石能源波动和碳税政策对中国 GDP、能源消费、碳排

表 11 不同综合情景下的能源对外依存度

Table 11 Dependence of foreign energy within six integrated scenarios

情景	年份	煤炭对外 依存度	油气对外 依存度	焦炭/成品油 对外依存度
BHPUCS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BMPUCS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BLPUCS	2020	0.04	0.33	0.02
	2025	0.03	0.16	0.01
	2030	0.01	0.06	0.00
BHPDCS	2020	0.13	0.64	0.05
	2025	0.29	0.83	0.06
	2030	0.64	0.95	0.09
BMPDCS	2020	0.13	0.64	0.05
	2025	0.29	0.83	0.06
	2030	0.63	0.95	0.09
BLPDCS	2020	0.13	0.63	0.04
	2025	0.29	0.84	0.06
	2030	0.62	0.95	0.09

放、能源对外依存度和碳减排效果的变化及其交互影响。在模拟过程中,考虑到未来不同的人口变动速率可能会对减排效果产生影响,设定了三种人口增长速率作为不变条件下的基准情景,研究发现:

人口增速高低对于 GDP、能源消费、碳排放、能源对外依存度和碳减排效果影响较小。比较不同的情景模拟发现:

(1)基准情景无法实现 2030 年碳减排 60%~65%目标,减排效果仅能达到 20.11%~22.23%。

(2)国际化石能源价格上升可以达到 53.11%~54.33%的减排效果,而国际化石能源价格下降将使 2030 年目标完全无法实现。

(3)在国际化石能源价格不变时,施加碳税 30 元/t 可以实现 2030 年目标,同时能源对外依存度相对于基准情景变化不大。

(4)在国际化石能源价格波动时,不论其上升还是下降,施加碳税都可以实现 2030 年目标,同时能源安全条件也会有所变化,但相对价格情景变化不大。

因此,国际能源价格波动不但对能源安全状况

产生影响,也对减排效果产生影响,但无法实现 2030 年目标;相对于国际能源价格波动,施加碳税对能源安全状况影响不大,但可以确保 2030 年目标的实现。

4.2 不足与展望

本研究是能源安全与碳减排的政策协同研究的前期阶段,未来扩展主要集中在两个方面:

(1)对能源安全的评估中,对于能源安全状况的考察仅关注到能源对外依存度和能源强度,而这两个指标无法完全涵盖能源安全的全部政策内容。因此,在下一步的进展中,需要引入更多的能源安全指标,如能源生产/消费多样性指数、地缘政治风险指数等^[28]。

(2)碳减排方面,目前中国在广东地区试行的碳市场是基于配额制征税,基本原则是按照“基准线法”来分配并实现扶优限劣,即先进企业获得的配额会相对较多,而落后企业获得的配额相对较少。《广东省发展改革委关于印发广东省 2016 年度碳排放配额分配实施方案的通知》^[29]表明,企业碳排放配额部分免费发放和部分有偿。其中,电力企业的免费配额比例为 95%,钢铁、石化和水泥企业的免费配额比例为 97%。配额有偿发放为竞价形式发放。企业购买配额可以从竞价发放平台购买,也可以从市场交易平台购买,而碳税是对超出配额部分征税,未超出配额部分的碳排放则免于征税。本研究所设置的碳税情景,是对生产部门的碳排放总量进行征税,实际上高估了碳税政策的影响效应。为了解决这个问题,未来需要对企业进行深入调研,理清不同行业的典型企业的碳税配额实际数量,为下一阶段的碳税模拟提供更符合实际的模拟设计。

参考文献(References):

[1] 魏一鸣,吴刚,梁巧梅,等. 中国能源报告(2012): 能源安全研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Wei Y M, Wu G, Liang Q M, et al. China Energy Report (2012): Energy Security Research [M]. Beijing: Science press, 2012.]

[2] Seneviratne S I, Donat M G, Pitman A J, et al. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets [J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 477-483.

