

碳中和愿景下碳价对我国经济及碳排放的影响分析 ——基于 SICGE 模型的分析

蔡松锋¹,孔祥瑞²,赵凌霄³

(1.国家信息中心,北京 100045;2.解放军 91001 部队,北京 100841;3.国网电子商务有限公司(国网金融科技集团),北京 100053)

摘要:中国已经成为世界上最大的二氧化碳排放国,面临着巨大的减排压力。碳价机制被认为是控制碳排放量、促进减排的有效市场经济手段,已被多个国家和地区当作一项环境政策进行实施和执行。中国目前已经启动了全国统一碳市场,碳价的形成是碳市场的核心要件,从国际市场和国内试点经验看,也是决定市场运行平稳性、有效性,以及减排效果的关键要素。基于此,本文采用可计算一般均衡模型(CGE)等模型和方法,通过政策情景设计和模拟分析就全国统一碳市场下不同碳价路径对 2060 年碳排放和经济的影响进行了对比。

关键词:碳价;CGE;影响;对比

【DOI】10.12231/j.issn.1000-8772.2021.04.000

1 引言

2020 年 9 月 22 日,习主席在第七十五届联合国大会上提出中国“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”这是我国对气候变化做出的重大表态和决心。同时,我国于 2011 年启动 7 省市开展碳交易试点工作,2017 年启动了全国统一碳排放权交易体系,在碳中和愿景下,碳价机制必然会加快,碳价的逐步实施也将加快调整优化产业结构、能源结构,大力发展新能源,从而通过市场化手段支持碳达峰与碳中和目标的实现。

根据公布的《全国碳排放权交易市场建设方案(电力行业)》,该方案就如何分阶段、有步骤地逐步推进碳市场建设做出了规定。该方案中规定,以发电行业为突破口,分三阶段稳步推进碳市场建设工作。第一阶段将侧重基础设施建设,第二阶段模拟运行期将开展发电行业配额模拟交易,第三阶段将进一步深化完善,预计 2020 年前后启动配额现货交易。交易仅以履约为目的,在发电行业碳市场稳定运行的前提下,将逐步扩大市场覆盖范围。碳排放权交易体系有望成为中国实现其《巴黎协定》中在 2030 年左右达峰承诺的关键工具。

已有的文献主要讨论了中国当前合理的碳价水平。孙睿等(2014)利用静态 CGE 模型模拟发现,碳价在 25.3-131.6 欧元/tCO₂ 之间比较合理。Li and Lu (2015)将动态 CGE 模型和计量经济学模型结合起来,分析结果认为中国碳市场在 2016-2020 年的碳价保持在 30-50 元/tCO₂ 之间比较理想。Liu and Li (2017)采用边际减排成本法(影子价格)分析发现,中国各省区之间进行碳交易的均衡价格为 241 元/tCO₂。Tang et al. (2016)利用 CGE 模型模拟,认为中国为了实现在哥本哈根气候大会上做出的 2020 年的减排承诺,碳价应该保持在 36-40 元/tCO₂ 之间。Fan and Todorova (2017)指出,中国碳市场当前仍处于初始阶段,碳价格的形成基础较为薄弱,碳市场的效率相比 EU-ETS 仍比较低。

当前关于碳价文献主要集中在合理碳价的选择以及影响上,针对长时间跨度碳价路径的影响研究较少。本文通过政策情景设计不同碳价路径和的影响进行了对比。

2 研究方法和模拟情景

2.1 研究方法

本文采用的 SICGE(State Information Center General Equilibrium)模型是由国家信息中心与澳大利亚莫纳什大学政策研究中心(CoPS)联合开发的中国经济-能源-环境动态可计算一般均衡模型,模型结构和框架如图 1 所示。SICGE 模型加入了一系列动态化的元素,如投资-资本存量跨期动态链接和劳动力市场的动态调整机制等。在模型改进方面,第一,基于中国最新的 2017 年投入产出表对模型数据库进行了更新;第二,最新版的 SICGE 模型包含 65 个行业部门,其中将电力行业拆分为火电、风电、水电、太阳能发电和核电共 5 种发电类型;第三,SICGE 模型加入了分行业能源产品的替代机制,考虑了能源价格变化对能源产品相互替代的影响;第四,加入碳税和碳交易模块,将碳价格引入到模型中,可以模拟碳价变化对能源价格的影响,可用于分析气候变化问题。

