

基于 CGE 模型的广东省重点行业碳排放上限及减排路径研究

任松彦¹, 汪鹏¹, 赵黛青¹, 戴瀚程²

(1. 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640;

2. 日本国立环境研究所, 筑波 305-8506, 日本)

摘要: 广东省积极尝试应用市场化机制实现碳减排, 目前电力、水泥、钢铁、石化四部门已纳入碳排放权交易。按照《广东碳交易管理办法》, 未来要将纺织、造纸、陶瓷、有色、化工五大工业纳入到碳排放管理体系。研究应用多区域动态CGE模型对广东省工业行业开展量化预测分析, 模型结果表明: 2020年广东省九大工业部门碳交易总量宜控制在3.71亿吨(不包括电力重复计算)。对工业部门碳减排贡献最大的措施是工业行业的能效提高及技术进步, 九部门的减排贡献由大到小分别为: 电力、水泥、石化、钢铁、化工、造纸、有色、纺织、陶瓷。实施碳减排将对GDP带来影响, 其中全部门责任分担(S_1)情景对GDP损失影响最大, 约为1.27%, 而其他三个政策情景($S_2\sim S_4$)对GDP损失影响较小, 均低于1%。

关键词: CGE; 广东; 九部门; 碳交易

中图分类号: FX32; F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2016)07-069-05

Research on Carbon Emissions Cap and Emission Reduction Path of Key Industries in Guangdong Province Based on CGE Model

REN Songyan¹, WANG Peng¹, ZHAO Daiqing¹, DAI Hancheng²

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. The National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan)

Abstract: Guangdong actively tries to apply the market mechanism to achieve carbon emissions reduction. The current four sectors including power, cement, steel, and petrochemicals have been included in the carbon emissions trading. In accordance with the *Guangdong carbon tradings and managements approach*, the future of the Textile, Paper, Ceramics, Nonferrous Metals, and Chemical Industry, the five major industrial will attend carbon emissions trading system. In this study, the CGE model is applied to quantitative analysis of the industry in Guangdong. The results show that the total carbon trading volume of the nine industrial sectors in Guangdong Province in 2020 should be controlled at 3.71 tons (not including the calculation of the electric power). The largest contribution to the industrial sector carbon emissions reduction is the industry's energy efficiency and technological progress, the contribution of the nine sectors of emission reduction are: Electric power, Cement, Petrochemical, Steel, Chemical, Paper, Nonferrous metals, Textiles, and Ceramics. The implementation of carbon emission reduction will have an impact on the GDP, and all of the responsibilities sharing (S_1) scenarios have the greatest impact on GDP, about 1.27%, while the other three policy scenarios ($S_2\sim S_4$) have little effect on GDP, which is less than 1%.

Key words: CGE; Guangdong; nine sector; carbon trading

1 研究背景

作为国家的低碳和碳交易试点省, 广东承担先行先试的历史使命。广东工业行业众多, 地方差异较大, 探索工业部门的碳减排实现路径能为广东省碳排放权交易管理提供重要的参考价值。碳交易市场从2013年12月启动以来, 广东省碳交易二级市场累计成交量约为600万吨, 参与碳交易企业履约正常, 但作为全国碳交易试点的总量最大的省份, 碳市场的流动性及碳交易的减排贡献有待进一步提

高。按照《广东碳交易管理办法》, “十三五”期间将纺织、造纸、陶瓷、有色、化工五大工业行业进一步纳入到碳交易体系中。因此, 如何依据产业政策及部门减排潜力合理设置九大部门的碳排放总量约束, 以及如何测算各行业政策和技术措施对减排目标的贡献和选择合适的路径, 这些问题的研究对广东省实现2020年减排目标及碳市场的活跃度有重要影响。

可计算一般均衡(computable general equilibrium, CGE)

基金项目: 广东省软科学研究计划项目(2015A070704038); 中国科学院院长创新培育基金(y407pc1001)