2017年12月

- [3] Rogelj J, Den Elzen M, Hohne, N, *et al.* Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 degrees C [J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [4] Boucher O, Bellassen V, Benveniste, H, *et al.* In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(27): 7287-7290.
- [5] Ang S W, Choong W L, Ng T S. Energy security: definitions, dimensions and indexes[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1077-1093.
- [6] Cherp A, Jewell J. The concept of energy security: beyond the four As[J]. *Energy Policy*, 2014, 75: 415-421.
- [7] Vogler J. Changing conceptions of climate and energy security in Europe[J]. *Environmental Politics*, 2013, 22(4): 627-645.
- [8] Nel W P, Cooper C J. Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(1): 166-180.
- [9] Höök M, Tang X. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change-a review[J]. *Energy Policy*, 2013, 52(1): 797-809.
- [10] Soimakallio S, Saikku L. CO₂ emissions attributed to annual average electricity consumption in OECD (the Organization for Economic Co-operation and Development) countries[J]. *Energy*, 2012, 38(1): 13-20.
- [11] Mulhall R A, Bryson J R. Energy price risk and the sustainability of demand side supply chains[J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 327-334.
- [12] Fan J, Wang Q, Sun W. The failure of China's energy development strategy 2050 and its impact on carbon emissions[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 1160-1170.
- [13] Wu K. China's energy security: oil and gas[J]. *Energy Policy*, 2014, 73(6): 4-11.
- [14] Yao L, Chang Y. Shaping China's energy security: the impact of domestic reforms[J]. *Energy Policy*, 2015, 77(11): 131-139.
- [15] Odgaard O, Delman J. China's energy security and its challenges towards 2035[J]. *Energy Policy*, 2014, 71(3): 107-117.
- [16] 谢庆裕, 李振雄. 全国统一碳市场“箭在弦上”: 我国2020年后或开征碳税[EB/OL]. (2016-08-10) [2017-11-01]. <http://gd.people.com.cn/n2/2016/0810/c123932-28809932.html>. [Xie Q Y, Li Z X. The National Carbon Market Is "on the line": China May Impose Carbon Tax after 2020[EB/OL]. (2016-08-10) [2017-11-01]. <http://gd.people.com.cn/n2/2016/0810/c123932-28809932.html>.]
- [17] 石敏俊, 李娜, 袁永娜, 等. 低碳发展的政策选择与区域响应[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Shi M J, Li N, Yuan Y N, *et al.* Low-carbon Development Policy Choices and Regional Responses[M]. Beijing: Science press, 2012.]
- [18] 范英, 姬强, 朱磊, 等. 中国能源安全研究-基于管理科学的视角[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Fan Y, Ji Q, Zhu L, *et al.* China Energy Security: a Perspective of Management Science [M]. Beijing: Science press, 2013.]
- [19] 国家统计局. 2012年中国投入产出表[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Input-Output Table 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.]
- [20] 赵永, 王劲峰. 经济分析CGE模型与应用[M]. 北京: 中国经济出版社, 2008. [Zhao Y, Wang J F. CGE Models and Its Applications in Economic Analysis[M]. Beijing: China Economic Press, 2008.]
- [21] 国家统计局. 中国能源统计年鉴2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.]
- [22] Dong Y, Ishikawa M, Hagiwara T. Economic and environmental impact analysis of carbon tariffs on Chinese exports[J]. *Energy Economics*, 2015, 50: 80-95.
- [23] 中国经济网. 2012全球碳计划报告: 中国人均碳排放量远低于美国[EB/OL]. (2012-12-03) [2017-11-01]. http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201212/03/t20121203_21295830.shtml. [CE.cn. The 2012 Global Carbon Project Report: China's Per Capita Carbon Emissions Are much Lower than that of the United States[EB/OL]. (2012-12-03) [2017-11-01]. http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201212/03/t20121203_21295830.shtml.]
- [24] 凤凰网. 2013年全球碳排放量将创纪录[EB/OL]. (2013-11-21) [2017-11-01]. http://news.ifeng.com/gundong/detail_2013_11/21/31428190_0.shtml. [Ifeng.Com. Global Carbon Emissions Will Create New a Record in 2013[EB/OL]. (2013-11-21) [2017-11-01]. http://news.ifeng.com/gundong/detail_2013_11/21/31428190_0.shtml.]
- [25] BP. Statistical Review of World Energy[EB/OL]. (2016-09) [2017-11-01]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [26] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2015 Revision, Methodology of the United Nations Population Estimates and Projections[R]. Working Paper No. ESA/P/WP.242, 2015.
- [27] 国家统计局. 中国统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.]
- [28] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. 地理学报, 2012, 67(12): 1634-1644. [Liu L T, Shen L, Gao

- T M, *et al.* Chinese energy security evaluation and spatio-temporal evolution characteristics[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(12): 1634-1644.]
- [29] 广东省发改委. 广东省发展改革委关于印发广东省2016年度碳排放配额分配实施方案的通知[EB/OL]. (2016-07-09) [2017-11-01]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-17585-1.html>. [Guangdong Provincial Development and Reform Commission. The Guangdong Development and Reform Commission Issued a Notice on the Implementation of the Implementation Plan for the 2016 Carbon Emission Quota of Guangdong Province[EB/OL]. (2016-07-09) [2017-11-01]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-17585-1.html>.]

Collaborative simulation analysis on international energy price volatility and China's carbon tax policy

ZHONG Shuai^{1,2,3}, SHEN Lei^{1,2}, ZHAO Jian'an^{1,2}, SUN Yanzhi^{1,2}, WU Na^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Transformation and Development Research Center of Resource-Exhausted Cities, Hubei Normal University, Huangshi 435002, China)

Abstract: Energy security and carbon emission mitigation play critical roles in guaranteeing sustainable development. International energy price volatility (IEPV) and carbon tax policy (CTP) have direct impacts on energy costs, and then create effects on energy security and carbon reduction. Previous studies have mostly focused on IEPV or CTP, respectively, based on the assumption that external conditions are invariable. In fact, however, IEPV has become a normal state, which may cause the result that CTP may not achieve emission reduction goals. Therefore, evaluating interactive effects between IEPV and CTP contributes insights to deal with conflict between energy security and carbon reduction. Here, we constructed a China CGE model with industry-energy-carbon emission modules applied to explore interactive effects on the 2030 target of carbon reduction 60%~65% (called the 2030 target), which were created by international fossil energy price volatility and CTP. We found that under the condition without any changes it was predicted that China's energy security would be improved, while carbon emission would reduce by only 20.11%~22.23% and thus not meet the 2030 target. CTP implementation of 30 CNY per ton CO₂ could achieve the 2030 target with mitigation of 66.48%~68.70%, through reducing coal consumption significantly. An increase in international fossil energy price could mitigate the carbon emission by 53.11%~54.33%, while the growth rate of gross domestic products (GDP) would decline. A decrease in international fossil energy price would increase energy dependence and create an impact on China's energy security situation, and China would still fail in the 2030 target. In both scenarios of an increase and decrease in international fossil energy prices, CTP could still achieve the 2030 target with mitigation effects above 60%.

Key words: energy price; carbon tax policy; reduction goal; interactive effects; CGE model; international; China