

# 气候变化对中国经济系统的影响及评估方法评述

付雨晴 丑洁明 董文杰

(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 基于经济学的视角, 通过搜集气候变化对经济系统各方面的影响与评估方法研究的相关文献, 发现我国气候显著的区域特征、经济系统的复杂性, 导致我国不同地区、不同行业受到气候变化影响的因素和程度皆有所不同。目前研究气候变化经济影响的方法主要有以模型为依据的经验统计法、自然机理法和经济机理法以及其他非模型法。经济机理法是本文研究方法的分析重点, 主要有成本效益法、生产函数法和均衡分析法。通过评价发现, 经济机理法研究气候变化经济影响的局限性在于模型的动态模拟和对气候变化的长期预估能力, 这两方面亟需改进。

**关键词:** 气候变化, 经济系统, 经济影响, 评估方法

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.005

## Impact and Its Assessment Methods of Climate Change on the Economic System of China

Fu Yuqing, Chou Jieming, Dong Wenjie

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** Against the background of global climate change, we use the thinking pattern of economic analysis with large numbers of literature about the impact of climate change on the economic system and their assessment methods, only to find that the influences of climate change on different regions and different trades are different, because of our country's climate geographical characters and economic complexity. Nowadays, assessment methods of climate change on the economic system could be divided into Model Analysis such as Empirical Statistical Analysis (ESA), Natural Mechanism Analysis (NMA) and Economic Mechanism Analysis (EMA) and Model-independent analysis. EMA is the key point to be analyzed in this paper, which is combined with Cost-benefit Approach, Production Function Method and Equilibrium Analysis Method. Finally, we find that what we need to do next with the assessment research is to improve the dynamic analysis and long-term estimate ability of our models.

**Keywords:** climate change, economic system, economic impact, assessment method

### 1 引言

研究表明<sup>[1]</sup>, 除非采取重大的行动, 否则到2100年, 大气中CO<sub>2</sub>的浓度水平将达到工业化以前的两倍, 全球平均气温将比1900年升高1.4~5.8℃。值得注意的是, 气候变化不仅仅是全球平均气温增加的问题, 它存在温度、湿度、光照、气候事件等在区域上的复杂差异性<sup>[2]</sup>。这种以变暖为主要特征的气候变化状况对世界各国的社会经济系统都会有不同程度的影响。1991—2000年间, 气象灾害造成全球财产损失达500~1000亿美元/a, 预测21世纪该数字将达到约3000

多亿美元/a<sup>[3]</sup>。中国作为发展中的大国, 气候变化对其经济带来的影响不容忽视。Fankhauser<sup>[4]</sup>计算出气候变化对中国社会经济系统的影响达到GDP的4.7%; 罗慧<sup>[5]</sup>利用带一阶自回归变量分析得到中国1984—2006年的中国GDP总值对气象条件变化的敏感性影响约为12.36%; 而作为我国主要行业的农业, 农作物产量受气候变化影响导致的粮食安全問題日益突出, 2030年我国粮食生产将存在7%~8%的缺口<sup>[6]</sup>。预计到2050年, 中国人均GDP约为1万美元, 总人口为15.4~15.8亿, 气候变化对中国经济的影响将更为严峻<sup>[7]</sup>。因此, 研究气候变化对中国等发展中国家经济系统的影响是极具价值与意义的<sup>[8, 9]</sup>。经济本身是一个非常复杂的系统<sup>[10]</sup>, 气候变化对经济系统的影响包括直接影响和包括政策在内的适应与减排带来的间接经济影响两个方面<sup>[11]</sup>。因而, 探究气候变化对经济系统影响的科学评估方法亦是该领域的难点和热点问题。

收稿日期: 2012年9月27日; 修回日期: 2013年2月26日  
 第一作者: 付雨晴(1988—), Email: fuyuqing7@163.com  
 通信作者: 丑洁明(1965—), Email: choujm@bnu.edu.cn  
 资助信息: 国家重大科学研究计划(2012CB955700);  
 国家自然科学基金项目(41175125)

## 2 资料选取

通过对以往相关研究的梳理, 本文尝试从三个角度对经济系统进行界定。第一是理论划分法: 依据理论, 经济学可以划分为微观经济学和宏观经济学, 因此, 可以将经济系统划分为微观经济系统和宏观经济系统。第二是地域划分法: 依据气候条件相似原则与行政区域完整原则, 结合研究需要将中国划分为七大不同区域, 进行气候变化影响的研究。其中, 华北地区包括北京市、天津市、河北、山西和内蒙古; 东北地区包括辽宁、吉林和黑龙江; 华东地区包括上海市、江苏、浙江、安徽、江西、福建、山东和台湾; 华中地区包括湖北、湖南、河南; 华南地区包括广东、广西、海南、香港和澳门; 西南地区包括四川、云南、贵州、重庆和西藏; 西北地区包括陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆。第三是行业与部门划分法: 研究气候变化对经济系统的影响应尽可能涵盖整个国民经济体系内的所有行业和部门, 包括农业、林业、畜牧业、渔业、水资源、环境、基础设施、生态系统、人类健康、国家安全等。通过这些划分与界定, 各研究领域的学者既可以从不同角度研究气候变化对经济系统的影响, 又可以直接考虑对整个经济系统的影响。

目前有很多数学模型来评估气候变化的经济影响<sup>[12]</sup>, 但多是基于政策的综合评价, 本文的重点是探寻各方法的特点和优缺点, 为寻求最优的气候变化影响评估方法提供思路。

本文资料主要是通过文献检索得到, 所使用数据库包括中国知识资源总库(CNKI)、维普和Google学术。主要方法是: (1) 以“气候变化”作为“主题”进行初次检索, 在此基础上分别以“极端气候事件”“气候变暖”“气候灾害”“经济系统”“经济影响”“经济评估”“经济特征”“经济模型”“计量经济”“农业”“林业”“工业”“保险业”“旅游业”“制造业”等为“关键词”进行二次检索, 循环文献检索的主要原则, 剔除与经济系统影响和评估研究无关的文献; (2) 通过Google学术搜索, 分别输入上面对应的英文关键词进行检索, 获取部分重要英文文献; (3) 利用图书馆, 搜索与本论文有关书目, 通过阅读相关书籍获取有用信息。检索统计的截止时间为2012年5月30日。