作者简介: 任松彦(1989~), 男, 研究助理, 从事环境CGE模型研究。

模型作为从上至下的能源-经济-环境综合评估模型,通常被用来研究政策对宏观社会的定量影响。国内外有众多学者利用CGE模型研究碳税、碳交易对整个社会、经济的潜在影响。Goulder用动态CGE模型分析了美国实施碳税政策的经济影响^[1];Gottinger模拟了排放标准、可交易许可制度、碳税等不同温室气体控制政策对欧盟经济的影响^[2];Garbaccio等用不同的时间递推动态CGE模型分析了中国限制CO₂排放的宏观经济影响,并计算了不同间接税补偿方案所带来的效率改进情况^[3]。周晟吕等^[4]建立CGE模型模拟了上海市碳排放交易的环境经济影响,汪鹏等^[5]基于GD_CGE模型对广东省碳排放权交易政策进行了评估,张兴平等^[6]建立CGE的模拟碳税政策对北京社会经济系统的影响, Lu Chuanyi等^[7]分别利用CGE模型对上海、广东、北京、陕西区域碳政策进行分析,研究不同碳政策下对区域经济增长和二氧化碳减排的影响。刘小敏^[8]等利用CGE模型估算了到2020年我国完成减排目标的难易程度,结果显示,产业能源强度下降对完成减排目标帮助很大,而产业结构调整对节能贡献有限。

目前国内外学者研究主要应用CGE模型分析实施碳减排、碳交易、碳税政策对区域能源消费、经济发展、环境效益、碳强度目标的影响,研究大多关注宏观区域或全社会的整体情况,较少针对部门特点、行业减排潜力及路径进行分析。因此本研究针对广东省的九大工业部门的能耗和碳排放情况,依据国家产业政策、行业发展趋势及规模等约束条件,利用CGE模型对九大工业部门未来碳排放上限和减排路径进行分析预测,研究结果可为广东的工业部门碳减排的总量控制、政策制定提供指导依据。

2 广东省工业部门能耗碳排放现状

广东省作为中国能源消费量最大的身份之一,2007年至今能源消费量仍呈现快速上涨的趋势,“十二五”期间由于节能减排措施的大力推行,广东省能源消费量增长速度有一定程度的降低。广东省能源消费量主要集中在工业部门,占总能源消费量的70%以上,与此同时,工业部门的碳排放也占整个广东省碳排放的75%以上。而工业部门数量众多,初期纳入碳交易的四大工业部门电力、水泥、石化、钢铁,以及新增确定纳入碳交易的五个工业部门造纸、纺织、陶瓷、有色金属、化工,此九大工业部门的能源消费总量占整个工业部门的70%以上。虽然九部门能耗增长趋势放缓,但能耗总量仍在增加。而此九大工业部门的工业增加值约占总工业部门工业增加值的25%~30%,因此九大工业部门的节能降碳是完成广东省碳强度目标的重要途径。

2007年以来,广东省九大工业部门的能源消费和碳

排放一直呈现增长趋势,能源消费年均增长速率为5.1%,碳排放年均增长速率为3.9%,能源强度年均下降4.4%(图1),虽然能源消费总量在持续增长,但是碳排放的增长速度要低于能源消费的增长速度,能源消费结构在持续优化。九部门六年的工业增加值年均增长9.9%,九大部门的能源强度六年来下降24%,年均下降4%;碳强度六年下降32%,年均下降6%。四大工业部门碳交易和九大工业部门节能减排效果显著,用较小的能源消费支撑了广东省经济的快速增长,因此未来实行九部门碳交易将进一步降低广东省的碳排放量。

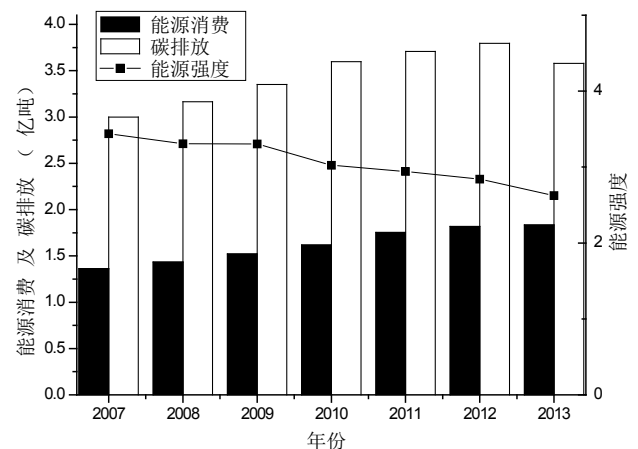


图1 2007~2013年广东省九部门能耗碳排放情况^[9]