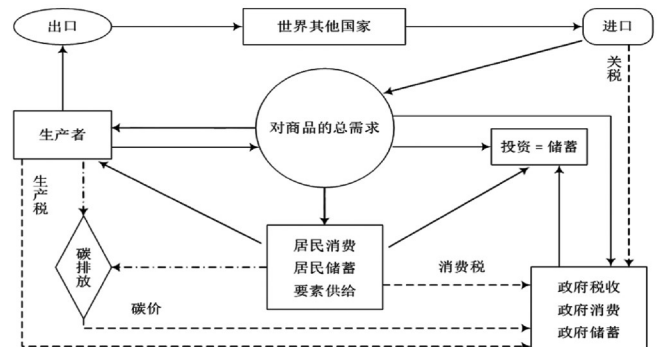


图 1 SICGE 模型结构框架

2.2 模拟情景

根据研究目的,本文选择了 6 个碳价路径情景进行研究,如表 1 所示,6 个情景分为两组,第一组为起始碳价不同,2060 年最终碳价相同,共有 3 个情景,见表中情景 1、情景 2 和情景 3。第二组为起始碳价相同,2060 年最终碳价不同,共有 3 个情景,见表中情景 4、情景 5 和情景 6。

3 模拟结果

3.1 碳排放量

通过对比第一组的三个情景,高初始碳价能够实现中长期更大

表 1 本研究设置的不同政策情景

模拟情景	具体介绍
起始碳价不同, 2060 年最终碳价相同	情景 1 2022 年起始碳价为 50 元/吨二氧化碳,以后每年增长 10 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 430 元/吨二氧化碳。
	情景 2 2022 年起始碳价为 100 元/吨二氧化碳,以后每年增长 7.5 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 430 元/吨二氧化碳。
	情景 3 2022 年起始碳价为 150 元/吨二氧化碳,以后每年增长 10 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 430 元/吨二氧化碳。
起始碳价相同, 2060 年最终碳价不同	情景 4 2022 年起始碳价为 100 元/吨二氧化碳,以后每年增长 10 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 480 元/吨二氧化碳。
	情景 5 2022 年起始碳价为 100 元/吨二氧化碳,以后每年增长 15 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 670 元/吨二氧化碳。
	情景 6 2022 年起始碳价为 100 元/吨二氧化碳,以后每年增长 20 元/吨二氧化碳,2060 年碳价达到 860 元/吨二氧化碳。

幅度的减排。情景 1、情景 2 和情景 3 的初始碳价分别为 50、100 和 150 元/吨二氧化碳,3 个情景下 2060 年的最终碳价相同,到 2060 年情景 1、情景 2 和情景 3 的碳排放相对基准情景的下降幅度分别为 12.9%、14.0%和 15.0%。

通过对比第二组的三个情景,碳价的上升幅度和碳减排幅度成正比,情景 4、情景 5 和情景 6 的初始碳价都是 100 元/吨二氧化碳,情景 4、情景 5 和情景 6 下 2060 年的最终碳价分别为 480、670 和 860 元/吨二氧化碳,到 2060 年情景 4、情景 5 和情景 6 的碳排放相对基准情景的下降幅度分别为 14.9%、18.1%和 20.6%。