## 3 气候变化对中国经济系统影响

中国气温总体增加但时空分布极不均匀, 其中北方增加幅度大于南方地区, 内陆地区大于沿海地区; 降水量变化比温度变化复杂, 西部和华南地区降水增

加, 西北中部、青藏高原西南部、华中至华北和东北中部地区降水减少; 极端气候事件主要表现为北方干旱、江淮流域洪涝、沿海热带气旋频发, 并且这种趋势日益明显<sup>[13, 14]</sup>。未来, 中国温度和降水的变化将更加突出, 与1961—1990年平均温度相比, 2020年我国年平均温度将可能增加0.2~3.7℃, 2100年将增加到1.3~8.9℃, 变暖幅度由南向北增加; 不少地区降水出现增加趋势, 但华北和东北南部仍缺水<sup>[15, 16]</sup>。

根据我国气候变化特征, 目前气候变化对我国经济影响的研究主要侧重两个方面: 一是气候变化对经济系统总的影响存在不利性, 即从全球角度考虑不利影响会更加不利, 有利影响会由于其后气候进一步变化变得不利<sup>[17]</sup>; 二是气候变化对经济系统不同尺度的影响存在不均匀分布性, 这表现为气候变化影响依据时间、区域和行业的不同而产生差异<sup>[18, 19]</sup>。表1和表2总结了前人在这两方面的主要工作成果, 分别给出了气候变化对我国不同地区和行业现有影响的评估和未来趋势的预估结果。

## 4 气候变化对经济系统影响评估方法的研究

### 4.1 国内外研究进展

目前, 国内外研究气候变化经济影响的方法众多, 国内外研究思路大都是从单个区域和单个部门向多区域多部门发展。Adams等<sup>[52]</sup>基于成本效益法分析了美国农业的气候经济影响情况, 这种方法既无法反映其他部门受气候变化的影响, 也无法反映出农业与其他行业间的联系。Tol<sup>[53]</sup>、Nordhaus<sup>[54]</sup>和Fankhauser<sup>[55]</sup>尝试将不同的地区和领域采用一定的模型和方法计算气候变化带来的经济损失结果, 通过一定的集合方法进行综合, 得到气候变化给全球带来的整体经济影响, 基本上常用的方法有简单求和、平均和加权平均三种, 这样的研究方法可以在一定程度上反映出多区域多部门的气候对经济综合影响情况, 但是仍然没有体现出经济系统作为一个整体, 各个子系统之间的相互作用情况, 也没有反映经济系统的运行机理。Mendelsohn等<sup>[56, 57]</sup>利用综合评估模型的思想对气候变化的经济影响进行分析与评估; 一般均衡模型(CGE模型)是目前国外进行综合评估较为常见的经济模型, Berritella等<sup>[58]</sup>和Basello等<sup>[59]</sup>利用CGE模型对世界不同经济区域的旅游业和人类健康进行了综合分析, 这一模型也能将不同经济区域和部门的相互作用结合起来, 反映一个相对动态的结果; Basello等<sup>[60]</sup>将局部均衡模型与一般均衡模型进行综合, 既反映了气候变化对社会经济带来的影响, 同时也反映出一定的适应措施带来的经济应对状况。这种动态的综合评价模型

表1 气候变化对中国经济系统影响的区域特征

地区	影响
华北	水资源短缺、供水不足，工业用水比重增加12%，海河流域地表径流1980—2000年比1956—1979年减少41%；农业产量与种植布局明显北移，冬小麦种植北界北移30~50km；年受灾面积基本维持530万hm <sup>2</sup> 左右，年损失值约数百亿计。预计未来一定程度增温利于农业生产，但是作物在20世纪末普遍减产；生态系统会退化甚至消失，森林生态系统结构发生变化 <sup>[20]</sup> 。
东北	作物生产条件发生改变，近十多年来，水稻向北扩张，种植北界北移了4个纬度 <sup>[21]</sup> ，2004年玉米和大豆单产相对1978年而言，分别增长了1.1倍和1.7倍；病虫害和旱灾不利农业生产；生态环境恶化，1995—2003年牧草地总面积持续减少约254.05万hm <sup>2</sup> 。未来干旱化加剧，水资源需求更加紧张，气候变暖导致作物生产潜力和品质下降、新的病虫害发病率增大等问题。
华东	近30年农业旱灾面积波动较大，占播种面积的比例为3%~14%，农业水灾面积呈递增趋势，波动范围在2.5%~9%之间 <sup>[22]</sup> ；1949—2006年的年均粮食减产率波动在1.05%~2.51%之间 <sup>[23]</sup> 。基础设施受损严重，2005年麦莎台风导致1.5万间房屋倒塌，直接经济损失达13.4亿元。未来降水增加，洪涝增多，由此导致的各类传染性疾病可能增多，能源需求更加紧张，出现百年一遇甚至千年一遇洪水的可能性加大。
华中	近30年农业减产率范围在2.08%~2.51%；洪涝灾害严峻，2002年全区受灾面积直接经济损失占全国洪涝灾害损失的32%；湿地面积减少，湖北省湖泊和湿地面积近50年分别减少84%和40%。血吸虫病害占全国85%左右 <sup>[24]</sup> 。预计未来高温热浪天气频率和强度加大，洪旱交替频繁，后60年洪涝灾害频率明显增大；湿地物种资源减少，生物多样性降低；血吸虫病害由于“退田还湖”等政策出现一定程度的加重 <sup>[25]</sup> 。
华南	海平面上升加速，高出近30年来平均上升速率1.3mm/a <sup>[26]</sup> ，海岸生态系统严重退化，海南东寨港红树林面积锐减49%，珊瑚礁破坏率达80%；珠三角城市群热岛强度呈逐年增强趋势，≥35℃的高温日数均在30天以上，导致人员伤亡和气象灾害频发。预计2100年海平面上升0.6~0.74m，珠三角经济发展严重受损；水资源供需严重失衡，各种传染性疾病肆虐；红树林北界北移，珊瑚白化范围扩大。
西南	干旱、洪涝频发，程度加重，2006年四川省受干旱影响造成经济损失79.6亿元；物种减少，林线海拔大约每年上移8.5m <sup>[27]</sup> ，石漠化山区森林覆盖率不及10%。预计未来山地灾害活动强度、规模、频率和范围将加大，损失更为严重；2050年的经济损失将达到20世纪80年代的8倍；生物多样性受到气候变化影响，大熊猫栖息地向西北方向转移。
西北	近50年灌养气候产量提高10%~20%，雨养产量减少10%~20% <sup>[28]</sup> ；畜牧业发展受益；土地沙漠化总体上得到遏制，但是局部地区呈加重趋势，西北东部植被面积减少约4.77%。未来降水增多，但仍缺水；2030年前，年缺水量约为200亿m <sup>3</sup> ；2050年后，农牧交错带边缘和绿洲边缘沙漠土地有所增加。半干旱地区潜在沙漠化趋势增大，单位草地生产力最大可能增加13%~23%。主要造林物种北移，森林虫害程度加重。