3 模型研究方法

CGE模型通常是在一个处于均衡态的经济系统中,对某些变量进行一定程度的政策干扰,在该经济系统再次回到均衡态时,各个经济变量的变化所产生的影响,政策的目标变量选择可根据需要进行设定。ICAP/CGE-GD模型是由中国科学院广州能源研究所与日本国立环境研究所合作开发的广东省两区域动态CGE模型,用于分析广东省经济、能源和气候变化。模型将中国分为广东和中国其他地区两个区域,由生产部门、居民部门、政府部门、国际贸易以及省际贸易5个模块组成。本研究应用多区域广东CGE模型进行能源系统分析,以2007年投入产出表为数据基础,结合能源平衡表和产业统计年鉴数据,建立能源经济环境一般均衡模型。分别对不同的减排方案建立情景模拟,分析不同的总量控制目标的减排效果、峰值情况及实现目标的成本、效益及社会就业情况。

模型中^[10~11]有33个生产部门,其中包括7个能源部门(表1)。所有部门的活动都使用常替代生产函数(constant elasticity of substitution, CES),输入参数包括中间产品,能源商品,初始劳动力和资本,基于能源平衡表,能源商品又分为材料使用及燃料使用。具体的模型公式参考文献[10]~[11]。

表1 生产部门分类

序号	部门名称	序号	部门名称
1	农业	18	钢铁
2	煤炭开采及洗选业	19	有色金属冶炼
3	石油开采业	20	金属制品
4	天然气开采业	21	机械制造
5	矿石开采	22	电子设备制造
6	食品制造业	23	电力、热力生产与供应业
7	纺织	24	燃气生产与供应业
8	木材加工	25	水的生产和供应业
9	造纸	26	建筑业
10	其他制造业	27	道路运输业
11	石油	28	铁路运输业
12	炼焦	29	城市公共客运业
13	化工	30	水上运输业
14	水泥	31	航空运输业
15	其他非金属制造业	32	其他运输业
16	玻璃制造	33	服务业
17	陶瓷制造		

4 情景设置

4.1 历史年份基础参数设置

模型基准年为2007年，其中2007~2013年的广东省GDP增长速度、人口增长速度、新能源发电量均按照《广东省统计年鉴》^[9]和《中国电力年鉴》^[12]设置。能源技术进步设置为每年3%。模型中SAM表采用2007年广东省投入产出表将部门分解合并后平衡而得，其中将电力部门拆分比例，将电力、热力生产与供应业重新划分为：火电机组、天然气发电机组、燃油发电机组、风电和太阳能机组、核电机组、水电机组和垃圾、生物质及其他发电机组7个子部门，7个子部门单独参与投入产出计算，然后汇总为电力部门数据。

4.2 未来年份基础参数设置

“十三五”期间，广东省实现“四个率先，两个定位”的发展目标，粤东西北将大力实现产业振兴，经济仍将保持7%的速度增长，人口增长速度为0.5%，同时要完成能耗强度和碳强度目标分别下降16%和18%（为完成碳强度下降45%）的目标。随着经济增长速度的放缓，工业部门作为广东省能耗大户，承担着节能减排的重要任务。新能源装机量按照《广东省能源发展“十二五”规划》设置，确定2014~2020年广东省各种发电方式的装机容量及发电量。能源技术进步设置为每年5%。其中，基准情景2020年的能源结构按照历史趋势发展，全社会电力装机量为13221万千瓦，煤电8100万千瓦，气电1841万千瓦，核电1397万千瓦，水电1453万千瓦（包括抽蓄），风电250万千瓦，光伏100万千瓦，生物质及垃圾发电80万千瓦。

政策情景 $S_1 \sim S_4$ 到2020年能源结构为：全社会电力装机量为13428万千瓦，煤电6183万千瓦，气电2000万千瓦，核电2400万千瓦，水电1540万千瓦（包括抽蓄），风电800万千瓦，光伏400万千瓦，生物质及垃圾发电

110万千瓦。

4.3 碳限制与强度目标

为了达成中国在哥本哈根气候大会上承诺的到2020年中国碳强度较2005年下降40%~45%的目标，设置广东省减排情景 $S_1 \sim S_4$ 的强度目标为到2020年较2005年下降45%~50%，其中 S_1 情景是各部门承担相同的强度减排目标， S_2 情景是根据减排能力与成本优化分配各部门强度减排目标，情景设置如表2所示。

表2 情景具体参数设置

序号	情景名称	强度目标	能效提高率 (EEI)	能源结构调整 (万千瓦)	碳限制约束
S_0	基准情景		3%	中低速发展	无
S_1	部门均减	下降45%	5%	按照广东新能源装机量设置	各部门下降同样碳强度
S_2	部门优化		5%		各部门优化下降
S_3	九部门限制		5%		九部门设置碳限制，并完成全社会目标
S_4	九部门交易		5%		在 S_3 基础上，增加碳交易政策