就各行业碳减排情况而言,以情景 6 为例,(1)能源行业碳排放下降幅度最大,相对于基准情景,到 2060 年的碳排放下降幅度超过了 30%以上,主要包括石脑油(-42.2%)、其他油品(-41.4%)、液化石油气(-41.2%)、煤油(-40.3%)、燃油(-40.1%)、汽油(-40.1%)、柴油(-39.7%)、其他制造产品和废品废料(-39.6%)、炼焦(-33.1%)和燃气生产(-30.3%)。(2)部分能源行业及能源密集型行业到 2060 年下降幅度在 20%以上,主要包括煤制气(-29.2%)、新型石油(-24.9%)、石油和天然气开采产品(-24.9%)、传统石油(-24.2%)、住宿和餐饮(-23.4%)、金属制品(-23.2%)、煤炭开采和洗选产品(-22.5%)、电网(-22.0%)、金属矿采选产品(-21.7%)、金属冶炼和压延加工品(-21.6%)、电力服务(-21.3%)、气电(-21.0%)和和化学产品(-20.9%)。(3)其他低碳能源行业以及服务业的碳排放下降幅度在 20%以下。

3.2 经济社会影响

3.2.1 GDP

总体而言,因碳价导致的 GDP 损失总体上较小,随着碳价的提高,GDP 损失逐年增大。2060 年,情景一、情景二、情景三 GDP 相对基准情景的下降幅度分别为 0.86%、0.92%、0.97%,这说明在 2060

年最终碳价相同的情况下,前三个情景对 GDP 大的影响差异不大。情景四、情景五和情景六 GDP 相对基准情景的下降幅度分别为 1.00%、1.31%、1.61%,这说明随着最终碳价的提高,GDP 的下降幅度加大,GDP 相对基准情景下降幅度与最终碳价的高低成正比。

3.2.2 行业产出

就行业产出变化而言,以情景 6 为例。

(1)受冲击和影响最大的行业为能源行业,2060 年,产出下降超过 4%以上的行业有炼焦(-28.1%)、煤制气(-24.5%)、煤炭开采和洗选产品(-9.5%)、柴油(-8.7%)、燃油(-8.0%)、汽油(-7.7%)、煤油(-7.5%)、液化石油气(-6.0%)、其他油品(-5.7%)、燃气服务(-5.3%)、燃气网(-5.2%)、燃气生产(-5.2%)、通信设备、计算机和其他电子设备(-5.1%)、煤化工(-5.1%)、金属矿采选产品(-5.0%)、石脑油(-4.7%)和煤电(-4.5%)。

(2)行业产出下降在 2%以下的行业有金属制品、机械和设备修理服务(-3.9%)、电气机械和器材(-3.9%)、化学产品(-3.9%)、纺织品(-3.7%)、热力生产供应(-3.6%)、仪器仪表(-3.6%)、通用设备(-3.6%)、金属冶炼和压延加工品(-3.5%)、金属制品(-3.0%)、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品(-3.0%)、造纸印刷和文教体育用品(-3.0%)、煤制油(-2.8%)、交通运输、仓储和邮政(-2.7%)、木材加工品和家具(-2.7%)、专用设备(-2.3%)、气电(-2.2%)、和批发和零售(-2.2%)。

(3)行业产出下降在 2%以下的行业有交通运输设备(-1.9%)、非金属矿和其他矿采选产品(-1.9%)、水生产供应(-1.8%)、租赁和商务服务(-1.8%)、非金属矿物制品(-1.8%)、电网(-1.6%)、电力服务(-1.5%)、金融(-1.3%)、水利、环境和公共设施管理(-1.2%)、综合技术服务(-1.2%)、卫生和社会工作(-1.2%)、食品和烟草(-1.2%)、住宿和餐饮(-1.1%)、居民服务、修理和其他服务(-1.0%)、

表 2 本研究设置的不同碳价路径

	2022	2030	2035	2040	2050	2060
情景一	50	130	180	230	330	430
情景二	100	170	213	256	343	430
情景三	150	210	247	284	359	430
情景四	100	180	230	280	380	480
情景五	100	220	295	370	520	670
情景六	100	260	360	460	660	860

表 3 不同情景下碳排放量相对基准情景变化情况(%)