表2 气候变化对中国经济系统影响的行业差异

行业	影响
农业	过去60年，我国耕地和粮食生产重心向西北偏移 <sup>[29]</sup> ，全国主要作物的平均生育期延长了6.6d；1980—1993年，气象灾害造成损失达同期粮食生产的6% <sup>[30]</sup> ；2007年低温冻害和雪灾带来的直接经济损失达到186.5亿元 <sup>[31]</sup> 。CO <sub>2</sub> 倍增情景下，中国作物全年生长季延长8~32d <sup>[32]</sup> ，2050年中国一熟制区的面积将由现在的62.3%缩小到39.2%，三熟制区的面积将由目前的13.5%扩大到35.9%，二熟制区的面积基本不变；主要作物的产量平均将可能减少5%~10% <sup>[33]</sup> 。
林业	我国森林分布北移，林线海拔上升，春季物候整体上提前，呈现北方提前、南方推迟趋势；同时病虫害危害加重，20世纪90年代以来，全国森林病虫害年均发生面积相当于年均人工造林面积的80%。温度上升1℃，平均物候提前3.5d；CO <sub>2</sub> 浓度倍增时，林业生产力上升12%~35% <sup>[34]</sup> 。据估计，红树林综合价值为1万元/(hm <sup>2</sup> ·a)，全球红树林每年的综合价值可达16亿美元；我国红树林退缩严重，温度上升2℃，红树林北移2.5个纬度，未来直接经济损失不小 <sup>[35,36]</sup> 。
牧业	我国90%的草地产量变化由降雨量造成 <sup>[37]</sup> ，北方草场退化后的产草量减少50%~60% <sup>[38]</sup> ，草地质量也会下降，20世纪90年代，青藏高原原草高度相比80年代末下降30%~50% <sup>[39]</sup> ；CO <sub>2</sub> 浓度倍增时，年平均温度上升4℃，降水量增加15%，改良牧场的干草产量增加约2/3，未改良的增加50%。暖干气候对家畜健康、生长和繁殖也有较大影响，高温可能使奶牛产奶量下降20%~30%，过去几十年新增30多种病毒疾病，大规模高密度集约化的养殖场受影响更加严重 <sup>[40]</sup> 。
渔业	淡水渔业：CO <sub>2</sub> 浓度倍增后，冷水性和暖水性鱼类等温线（25℃）分别北移1~3个纬度和3~6个纬度，西多东少；中纬度水域的鱼重增加收益最大，高/低纬度收益较少；各地鱼类性成熟提前，北多南少，相差5倍之多 <sup>[41]</sup> 。 沿海渔业：气候变化下传统渔业消失可能增加纠纷，鱼群繁衍受到影响，研究表明我国四大海区主要经济鱼种的产量在气候变化之后降低了5%~15%，渔获量降低幅度降低1%~8% <sup>[42]</sup> ；海洋生态系统破坏，珊瑚礁白化。
水资源	东北、华中、华南及西南地区诸流域降水量减少，其余地区呈增加趋势；地表趋于旱化，黄河流域20世纪90年代后比90年代前蒸发量增加41mm <sup>3</sup> ；水资源供需矛盾加剧，目前正常年份全国缺水近400亿m <sup>3</sup> <sup>[43]</sup> ；水环境污染呈加重态势，20世纪90年代以来，全国有1/4的测站水质恶化。未来北方径流量减少而南方增加，各流域年平均蒸发将增大，其中黄河及内陆河地区可能增大15%。2050年，西部冰川面积将减少27.2%，西部融水总量年增长20%~30%。
能源	影响能源需求和供应。冬季采暖需求变化随纬度增加而减少，需求变率范围在10%~20%，东部采暖需求大于西部，1980年代中期以来，中国取暖区北界北移，110°E以东地区北移达到2个纬度；夏季降温耗能变率总体上北方大于南方；电力负荷随气温增加而敏感性上升；水电和风电能力降低。未来，2030年能源需求相比2005年增加1.4倍，2050年增加1.9倍；2031—2040年南方地区水库上游流域降水减少可能导致水库发电能力受到影响 <sup>[44]</sup> 。
制造业	研究发现，气候变化非平均态带来的短期影响强于平均态引起的长期影响。苏宁 <sup>[45]</sup> 以南京为例，利用协整方程和变参数模型分析得到气候变暖对制造业产出的关系，发现气候变化的产出弹性为0.15，占GDP的7.65%，并且产出弹性有下降趋势，未来气候变暖对制造业的负面效应较大。
交通运输业	影响交通运输和交通运输设施。1963年海河流域暴雨洪水导致铁路被冲毁822处，中断行车2108h，公路被淹没6700km，桥梁112座；20世纪90年代以后交通运输气候灾害更为严重，1991年江淮地区特大洪水使得65条铁路干、支线发生水害中断356次，中断行车13000h以上，直接经济损失12.76亿元 <sup>[46]</sup> 。预计未来气候变化、强降水引起的洪涝、泥石流灾害可能更加频繁，公路交通基础设施可能受到更大破坏，灾害性天气增加交通事故发生的频率，河流水位降低增加内河运输成本，台风等极端天气增加海运危险，大雾降低能见度，延误航班、增加运输成本等。
保险业	造成全球经济损失从20世纪50年代的39亿美元/a增加到20世纪90年代的400亿美元/a，发展中国家的经济损失约占1/4；同期入保部分也从每年几乎为零增加到92亿美元/a。1985—1999年间财产/意外事件保险费和天气有关的损失比率降低了3倍。气候变化可能增加风险评估中保险精算的不确定性，导致成本增加，发展中国家金融服务扩展减速，减弱保险业对各种突发事件的保障作用，增加社会对政府赔偿金额的需求，公平与发展的矛盾将会越来越突出 <sup>[47]</sup> 。
旅游业	气候变化带来的代价和风险相当于每年至少损失全球GDP的5%，我国旅游业受气候变化影响的损失占GDP的4%，影响旅游资源、旅游流、旅客安全及决策、旅游经济。1998年特大洪水，我国入境旅游损失29.9×10 <sup>4</sup> 人次；2008年初冰雪灾害造成旅游直接经济损失约69.7亿元 <sup>[48]</sup> 。到2030年气候变化对旅游业的负面影响将更为突出：气候变化引起的自然灾害不确定性增大，冲击旅游业发展；未来50年旅游资源将受到气候变化的不利影响，观赏价值降低，旅游者对气候的暴露程度高，受气候变化影响风险增高，东中西部地区旅游业的损失也将增大 <sup>[49]</sup> 。
人类健康	升温、热浪和寒潮等致使疾病发病率/死亡率增加；温度升高1℃，心脏病死亡风险上升1.9%；热浪时期疾病死亡风险增加13%~23%，寒潮造成疾病死亡风险增加50%~91% <sup>[50]</sup> 。气候变化带来传染病感染严重，中国地区血吸虫病对人类健康影响最为严重，过去30年里，中国已有41335km <sup>2</sup> 的区域成为钉螺潜在孳生地，间接导致的受血吸虫病威胁的人口增加2100万人，预计2050年，会增加783883km <sup>2</sup> 新的孳生地，占中国土地面积的8%左右 <sup>[51]</sup> 。