S_3 情景是基于 S_2 情景中各部门的排放上限进行设定。依据 S_2 情景计算结果到2020年九大部门碳排放量为电力行业22000万吨，纺织行业616万吨，造纸行业123万吨，石化行业2260万吨，化工行业1801万吨，水泥行业5646万吨，陶瓷行业573万吨，钢铁行业2388万吨，有色金属行业843万吨。参考 S_2 情景计算结果以及综合行业发展现状，产业规划后设置 S_3 情景九大部门2013~2020年碳排放上限增速为电力行业-1%，纺织行业-3%，造纸行业-1%，石化行业1%，化工行业2%，水泥行业2%，陶瓷行业3%，钢铁行业6%，有色金属行业6%。

到2020年九大部门碳排放上限分别为电力行业21000万吨，纺织行业900万吨，造纸行业130万吨，石化行业1600万吨，化工行业1600万吨，水泥行业6300万吨，陶瓷行业600万吨，钢铁行业3200万吨，有色金属行业600万吨，合计3.71亿吨。 S_4 情景为在 S_3 情景基础上增加碳交易。

5 结果分析

5.1 全社会均减 (S_1) 及全社会优化减排 (S_2) 结果分析

图2所示为 $S_0 \sim S_2$ 情景下2020年九部门碳排放量，由图2中可以看出，基准情景 S_0 下预计到2020年九部门碳排放总量为5.05亿吨，而 S_1 和 S_2 情景下2020年九部门碳排放量分别为3.91亿吨和3.71亿吨，这说明当全社会优化减排时，作为碳强度较高和碳排放总量较大的九部门将承担更大的减排责任，在 S_2 情景下，2020年九部门碳排放量分别为电力行业22000万吨，纺织行业616万吨，造纸行业123万吨，石化行业2260万吨，化工行业1801万吨，水泥行业5646万吨，陶瓷行业573万吨，钢

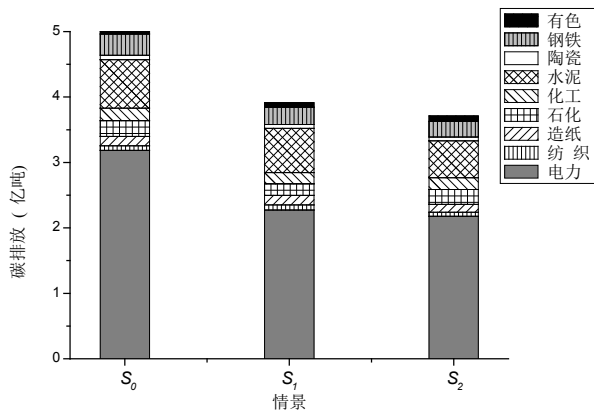


图2 S₀~S₂情景下2020年九部门碳排放量

铁行业 2388 万吨, 有色金属行业 843 万吨。

5.2 九部门限制 (S₃) 和九部门交易 (S₄) 结果分析

而 S₃ 为九部门碳排放限制情景, 对九部门碳排放限制更严格, 到 2020 年九部门碳排放量约为 3.71 亿吨, 约占全社会碳排放量的 49%。S₄ 为九部门碳排放交易情景, 到 2020 年九部门碳排放总量约为 3.71 亿吨。在 S₄ 情景中采用碳排放权交易, 较 S₃ 情景电力、石化、化工、有色部门的碳排放量上升, 纺织、造纸、水泥、钢铁、陶瓷部门的碳排放量下降。这主要是由于各部门的减排成本不同, 碳价格引导各部门根据实际情况经济有效的使用碳资源出现的部门碳排放差异。

而 S₂ 情景 GDP 损失为 0.9%, S₃ 和 S₄ 情景 GDP 损失为 0.93%。其中, 对九部门进行碳限制和碳交易对目前广东省经济影响情况较小, 且较全社会优化情景 GDP 损失增长极小。为了同时保证广东省经济发展和 2020 年碳强度减排目标, 对 9 部门进行碳排放权交易可以经济有效的完成 2020 年广东省碳强度减排目标。