	2025	2030	2035	2040	2050	2060
情景一	-6.7	-9.4	-11.0	-11.9	-12.7	-12.9
情景二	-9.7	-11.8	-12.9	-13.4	-13.9	-14.0
情景三	-12.4	-14.1	-14.7	-14.9	-15.0	-15.0
情景四	-10.0	-12.4	-13.6	-14.3	-14.8	-14.9
情景五	-11.0	-14.3	-16.1	-17.1	-18.0	-18.1
情景六	-11.9	-16.0	-18.3	-19.6	-20.6	-20.6

表 4 不同情景下碳排放量情况(亿吨)

	2025	2030	2035	2040	2050	2060
基准情景	103.7	106.6	104.8	98.3	73.5	40.0
情景一	96.8	96.6	93.4	86.6	64.1	34.9
情景二	93.7	94.0	91.4	85.1	63.3	34.4
情景三	90.9	91.6	89.4	83.6	62.4	34.0
情景四	93.4	93.4	90.6	84.3	62.6	34.0
情景五	92.4	91.4	88.0	81.5	60.2	32.8
情景六	91.4	89.5	85.7	79.0	58.3	31.7

表 5 2060 年各行业碳排放量相对基准情景变化情况(单位:%)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
农林牧渔产品和服务	-8.6	-9.6	-10.5	-10.4	-13.0	-15.3
煤炭开采和洗选产品	-12.2	-14.0	-15.7	-15.1	-19.0	-22.5
石油和天然气开采产品	-15.7	-16.5	-17.3	-17.7	-21.6	-24.9
传统石油	-15.3	-16.0	-16.8	-17.1	-21.0	-24.2
传统天然气	-6.6	-6.9	-7.3	-7.4	-9.2	-10.7
新型石油	-15.7	-16.5	-17.3	-17.7	-21.6	-24.9
新型天然气	-3.4	-3.0	-2.7	-3.6	-6.0	-8.3
金属矿采选产品	-13.0	-13.9	-14.9	-15.0	-18.6	-21.7
非金属矿和其他矿采选产品	-8.3	-9.5	-10.5	-10.2	-12.6	-14.7
食品和烟草	-6.1	-8.1	-9.9	-8.6	-10.3	-11.7
纺织品	-8.6	-10.7	-12.6	-11.4	-13.7	-15.7
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	-6.6	-8.4	-9.9	-8.9	-10.8	-12.4
木材加工品和家具	-6.6	-8.0	-9.2	-8.6	-10.5	-12.3
造纸印刷和文教体育用品	-6.8	-8.9	-10.7	-9.5	-11.5	-13.2
汽油	-28.3	-27.8	-27.6	-29.7	-35.6	-40.1
柴油	-27.9	-27.5	-27.3	-29.4	-35.3	-39.7
煤油	-28.5	-28.1	-27.8	-30.0	-35.9	-40.3
燃油	-28.3	-27.9	-27.6	-29.8	-35.7	-40.1
液化石油气	-29.3	-28.8	-28.5	-30.7	-36.7	-41.2
石脑油	-30.1	-29.6	-29.3	-31.6	-37.7	-42.2
其他油品	-29.5	-29.0	-28.7	-30.9	-37.0	-41.4
炼焦	-21.3	-23.1	-24.8	-24.6	-29.3	-33.1
煤制油	-3.7	-5.9	-7.8	-6.2	-7.2	-8.1
煤制气	-18.2	-20.0	-21.7	-21.3	-25.7	-29.2
煤化工	-4.9	-7.2	-9.1	-7.6	-8.9	-10.0
化工产品	-12.8	-14.0	-15.1	-14.9	-18.2	-20.9
非金属矿物制品	-6.8	-8.6	-10.2	-9.2	-10.9	-12.5
金属冶炼和压延加工品	-13.8	-14.5	-15.3	-15.5	-18.9	-21.6

表 6 不同情景下 GDP 相对基准情景变化情况(%)