是目前国际发展的趋势, Hassler等<sup>[61]</sup>利用综合评估模型对世界多区域模式进行了经济评估, 但是只是从化石燃料交易市场进行动态分析, 这种市场的不完备性并不能完全地模拟出市场的真实变化情况。因此, 气候变化经济影响评估的经济系统复杂性既是这一领域发展完善的限制, 又是方法不断改进的动力, 全球研究趋势正向着动态、长期的经济评估模型的设定与开发前进。

相对国外综合评估模型的发展, 我国研究气候变化经济影响的方法稍显不足。李克让等<sup>[62]</sup>总结了21世纪之前国内研究气候变化经济影响的方法, 主要包括: 实验室、农田和野外观测试验, 冰芯、树木年轮和历史文献方法, 数值模式研究等, 这些方法基本是基于自然机理与自然现象进行气候变化的经济评估, 几乎没有考虑气候变化所导致的经济系统和经济市场的作用情况。进入21世纪以来, 这方面的研究得到了我国研究者的更多重视。陈迎<sup>[63]</sup>利用统计方法对能源需求的影响进行了分析, 这种方法直接从经济数据出发, 通过研究不同数据之间的关系探讨气候变化的经济作用情况, 但仍然不能反映经济系统的变化机理。张永勤等<sup>[64]</sup>通过经济学投入—产出模型分析气候对区域经济的影响, 这是均衡分析的一种, 为一般均衡分析在我国的发展奠定了基础。我国学者对于CGE模型的研究也有一定的进展, 王灿<sup>[65]</sup>基于动态CGE模型对我国政策进行了模拟分析, 但是利用此模型分析气候变化对我国经济损失影响的评估工作还处在理论研究阶段, 这一点相对于国外来说还存在一段距离。丑洁明等<sup>[66]</sup>为我国气候变化经济评估提供了一种新的思路, 利用改进的C-D-C模型分析气候变化对我国农业粮食产量的经济影响, 并且从理论上确认这一模型对其他领域和部门的适用性, 自此, 这一模型从研究领域的变更与扩充、研究要素的复杂化和研究方法的精准化上得到了比较快速的发展, 广泛地应用到我国各经济部门和区域上。丑洁明等<sup>[67]</sup>进一步提出基于C-D-C模型的气候变化经济影响预测理论, 为后续的研究提供了良好思路。

## 4.2 综合评估方法分类

目前, 比较简单的方式就是通过对历史<sup>[68]</sup>、问卷调查<sup>[69]</sup>、查阅文献<sup>[70]</sup>等非模型基础的研究方法, 这些方法相对简单易上手, 数据直接, 在一定范围内现实性较强, 具有直观意义; 但是主观性比较大, 前期需要很多准备工作, 且结果不一定准确。而模型分析法虽然研究起来较难, 不易实现; 但这类方法种类繁多, 选择性较强, 评估精度高, 因而更多的研究都尽可能利用可生成的模型来进行影响分析。在基于模型进行气候变化经济影响研究时, 研究者又站在不同的学科角度、利用不同的知识方法探究了全球气候变化对经济系统造成的影响, 具体可分为表3所示的三种模型评估方法。

从强调气候变化对社会经济系统的影响评估方面来看, 这不仅是一个多学科综合的复杂评价问题, 更是一个经济问题, 我们需站在经济学的角度开展这种经济机理的分析, 了解气候变化影响了经济系统的什么方面, 以及如何影响经济活动和经济部门的市场分配等。同时, 对于前两种方法的探究, 目前很多气象学家已经开展了很多的工作, 所得到的结果也比较成熟。但是, 由于自然科学家们所建立的模型没有考虑经济现实的影响因子和互动因素, 而经济学家在分析经济问题时又鲜少考虑气候变化的影响<sup>[75]</sup>。因而, 总结这一研究领域已经开展的工作, 对于之后进一步深入和拓宽研究起到至关重要的作用, 这也是本文基于经济学角度研究并总结气候变化影响及方法的根本意义所在。

## 4.3 经济评估方法分类

与自然机理模型不同, 经济机理模型是通过真实地反映气候变化对整个经济系统包括经济活动和部门的影响, 站在经济学的角度, 体现整个经济系统受气候变化影响的运作情况。目前最常用的经济模型包括成本效益法、生产函数法和均衡分析法。