预计到 2020 年, 九部门交易情景(S₄)中九大部门的碳排放总量约为 3.71 亿吨(不考虑重复计算电力)二氧化碳, 较基准情景 5.05 亿吨下降 23%。其中电力部门减排贡献最大, 达到 0.85 亿吨二氧化碳, 而九部门的减排贡献由大到小分别为: 电力、水泥、石化、钢铁、化工、造纸、有色、纺织、陶瓷部门(图 3)。

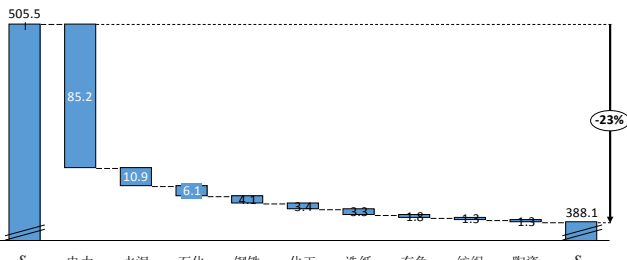


图3 2020年九部门交易情景各部门减排贡献

5.3 九部门限制的平均减排成本

图 4 显示了九部门限制和九部门交易下全社会的平均

减排成本, 其中 S₃ 情景为九部门限制情景, 由于一些减排成本较大, 减排空间不足的行业也需要降低相应的碳强度, 造成行业碳减排成本较大, 因此九部门减排成本较高, 到 2020 年全社会减排成本约为 423 元 / 吨 CO₂。而 S₄ 情景采用了九部门碳交易政策措施, 大大降低了全社会的碳减排成本, 到 2020 年 S₄ 情景的全社会平均碳减排成本为 293 元 / 吨 CO₂。针对九部门的碳交易且完成强度目标, 经济性较高, 可见只针对九部门设置碳约束并进行交易的方案具有成本有效性。

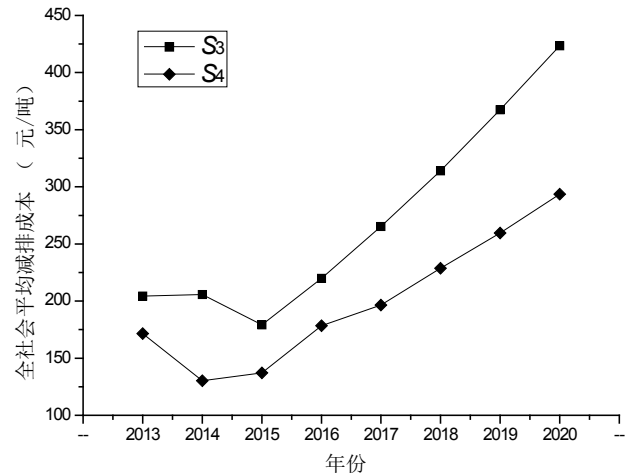


图4 S₃、S₄情景九部门平均减排成本

5.4 政策、部门减排效果分析

本模型中对碳强度下降显著的因素主要有技术进步, 电力结构调整, 部门碳排放限制以及碳交易, 而此四因素的减排贡献如图 5 所示, 由图中可以看出, 2020 年 S₄ 情景较 BAU 情景减排幅度更大, 万元 GDP 碳排放较 BAU 情景下降了 22%。其中, 因为技术进步导致的碳强度下降占整个减排贡献的 54%, 电力结构调整增加导致的碳强度下降占整个减排贡献的 10%, 9 部门碳排放限制占整个减排贡献的 35%, 而碳交易对整个社会碳排放量与 9 部门碳排放限制相同, 但通过 9 部门之间的碳交易优化碳资源配置, 减少了 9 部门的总工业增加值损失, 碳交易带来的碳强度下降约占整个减排贡献的 1%。

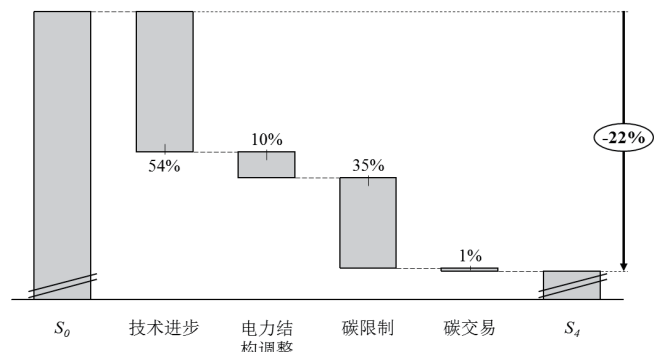


图5 2020年九部门交易情景政策措施贡献

5.5 敏感性分析

敏感性分析通常用来评估 CGE 模型的稳定性, 本模型中主要替代包括燃料替代、要素替代、产品替代等。由于广东省是经济贸易大省, 进出口调入调出体量巨大, 本文主要有通过升高(降低) CGE 模型中的进出口产品替代弹性参数来分析 S_4 情景下 2020 年广东省 GDP、CO₂ 以及碳减排成本的变化(表 3)。