	2025	2030	2035	2040	2050	2060
情景一	-0.43	-0.62	-0.69	-0.70	-0.71	-0.86
情景二	-0.69	-0.84	-0.83	-0.77	-0.74	-0.92
情景三	-0.94	-1.05	-0.96	-0.84	-0.77	-0.97
情景四	-0.71	-0.89	-0.89	-0.84	-0.82	-1.00
情景五	-0.80	-1.08	-1.15	-1.12	-1.10	-1.31
情景六	-0.88	-1.27	-1.40	-1.40	-1.38	-1.61

其他制造产品和废品废料(-0.9%)、公共管理、社会保障和社会组织(-0.9%)、信息传输、软件和信息技术服务(-0.8%)、文化、体育和娱乐(-0.7%)、研究和试验发展(-0.7%)、农林牧渔产品和服务(-0.5%)、建筑(-0.5%)、石油和天然气开采产品(-0.3%)、新型石油(-0.3%)、传统石油(-0.3%)、教育(-0.2%)和房地产(-0.2%)(4)行业产出上升的行业有传统天然气(1.2%)、新型天然气(2.5%)、核电(7.0%)、新能源电(7.0%)和水电(7.0%)。

3.2.3 其他宏观经济变量

2060年,碳价对出口的冲击和影响要远大于对进口、消费和投资的冲击,就业受到的冲击和影响相对较低。以S6为例,2060年投资、消费、出口和进口相对于基准情景分别下降0.47%、0.85%、15.68%和3.3%,就业相对于基准情景下降0.27%。

4 主要结论和建议

通过设置两组6个模拟情景对比分析不同碳价路径的影响,模拟发现,总体上看,碳价政策对经济的影响较小,对能源结构向低碳调整能起到较大刺激作用。分情景来看,第一组的三个情景场对经济的冲击和影响差异较小,较高的起始碳价能够实现更大程度的碳

减排。第二组的三个情景对经济的冲击和影响差异较大,越高的碳价实现的减排幅度也更大。

根据模拟结果,提出以下建议。

建议起始碳价控制在100元/吨二氧化碳,这样既能有利于中长期的碳减排效果更好发挥,同时有利于碳市场的活跃度。

建议保持碳价的稳定增长,进一步刺激减排效果的同时,保持碳价稳定增长也能够稳定低碳投资预期。

建议积极推动节能减排技术攻关并发展绿色低碳经济,进一步提升经济发展的潜在增长率,从而对冲碳价下相对价格变化对经济的冲击。

参考文献

- [1]Jiang, J.J., Xie, D.J., Ye, B., Shen, B., Chen, Z.M., 2016. Research on China's cap-and-trade carbon emission trading scheme: Overview and outlook [J]. Applied Energy 178, 902-917.
- [2]范英,莫建雷,朱磊.2016.中国碳市场:政策设计与社会影响研究[M].北京:科学出版社.
- [3]Wang, K., Zhang, X., Wei, Y.M., Yu, S.W., 2013. Regional