(1) 成本效益法(CBA)。成本效益法的理论基础主要是所谓的“帕累托潜在改善”这一经济理

表3 气候变化对经济系统影响的模型评估方法比较

方法	原理	优点	缺点	代表文章
经验统计模型	按照最小误差原则, 进行数理分析, 不考虑过程机理	输入参数少, 相对简单, 易操作	无法反应气候变化经济影响的内在机制; 基于当前气候条件建立的经验模型研究未来变化情况的外推可信度低; 区分气候变化和非气候变化的经济影响的难度大	王新华等 <sup>[71]</sup> 、汤小槽等 <sup>[72]</sup>
自然机理模型	模拟气候变化对经济系统造成影响的自然过程	基于自然科学试验、模型和数据, 反映自然机理过程	输入参数多, 数据获取困难; 结果受参数和模型限制; 不考虑经济行为; 评估经济系统整体的影响时, 没有考虑部门间的相互作用	温美丽等 <sup>[73]</sup> 、赵俊芳等 <sup>[74]</sup>
经济机理模型	真实反应气候变化带来的经济行为的变化	从经济的角度分析气候变化的经济影响, 反映经济行为变化机制	输入输出参数多; 理论本身反映现实经济行为的能力受限	Adams等 <sup>[52]</sup> 、丑洁明等 <sup>[75]</sup> 、杜文斌 <sup>[76]</sup> 、王灿等 <sup>[77]</sup>

论。该理论认为,任何项目或政策,如果其整体增加的效益能够补偿总的成本或损失,那么就认为该项目或政策的实施在经济上是有效益的<sup>[78]</sup>。由于气候变化对经济系统的影响有正有负,对经济影响进行成本效益分析理论上是可行的。杜文献<sup>[76]</sup>基于李嘉图模型视角对整个区域农业生态系统的效益进行了度量。但是,从我国目前研究情况来看,气候变化经济效益评价这一思路在国内并不成熟。秦大河<sup>[3]</sup>指出气候变化对我国经济系统可能为负面影响,同时这一方面的影响评价多是气候变化的损失评估,多数学者忽略了气候变化可能带来的正面效益。相反,陈迎<sup>[63]</sup>提出成本效益分析可作为对气候变化进行损失评估、适应分析和减排成本分析之后的综合评估方法。

(2) 生产函数法。生产函数是指在一定时期内,在技术水平不变的情况下,生产中所使用的各种生产要素的数量与所能生产的最大产量之间的关系。学者多用到的生产函数是由美国经济学家Douglas和Cobb根据1899—1922年的工业统计资料提出的C-D生产函数,它是唯一能使均方估计误差达到最小的生产函数<sup>[79]</sup>。目前人们对C-D模型的研究十分关注,也取得了很大的进展,其中最为突出的是丑洁明等<sup>[75]</sup>率先构建了一个气候—经济新模型;将气候因子加入了C-D模型之中,并将之应用到粮食产量之中。有学者在此基础上对其进行了改进,扩大了C-D-C模型的应用范围。符琳等<sup>[80]</sup>又构建了一个综合气候因子替代单个气候因子,使得研究更加合理真实。之后,丑洁明等<sup>[67]</sup>进一步引入“气候变化影响量”概念,对未来气候变化对经济产出的影响给予了定量的评估。

(3) 均衡分析法。这种方法的思想是生产者根据利润最大化或成本最小化原则,在技术约束下,进行最优投入决策,确定最优的供给产量;消费者根据效用最大化原则,在预算约束条件下,进行最优支出决策,确定最优的需求量;均衡价格使最优供给量与需求量相等,资源得到最合理的使用,消费者得到最大的满足,经济达到稳定的均衡状态<sup>[77]</sup>。通常,均衡分为局部均衡与一般均衡。局部均衡分析是假定在其他条件不变的情况下来分析某一时间、某一市场的某种商品(或生产要素)供给与需求达到均衡时的价格如何被决定。一般均衡法在分析某种商品的价格如何被决定时,则在各种商品和生产要素的供给、需求、价格相互影响的条件下分析所有商品和生产要素的供给和需求同时达到均衡时所有商品的价格如何被决定。局部均衡方法虽然局限于某一个部门的供需平衡,但是它也可以用于反映整个经济系

统的状况,Tol<sup>[18,19]</sup>就是利用这种方式,使用荟萃分析对一个国家或地区的综合影响进行了评估。陈迎<sup>[63]</sup>认为这种利用局部均衡反映整个经济系统状况的方式无法考虑到各部门之间的相互作用,且无法反映整个经济部门的市场运作,一般均衡法则弥补了这一不足。常用的一般均衡分析方法有投入产出(IO)模型和可计算一般均衡(CG E)模型。

① IO模型。投入产出法产生于20世纪30年代,是由Leontief<sup>[81]</sup>首先提出的,其于1931年开始研究“投入产出分析法”,来分析研究美国的经济结构。该方法主要用途是用于研究与分析国民经济各个部门在产品的生产与消耗之间的数量依存关系,反映各个部门之间的直接与间接的经济联系和各个部门之间的综合平衡问题。目前,已拓展到研究与分析各个地区各个行业内部及之间的各种经济联系,并取得了一定的创新。张永勤等<sup>[82]</sup>利用该模型分析了气候变化对江苏省各经济行业部门的影响。胡爱军等<sup>[83]</sup>则利用非正常投入—产出模型分析了极端气候事件的间接经济损失。丁先军等<sup>[84]</sup>在利用该模型进行灾害经济影响评估时,利用ARID(Adaptive Regional Input-Output)这一改进模型,克服了传统投入—产出模型生产结构不变的约束,提高了模型的模拟结果。

② CGE模型。CGE模型用三组方程分别描述供给、需求以及市场供求关系,方程中的所有因素都是变量,这些变量通过一系列优化条件来求解,得到在各个市场都达到均衡时的一组数量与价格<sup>[85]</sup>。利用CGE模型进行经济评估有多种方式,比如Parry等<sup>[86]</sup>、Berrittella等<sup>[58]</sup>和Bosello等<sup>[59]</sup>利用CGE模型分别对农业、旅游业和人类健康状况进行了一般均衡分析,考虑单个部门对整体行业的相互作用力;Bosello<sup>[60]</sup>以气候变化对各部门经济影响的局部均衡分析结果为资料来源,对总体经济影响进行了一般均衡分析。目前CGE模型用于气候变化分析时关注最多的问题是:气候变化的经济成本、延缓气候变化的政策措施选择、不同的政策措施对气候和社会经济结构等方面的影响<sup>[87]</sup>这些方面。