敏感性分析结果表明, 弹性升高(降低) 20% 对广东省 GDP 和碳排放总量影响较小, 均在 1% 以内, 而降低弹性 20% 对碳减排成本影响较大, 达到了 10.03%, 由于碳减排成本在本模型中是内生变量, 因此受部门碳排放上限影响较大。

表3 敏感性分析结果 (S_4 情景, 2020年)

2020 年	基础	弹性提高 20%	幅度	弹性降低 20%	幅度
GDP	864.62	868.29	-0.42%	859.32	0.61%
CO ₂	747.09	752.19	-0.68%	742.96	0.55%
碳减排成本	293.57	291.42	0.73%	323.02	-10.03%

6 结论及政策建议

本研究应用广东多区域 CGE 模型对工业部门的碳排放限值及交易情况进行了详细的分析, 主要结论如下:

(1)九部门实施排放约束, 2014 年九部门总量为 3.52 亿吨, 在未来经济发展同时强度目标约束条件下, 到 2020 年九部门碳排放总量宜控制在 3.71 亿吨(不考虑电力重复计算)。

(2)九部门采用碳排放权交易后, 电力、石化、化工、有色部门的碳排放量上升, 纺织、造纸、水泥、钢铁、陶瓷部门的碳排放量下降, 且全社会平均减排成本显著降低, 到 2020 年约为 293 元 / 吨 CO₂。

(3)九部门采用碳交易后, 广东省 GDP 损失较基准情景(S_0)约损失 0.93%, 略高于全社会优化情景(S_2), 但由于全社会共同参与优化减排短期内难以实现, 因此控制九部门减排是目前广东省实现强度减排的最优选择。

(4)对比四个情景中, 技术进步导致的碳强度下降占整个减排贡献的 54%, 电力部门新能源装机量增加导致的碳强度下降占整个减排贡献的 10%, 9 部门碳排放限制占整个减排贡献的 35%, 而碳交易对整个社会碳排放量与 9 部门碳排放限制相同, 但通过 9 部门之间的碳交易优化碳资源配置, 减少了 9 部门的总工业增加值损失, 碳交易带来的碳强度下降约占整个减排贡献的 1%。☑

参考文献:

[1]Goulder L H. Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: An intertemporal general equilibrium analysis

[J]. Journal of Environmental Economics and Management,1995, 29(3): 271-297.

[2]Gottinger H W. Energy-economy-environmental models with special reference to CO₂ emission control [M]. New York: Springer US, 1998: 151-186.

[3]Garbaccio R, Jorgenson D. Controlling carbon emissions in China [J]. Environment and Development Economics, 1999, 4(4): 493-518.

[4]周晟吕. 基于CGE模型的上海市碳排放交易的环境经济影响分析[J]. 气候变化研究进展, 2015 (2): 144~152.

[5]汪鹏, 戴瀚程, 赵黛青. 基于GD_CGE模型的广东省碳排放权交易政策评估[J]. 环境科学学报, 2015 (2): 77~80.

[6]张兴平, 朱锦晨, 徐岸柳, 等. 基于CGE的碳税政策对北京社会经济系统的影响分析[J]. 生态学报, 2010 (20): 1~10.

[7]Lu C, Zhang X, He J. A CGE analysis to study the impacts of energy investment on economic growth and carbon dioxide emission: A case of Shaanxi Province in western China [J]. Energy, 2010, 35(11): 4319-4327.

[8]刘小敏, 付加锋. 基于CGE模型的2020年中国碳排放强度目标分析[J]. 资源科学, 2011 (4): 634~639.

[9]广东省统计局. 广东省统计年鉴2008~2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008~2014.

[10]Dai H, Masui T, Matsuoka Y, et al. Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM/CGE model [J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2875-2887.

[11]任松彦, 戴瀚程, 汪鹏, 等. 碳交易政策的经济影响: 以广东省为例[J]. 气候变化研究进展, 2015 (1): 61~67.

[12]国家电网公司, 等. 中国电力年鉴2008[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 12.

(责任编辑: 冯胜军)