表 7 2060 年不同情景下各行业产出相对基准情景变化情况(单位:%)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
农林牧渔产品和服务	-0.29	-0.32	-0.34	-0.34	-0.43	-0.52
煤炭开采和洗选产品	-5.17	-5.23	-5.35	-5.75	-7.67	-9.46
石油和天然气开采产品	-0.16	-0.18	-0.20	-0.19	-0.26	-0.32
传统石油	-0.15	-0.17	-0.19	-0.18	-0.24	-0.30
传统天然气	0.70	0.70	0.71	0.77	0.99	1.17
新型石油	-0.15	-0.17	-0.19	-0.19	-0.25	-0.32
新型天然气	1.79	1.79	1.80	1.91	2.24	2.48
金属矿采选产品	-2.77	-2.94	-3.11	-3.20	-4.14	-5.02
非金属矿和其他矿采选产品	-1.03	-1.08	-1.13	-1.18	-1.54	-1.87
食品和烟草	-0.62	-0.65	-0.69	-0.71	-0.94	-1.15
纺织品	-2.04	-2.09	-2.15	-2.29	-3.02	-3.71
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	-1.63	-1.68	-1.73	-1.84	-2.43	-2.99
木材加工品和家具	-1.49	-1.52	-1.56	-1.67	-2.20	-2.71
造纸印刷和文教体育用品	-1.65	-1.70	-1.74	-1.86	-2.43	-2.98
汽油	-4.44	-4.56	-4.70	-4.97	-6.39	-7.66
柴油	-5.05	-5.17	-5.31	-5.63	-7.27	-8.73
煤油	-4.35	-4.47	-4.61	-4.87	-6.27	-7.51
燃油	-4.62	-4.74	-4.87	-5.16	-6.65	-7.98
液化石油气	-3.50	-3.64	-3.78	-3.95	-5.05	-6.02
石脑油	-2.75	-2.90	-3.04	-3.14	-3.97	-4.71
其他油品	-3.29	-3.43	-3.57	-3.72	-4.75	-5.65
炼焦	-18.36	-18.61	-19.08	-19.98	-24.45	-28.05
煤制油	-1.30	-1.48	-1.66	-1.62	-2.21	-2.83
煤制气	-15.61	-15.82	-16.20	-17.04	-21.13	-24.48
煤化工	-2.81	-3.02	-3.24	-3.28	-4.21	-5.08
化学产品	-2.19	-2.29	-2.38	-2.49	-3.23	-3.91
非金属矿物制品	-1.01	-1.05	-1.08	-1.14	-1.48	-1.79
金属冶炼和压延加工品	-1.97	-2.07	-2.16	-2.25	-2.92	-3.55
金属制品	-1.71	-1.74	-1.78	-1.91	-2.50	-3.04
通用设备	-1.98	-2.02	-2.06	-2.21	-2.90	-3.55
专用设备	-1.29	-1.33	-1.36	-1.45	-1.91	-2.34
交通运输设备	-1.06	-1.09	-1.11	-1.19	-1.57	-1.92
电气机械和器材	-2.17	-2.21	-2.24	-2.42	-3.19	-3.92
通信设备、计算机和其他电子设备	-2.79	-2.83	-2.86	-3.11	-4.13	-5.12
仪器仪表	-1.95	-2.00	-2.04	-2.19	-2.90	-3.58
其他制造产品和废品废料	-0.53	-0.53	-0.53	-0.58	-0.76	-0.94
金属制品、机械和设备修理服务	-2.20	-2.25	-2.31	-2.46	-3.22	-3.93
煤电	-2.41	-2.50	-2.59	-2.74	-3.64	-4.53
气电	-1.21	-1.31	-1.39	-1.43	-1.86	-2.24
水电	3.97	4.05	4.16	4.43	5.79	7.05
核电	3.93	4.01	4.11	4.38	5.73	6.97
新能源电	3.94	4.02	4.12	4.40	5.74	6.99
电网	-0.75	-0.80	-0.83	-0.88	-1.24	-1.61
电力服务	-0.68	-0.72	-0.76	-0.80	-1.12	-1.47
热力生产供应	-2.02	-2.09	-2.16	-2.28	-2.97	-3.61
燃气生产	-3.02	-3.13	-3.25	-3.40	-4.36	-5.21
燃气网	-3.03	-3.15	-3.26	-3.42	-4.38	-5.24
燃气服务	-3.04	-3.15	-3.27	-3.43	-4.39	-5.25
水生产供应	-0.98	-1.03	-1.07	-1.12	-1.48	-1.82
建筑	-0.28	-0.29	-0.30	-0.32	-0.41	-0.50
批发和零售	-1.24	-1.28	-1.32	-1.40	-1.82	-2.21
交通运输、仓储和邮政	-1.55	-1.60	-1.65	-1.74	-2.27	-2.75
住宿和餐饮	-0.63	-0.66	-0.68	-0.72	-0.94	-1.15
信息传输、软件和信息技术服务	-0.45	-0.47	-0.48	-0.51	-0.68	-0.83
金融	-0.75	-0.78	-0.81	-0.85	-1.10	-1.33
房地产	-0.09	-0.11	-0.12	-0.11	-0.14	-0.17
租赁和商务服务	-1.00	-1.03	-1.07	-1.13	-1.48	-1.80
研究和试验发展	-0.37	-0.38	-0.39	-0.42	-0.55	-0.68
综合技术服务	-0.67	-0.69	-0.72	-0.76	-0.99	-1.22
水利、环境和公共设施管理	-0.67	-0.71	-0.74	-0.77	-1.00	-1.22
居民服务、修理和其他服务	-0.58	-0.61	-0.64	-0.66	-0.86	-1.04
教育	-0.11	-0.14	-0.16	-0.15	-0.17	-0.20
卫生和社会工作	-0.63	-0.68	-0.71	-0.74	-0.96	-1.17
文化、体育和娱乐	-0.40	-0.43	-0.45	-0.46	-0.60	-0.74
公共管理、社会保障和社会组织	-0.46	-0.51	-0.55	-0.55	-0.71	-0.86