IO模型和CGE模型展现了十分清楚的供求关系,把各部门及各区域用这种投入—产出关系联系起来。但是由于IO模型最终需求外生决定、生产能力无限、投入要素无法替代、无约束条件的最大化等原因,其在应用上存在限制。相比而言,CGE则解决了这些问题,它将模型方程中所有的因素都考虑成变量,在约束条件下实现效用最大化、市场均衡和普遍相关,最终得到完整的一般均衡分析,即各个市场达

到均衡时的一组数量与价格。但是CGE模型也存在不足：首先，大部分模型是静态的，对于长期动态地经济系统的模拟并不完整；其次，模型中参数“校准法”值得商榷，很多计量经济学家对这种以基准年数据进行参数校正的方法进行了批评，表现在基准年随机现象不恰当传递体现在模型中<sup>[88]</sup>、校准参数没有可信用度量<sup>[89]</sup>、模型初始条件敏感<sup>[90]</sup>等方面；第三，CGE考虑了市场均衡，但是往往忽略了非市场的影响，而未来气候变化对经济系统的影响恰恰是市场影响降低而非市场影响上升的趋势<sup>[91]</sup>，Bosello<sup>[60]</sup>已经指出市场导向的影响和适应已无法在满足目前的影响评估工作；第四，经济评估模型在面对气候变化影响分析时面临困境。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文从狭义的经济系统角度探讨了气候变化对我国经济系统的影响，并总结了目前应用于这种研究的各种方法。气候变化对经济的影响虽然存在全球性和外部性，但是影响程度在区域上有明显的差异。发达国家所受影响相对其他国家要弱，高纬度地区比低纬度地区所受气候变化影响小，与气候变化直接相关的农业部门相比其他部门受影响要大得多<sup>[92]</sup>。我国的经济系统受气候变化的影响也存在区域差异，重点表现在海岸带区、北方缺水农区和西部生态脆弱区对气候变化的敏感度最大。气候变化对经济系统影响的评估方法很多，在使用基于模型的方法时，为了使得评估精度得以提高，可以将不同的分析方法进行组合加权；其中，经验统计模型和自然机理模型是气象学家常用的分析手段，但是它们都无法反映气候变化带来的经济活动和市场变动，对于气候保护政策的提出局限性很大，因而从经济学角度探讨气候变化的经济影响问题十分必要。但是，总体来说，这些分析方法都缺乏一定的动态性和主动性，对于长期的经济影响和复杂的市场响应模拟能力还需提高。

### 5.2 讨论

目前，气候变化经济影响评估方法很多，并且应用广泛，很大程度上真实反映了气候变化对经济系统造成影响的实际情况，但是仍然存在一些急需解决的问题。

(1) 气候变化的影响是长期的，这也导致气候变化影响评估方法存在不确定性<sup>[93]</sup>。一方面，气候变化的经济影响是跨时代的，带来成本收益的代际分配公平性问题。目前人们对改善环境的支付意愿低于对

削弱环境的补偿意愿，即为了自身经济的发展，在气候变化问题上倾向于将损失转移至下一代。代际分配采用的贴现理论与方法是基于未来的气候变化情况及其对经济系统的可能影响进行设定的，也存在很大的不确定性<sup>[94]</sup>。另一方面，由于气候变化对经济系统的影响存在长期性，因而技术变化将会成为经济变化的内生变量，原本将技术作为外生变量的模型需要考虑技术变化给经济带来的影响<sup>[95]</sup>。

(2) 气候变化经济影响评估模型目前多是静态的。正如前面所说，气候变化的影响是长期的，因而静态的模型不再适合于远期的影响模拟和保护政策的评价。静态模型向动态模型发展成为气候变化经济影响评估研究的新思路，但是动态模型的构建需要更多的参数和条件的设定，存在很大的困难。

(3) 关于气候变化对经济系统的影响，存在“市场价值”和“非市场价值”两种模式；目前的评估模型往往会忽略非市场的影响。对于市场可以定价的影响比较好获取，但是对于那些没有市场价值的商品，就需要进行货币化，比如环境舒适度、健康和娱乐等。目前对于市场上不出售的商品估价方法包括间接市场法和直接询问法，虽然这些方法存在很多争议，但是忽略这部分损失的价值便不会全面<sup>[96]</sup>。

(4) 气候变化经济影响的评价存在不确定性。这除了模型结构、参数选择和设定存在不确定性之外，还包括模型评价过程的不确定。它们都可能因为无法真实反映气候变化经济影响的现实本身而导致结果存在偏差<sup>[97]</sup>。评估气候变化对经济系统的影响时存在很多需要改进之处：

第一，它需要人们对其进行可持续发展的经济分析，充分考虑公平性原则、可持续性原则和共同性原则。

第二，气候变化经济影响评估研究的主流是分析气候变化的经济影响、气候变化的保护政策、气候变化的国际政治经济形势，这些都是从宏观的角度来分析气候变化给全球社会经济格局带来的变化和影响；但是，由于气候变化经济问题本身存在全球性、长期性、外部性和不确定性，这些问题严重影响了学者对气候变化问题的研究进度和分析结果。因而，从气候变化问题的这几个特征方面着手进行经济分析，可以成为经济学家新的思路<sup>[98]</sup>。

第三，进一步改进气候变化经济影响评估的模型和方法，一方面将被动的、静态的分析向主动的、动态的分析改进，构建适用于我国经济评估的气候变化综合评估模型<sup>[99]</sup>，另一方面改善并找寻新的研究理论，不断克服气候变化预测与影响评估的不确定性，

从更广泛的角度来考虑气候变化的经济影响。

致谢：本文在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/全球变化与地球系统科学研究院的陈晓冬和韦志刚老师的协助下完成，研究生杨赭永和张轶鸥予以帮助，在此表示感谢。