注:表中正值表示该行业产出相对基准情景上升,负值表示该行业产出相对基准情景下降。

表 8 2060 年不同情景下主要宏观经济变量变化情况(单位:%)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
投资	-0.26	-0.27	-0.27	-0.29	-0.38	-0.47
消费	-0.46	-0.50	-0.54	-0.55	-0.70	-0.85
出口	-8.83	-8.90	-8.98	-9.75	-12.82	-15.68
进口	-2.95	-2.83	-2.75	-2.96	-3.24	-3.30
就业	-0.17	-0.16	-0.15	-0.17	-0.22	-0.27

allocation of CO₂ emissions allowance over provinces in China by 2020 [J]. *Energy Policy* 54,214-229.

[4]Miao, Z., Geng, Y., Sheng, J.C., 2016. Efficient allocation of CO₂ emissions in China: a zero sum gains data envelopment model [J]. *Journal of Cleaner Production* 112, 4144-4150.

[5]Yi, W.J., Zou, L.L., Guo, J., Wang, K., Wei, Y.M., 2011. How can China reach its CO₂ intensity reduction targets by 2020? A regional allocation based on equity and development [J]. *Energy Policy* 39,2407-2415.

[6]Chang, K., Chang, H., 2016. Cutting CO₂ intensity targets of interprovincial emissions trading in China [J]. *Applied Energy* 163, 211-221.

[7]Chang, K., Zhang, C., Chang, H., 2016. Emissions reduction allocation and economic welfare estimation through interregional emissions trading in China: Evidence from efficiency and equity [J]. *Energy* 113,1125-1135.

[8]Zhang, Y.J., Hao, J.F., 2015. The allocation of carbon emission intensity reduction target by 2020 among provinces in China [J]. *Natural Hazards* 79,921-937.

[9]Wei, C., Ni, J.L., Du, L.M., 2012. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China [J]. *China Econ. Rev.* 23,552-565.

[10]Zhou, P., Zhang, L., Zhou, D.Q., Xia, W.J., 2013. Modeling economic performance of interprovincial CO₂ emission reduction quota trading in China [J]. *Applied Energy* 112,1518-1528.

[11]An, Q.X., Wen, Y., Xiong, B.B., Yang, M., Chen, X.H., 2017. Allocation of carbon dioxide emission permits with the minimum cost for Chinese provinces in big data environment [J]. *Journal of Cleaner Production* 142,886-893.

[12]Zhou, Z.B., Liu, C.J., Zeng, X.M., Jiang, Y., Liu, W.B., 2018. Carbon emission performance evaluation and allocation in Chinese cities [J]. *Journal of Cleaner Production* 172,1254-1272.

[13]Zhang, Y.J., Wang, A.D., Da, Y.B., 2014. Regional allocation of carbon emission quotas in China: Evidence from the Shapley value method [J]. *Energy Policy* 74,454-464.

[14]Yu, S.W., Wei, Y.M., Wang, K., 2014. Provincial allocation of carbon emission reduction targets in China: An approach based on improved fuzzy cluster and Shapley value decomposition [J]. *Energy Policy* 66,630-644.

[15]Zhou, P., Sun, Z.R., Zhou, D.Q., 2014. Optimal path for controlling CO₂ emissions in China: A perspective of efficiency analysis [J]. *Energy Econ.* 45,99-110.

[16]Qin, Q.D., Liu, Y., Li, X., Li, H.N., 2017. A multi-criteria decision analysis model for carbon emission quota allocation in China's east coastal areas: Efficiency and equity [J]. *Journal of Cleaner Production* 168,410-419.

[17]Li, L.X., Li, Y.N., Ye, F., Zhang, L., 2018a. Carbon dioxide emissions quotas allocation in the Pearl River Delta

region: Evidence from the maximum deviation method [J]. *Journal of Cleaner Production* 177,207-217.

[18]Liu, H.X., Li, Z., 2017. Carbon cap-and-trade in China: a comprehensive framework [J]. *Emerging Markets Finance and Trade* 53,1152-1169.

[19]Yuan, Y.N., Shi, M.J., Li, N., Zhou, S.L., 2012. Intensity allocation criteria of carbon emissions permits and regional economic development in China -based on a 30 -province/autonomous region computable general equilibrium model [J]. *Advances in Climate Change Research* 3,154-162.

[20]Jiang, J.J., Ye, B., Xie, D.J., Li, J., Miao, L.X., Yang, P., 2017. Sector decomposition of China's national economic carbon emissions and its policy implication for national ETS development [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 855-867.

[21]Tang, L., Shi, J.R., Bao, Q., 2016. Designing an emissions trading scheme for China with a dynamic computable general equilibrium model [J]. *Energy Policy* 97,507-520.

[22]Zhou, J.T., Duan, M.S., Liu, C.M., 2011. Output-based allowance allocations under China's carbon intensity target [J]. *Energy Procedia* 5,1904-1909.

[23]Zhang, Y.J., Hao, J.F., 2016. Carbon emission quota allocation among China's industrial sectors based on the equity and efficiency principles [J]. *Annals of Operations Research* 255,117-140.

[24]Yang, B.C., Liu, C.Z., Su, Y.P., Jing, X., 2017. The allocation of carbon intensity reduction target by 2020 among industrial sectors in China [J]. *Sustainability* 9,148.

[25]Zhao, R., Min, N., Geng, Y., He, Y.L., 2017. Allocation of carbon emissions among industries/sectors: An emissions intensity reduction constrained approach [J]. *Journal of Cleaner Production* 142,3083-3094.

[26]Liao, Z.L., Zhu, X.L., Shi, J., 2015. Case study on initial allocation of Shanghai carbon emission trading based on Shapley value [J]. *Journal of Cleaner Production* 103,338-344.

[27]Ma, C.Q., Ren, Y.S., Zhang, Y.J., Sharp, B., 2018. The allocation of carbon emission quotas to five major power generation corporations in China [J]. *Journal of Cleaner Production* 189,1-12.

[28]Qiu, R., Xu, J.P., Zeng, Z.Q., 2017. Carbon emission allowance allocation with a mixed mechanism in air passenger transport [J]. *Journal of Environmental Management* 200, 204-216.

[29]Tang, L., Shi, J.R., Bao, Q., 2016. Designing an emissions trading scheme for China with a dynamic computable general equilibrium model [J]. *Energy Policy* 97,507-520.

[30]Zhang, L.R., Li, Y.K., Jia, Z.J., 2018. Impact of carbon allowance allocation on power industry in China's carbon trading market: Computable general equilibrium based analysis [J]. *Applied Energy* 229,814-827.