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Schelling T C. Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 1992, 82(1): 1-14.
- [3] 秦大河. 进入21世纪的气候变化科学——气候变化的事实、影响与对策. *科技导报*, 2004, (7): 4-7.
- [4] Fankhauser S. Valuing Climate Change—The Economics of the Greenhouse. London: Earth Scan, 1995.
- [5] 罗慧, 许小峰, 章国材, 等. 中国经济行业产出对气象条件变化的敏感性影响分析. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 113-117.
- [6] 王铮, 郑一萍. 全球气候变化对中国粮食安全的影响分析. *地理研究*, 2011, 20(3): 282-289.
- [7] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II)中国应对气候的影响与适应. *气候变化研究进展*, 2006, 2(2): 51-56.
- [8] Stern N. What is the economics of climate change. *World Economics*, 2006, 7(2): 1-10.
- [9] Treasury H M. Stern review: The economics of climate change. <http://www.the-eans.de/Presse/PMitt/2006/061030c76.pdf>, 2006-12-20.
- [10] 卢晓媚. 简论经济系统及经济结构. *广东社会科学*, 2011, (5): 84-87.
- [11] 孙宁. 气候变化对制造业的经济影响研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [12] 王灿, 陈吉宁. 气候政策研究中的数学模型评述. *上海环境科学*, 2002, 21(7): 435-458.
- [13] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [14] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951~2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 16-18.
- [15] 罗勇, 江滢, 董文杰, 等. 气候变化与海平面上升及其对海啸灾害的影响. *科技导报*, 2005, 23(3): 41-43.
- [16] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. 中国科学基金, 2003, (1): 1-3.
- [17] Tol R S J, Fankhauser S, Richels R G, et al. How much damage will climate change do? Recent estimates. *World Economics*, 2000, 1(4): 179-206.
- [18] Tol R S J. Estimates of the damage costs of climate change—Part I: benchmark estimates. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(1): 47-73.
- [19] Tol R S J. Estimates of the damage costs of climate change—Part II: dynamic estimates. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21(2): 135-160.
- [20] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1686-1706.
- [22] 吕军, 孙嗣响, 陈丁江. 气候变化对我国农业旱涝灾害的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1713-1719.
- [23] 程琨, 潘根兴, 邹建文. 1949—2006年间中国粮食产量变化影响风险评价. *南京大学学报*, 2011, 34(3): 83-88.
- [24] Zhou X N, et al. Epidemiology of schistosomiasis in the people's republic of China. *Emerging Infectious Diseases*, 2007, 13(10): 1470-1476.
- [25] 张建波, 田琪. 洞庭湖湿地生态保护现状及对策. *水资源保护*, 2005, 21(1): 52-54, 61.
- [26] 时小军, 陈特固, 余克服. 近40年来珠江口的海平面变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 127-134.
- [27] Moseley R K. Historical landscape change in northwestern Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, 2006, 26(3): 214-219.
- [28] 张强, 邓振镛, 赵映东. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [29] 唐国平, 李秀彬. 气候变化对中国农业生产的影响. *地理学报*, 2000, 55(2): 129-137.
- [30] 史培军. 中国自然灾害、减灾建设与可持续发展. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 267-278.
- [31] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905-910.
- [32] 宁金花, 申双和. 气候变化对中国农业的影响. *现代农业科技*, 2009, (12): 252-256.
- [33] 张厚垣. 气候变化对我国种植制度的影响. *中国农业气象*, 2000, 21(1): 9-14.
- [34] 朱建华, 侯振宏, 张小全. 气候变化对中国林业的影响与应对策略. *林业经济*, 2009, 208(11): 78-82.
- [35] 陈小勇, 林鹏. 我国红树林对全球气候变化的响应及其作用. *海洋湖沼通报*, 1999, (2): 11-17.
- [36] 龚婕, 宋豫秦, 陈少波. 全球气候变化对浙江沿海红树林的影响. *安徽农业科学*, 2009, 37(20): 9742-9744.
- [37] 李玉娥, 董红敏, 林而达. 气候变化对畜牧业生产的影响. *农业工程学报*, 1997, 13(9): 20-23.
- [38] 赵艳霞, 袁国旺. 气候变化对北方农牧交错带的可能影响. *气象*, 2001, 27(5): 3-7.
- [39] 张秀云, 姚玉璧, 邓振镛, 等. 青藏高原东北边缘牧区气候变化及其对畜牧业的影响. *草业科学*, 2007, 24(6): 66-73.
- [40] 李晓锋, 陈明新. 全球气候变暖对我国畜牧业的影响与分析. *中国畜牧杂志*, 2008, 44(4): 50-53.
- [41] 刘乃壮, 金志凤. 气候变化对我国淡水渔业的可能影响. *水产养殖*, 1993, (5): 24-27.
- [42] 刘允芬. 气候变化对我国沿海渔业生产影响的评价. *中国农业气象*, 2000, 21(4): 2-5.
- [43] 李佳澍. 气候变化对我国相关产业的影响及对策研究. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2011.
- [44] 姜克隽, 胡秀莲, 庄辛, 等. 中国2050年的能源需求与CO<sub>2</sub>排放情景. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 296-302.
- [45] 孙宁. 气候变暖对我国制造业创新发展的影响. 第四届中国科学与科技政策研究会学术年会论文集(II), 2008: 684-691.
- [46] 张清, 黄朝迎. 我国交通运输气候灾害的初步研究. *灾害学*, 1998, 13(3): 43-46.
- [47] 国家气候变化对策协调小组办公室. 全球气候变化——人类面临的挑战. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [48] 刘亚玲. 极端气候事件频发下中国旅游业发展思考. *科技创业*, 2011, 24(7): 41-43.
- [49] 吴普. 气候变化情景下的中国旅游业及其对策. *中国旅游报*, 2009, 1(16): 10.
- [50] 马文娟, 阚海东. 我国气候变化与人群健康研究进展. *中华预防医学杂志*, 2011, 45(9): 845-848.
- [51] 杨国静, 杨坤, 周晓农. 气候变化对媒介传播性疾病传播影响的评估模型. *气候变化研究进展*, 2010, 6(4): 259-264.
- [52] Adams M R, Fleming R A, Chang C C, et al. A reassessment of the economic effects of global climate change on US agriculture. *Climatic Change*, 1995, 30(2): 147-167.
- [53] Tol R S J. The damage costs of climate change toward more comprehensive calculations. *Environmental and Resource Economics*, 1995, 5(4): 353-74.
- [54] Nordhaus W D. Managing the global commons: the economics of climate change. MA: MIT Press, 1995.
- [55] Fankhauser S. The social costs of greenhouse gas emissions: an expected value approach. *Energy Journal*, 1994, 15(2): 157-184.
- [56] Mendelsohn R O, Morrison W N, Schlesinger M E, et al. Country-specific market impacts of climate change. *Climatic Change*, 2000, 45(3-4): 553-69.
- [57] Mendelsohn R O, Nordhaus W D, Daigee S. The impact of climate on agriculture: a ricardian analysis. *American Economic Review*, 1994, 84(4): 753-771.
- [58] Berritella M, Bigano A, Roson R, et al. A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. *Tourism Management*, 2006, 27(5): 913-924.
- [59] Bosello F, Roson R, Tol R S J. Economy-wide estimates of

- the implications of climate change human health. *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 579-591.
- [60] Bosello F, Eboli F, Pierfederici R. Assessing the economic impacts of climate change. An updated CGE point of view. <http://www.cmcc.it/publicazioni/publicazioni/research-papers/rp0125-cip-01-2012.pdf>, 2012-2-15.
- [61] Hassler J, Krusell P. Economics and climate change: integrated assessment in a multi-region world. *Journal of the European Economic Association*, 2012, 10: 974-1000.
- [62] 李克让, 陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展. *地理研究*, 1999, 18(2): 214-219.
- [63] 陈迎. 气候变化的经济分析. *世界经济*, 2000, (1): 65-74.
- [64] 张永勤, 缪启龙. 气候变化对区域经济影响的投入-产出模型研究. *气象学报*, 2001, 59(5): 633-640.
- [65] 王灿. 基于动态CGE模型的中国气候政策模拟与分析. 北京: 清华大学, 2003.
- [66] 丑洁明, 封国林, 董文杰, 等. 气候变化影响下我国农业经济评价问题探讨. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 361-368.
- [67] 丑洁明, 董文杰, 封国林. 定量评估气候变化产量经济产出的方法. *科学通报*, 2011, 56(10): 725-727.
- [68] 王铮, 黎华群, 孔祥德, 等. 气候变暖对中国农业影响的历史借鉴. *自然科学进展*, 2005, 15(6): 706-713.
- [69] 王宝华, 付强, 谢永刚, 等. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述. *灾害学*, 2007, 84(3): 95-99.
- [70] 王魏荣. 近十年我国气候变暖影响研究的若干进展. *应用气象学报*, 2002, 13(6): 755-766.
- [71] 王新华, 延军平, 杨谨菲, 等. 1950—2008年汉中市气候变暖及其经济适应. *地理科学进展*, 2011, (5): 557-562.
- [72] 汤小槽, 金晓斌, 盛莉, 等. 基于小波分析的粮食产量对气候变化的响应研究——以西藏自治区为例. *地理与地理信息科学*, 2008, 24(6): 88-92.
- [73] 温美丽, 高晓飞, 谢云, 等. ALMANAC模型对大豆产量的模拟. *资源科学*, 2005, 27(4): 100-105.
- [74] 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述. *中国农业气象*, 2010, (2): 200-205.
- [75] 丑洁明, 叶笃正. 构建一个经济-气候新模型评价气候变化对粮食产量的影响. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 347-353.
- [76] 杜文献. 气候变化对农业影响的研究进展——基于李嘉图模型的视角. *经济问题探索*, 2011, (1): 154-158.
- [77] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 可计算一般均衡模型理论及其在气候变化研究中的应用. *上海环境科学*, 2003, 22(3): 206-212.
- [78] Tobey J A. Economic issues in global climate change. *Global Environmental Change*, 1992, 2(3): 215-228.
- [79] 成邦文, 刘树梅, 吴晓梅. C-D函数的一个重要性质. *数理经济技术经济研究*, 2001, (7): 78-80.
- [80] 符琳, 李维京, 张培群, 等. 用经济-气候模型模拟粮食单产的方法探究. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 330-335.
- [81] Leontief W. *Input-output economics*, second edition. Oxford University Press, 1986.
- [82] 张永勤, 彭补拙, 缪启龙. 气候变化对江苏省经济的影响研究. *长江流域资源与环境*, 2001, (1): 8-13.
- [83] 胡爱军, 李宁, 史培军, 等. 极端天气事件导致基础设施破坏间接经济损失评估. *经济地理*, 2009, (4): 529-533.
- [84] 丁先军, 杨翠红, 祝坤福. 基于投入-产出模型的灾害经济影响评价方法. *自然灾害学报*, 2010, (4): 113-118.
- [85] 王丽. 气候变化问题研究中的一般均衡模型. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(7): 38-41.
- [86] Parry M L, Rosenzweig C, Iglesias A, et al. Effects of climate change on global food production under SERS emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 2004, (12): 53-67.
- [87] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于CGE模型的CO<sub>2</sub>减排对中国经济的影响. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(2): 1621-1624.
- [88] Mckittrick R R. The econometric critique of computable general equilibrium modeling: the role of functional forms. *Economic Modeling*, 1998, 15(4): 543-73.
- [89] Roberts B. Calibration procedure and the robustness of CGE models. *Economics of planning*, 1994, 27(3): 189-210.
- [90] Harrison G, Jones R, Kimbell L, et al. How robust is applied general equilibrium analysis. *Journal of policy modeling*, 1993, 15(1): 99-115.
- [91] Frankhauser S, Tol R S J. The social costs of climate change: the IPCC second assessment report and beyond. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1997, (1): 385-403.
- [92] 孙宁, 李廉水, 严明良. 基于协整理论的气温变化对南京市主要行业的影响研究. *气象*, 2008, 34(9): 97-103.
- [93] 段红霞. 气候变化经济学和气候政策. *经济学家*, 2009, (8): 68-74.
- [94] Tobey J A, 胡大鹏. 全球气候变化中的经济问题. *地理译报*, 1995, 14(12): 19-25.
- [95] 王克. 王灿, 陈吉宁. 技术变化模拟及其在气候政策模型中的应用. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 31-37.
- [96] Fankhauser S, Tol R S J, Pearce D W. The aggregation of climate change damages: a welfare theoretic approach. *Environmental and Resource Economics*, 1997, (10): 249-266.
- [97] 葛全胜, 王邵武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题. *地理研究*, 2010, 29(2): 191-203.
- [98] 任力. 气候变化与经济增长的理论分析. *经济学动态*, 2011(1): 137-141.
- [99] 张雪芹, 葛全胜. 气候变化综合评估模型. *地理研究进展*, 1999, 18(3): 61-67.