

中国二氧化碳减排和 环境协同效益评价模型的 构建与研究

杨 曦 滕 飞/著



科学出版社

中国二氧化碳减排和环境协同 效益评价模型的构建与研究

杨 曦 滕 飞 著

资助项目：国家重点研发计划（2016YFA0602702）、国家自然科学基金（71704187）、北京市社会科学基金（17GLC045）和中国石油大学（北京）青年拔尖人才。

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

中国正面临着气候变化、环境污染和经济可持续发展等诸多挑战，亟须通过协同治理协调多个政策目标，统筹应对。本书聚焦应对气候变化与空气污染协同治理这一热点问题，构建了二氧化碳减排和效益分析的综合评估模型，从协同效益分析的新视角评估了我国应对气候变化减排目标的环境协同效益。本书的研究表明，我国实现2030年碳排放达峰的减排目标与我国空气质量达标的治理目标是一致的，通过实现二氧化碳和大气污染物的优化减排可以有效实现两者的协同治理。

本书适合关注气候变化、能源系统优化、能源与气候模型及协同效益的科研人员和对该领域感兴趣的研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

中国二氧化碳减排和环境协同效益评价模型的构建与研究 / 杨曦, 滕飞著. —北京: 科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-062946-3

I. ①中… II. ①杨… ②滕… III. ①二氧化碳-减量化-排气-研究-中国 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 241003 号

责任编辑: 王丹妮 / 责任校对: 陶璇

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第一版 开本: 720×1000 B5

2019年11月第一次印刷 印张: 12

字数: 242000

定价: 96.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

国际气候变化的研究焦点正从评估减缓气候变化的成本转向分析气候变化的协同效益。当代中国正同时面临着温室气体减排、空气质量改善和经济可持续发展等诸多挑战。从效益分析的新视角展开更为全面的研究，不仅是优化能源结构和减排温室气体的需要，也为我国未来气候政策的制定提供了更为有力的支撑。

围绕这一重要研究需求，本书构建了二氧化碳减排分析和效益评价模型平台，并在此基础上，从以下三个方面展开研究：①以往能源模型同环境的连接多基于燃料消费或活动水平，不能实现综合优化。本书在技术层面建立了能源系统和环境评价的连接，拓展了能源技术评价模型的效益分析功能，为实现能源环境政策的综合评价提供了研究工具和分析方法。②通过情景设计研究了不同能源排放情景和末端处理情景的组合，分析了能源及二氧化碳减排政策与环境政策的协同。③提出了考虑协同效益的边际减排成本曲线。在边际减排成本曲线方法学上纳入协同效益分析，利用考虑了协同效益的边际减排成本曲线，分别进行部门层面和全经济层面的成本效益分析。

本书的主要结论和贡献有：①在基准情景下，我国一次能源消费及二氧化碳排放将持续增加，虽然通过加强末端处理措施，可以有效地控制常规污染物的排放并显著改善环境质量，但距离我国实现空气质量全面达标的要求仍有差距。②深度减排二氧化碳的情景下，我国能源结构得到有效的优化，在此基础上加强末端控制力度，实施源头控制和末端治理的协同控制，能带来显著的减排效果。2030年可以基本实现空气质量全面达标。③二氧化碳减排的效益与人口密度和区域发展水平密切相关，导致不同区域间效益差异显著。此外，二氧化碳减排效益和末端治理水平密切相关。最严格的末端控制情景下，效益将从参考情景下的117.8元/吨CO₂下降至35.1元/吨CO₂，但仍然存在可观的正效益，并对由二氧化碳减排带来的GDP（gross domestic product，国内生产总值）损失有一定的补偿作用。本书研究基于模型情景分析，可以为推进上游的节能和实现末端污染物减

排的综合优化提供数据支持和政策建议，为能源和环境模型的链接及优化提供基础。

当然，气候变化和环境综合治理的协同控制问题是一个复杂的理论和现实问题。尽管笔者已经努力修改和完善书稿，但由于学识有限，书中难免存在不足之处，敬请学术师长、同行专家和各方读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 气候变化和经济的相互影响	4
1.3 协同效益的概念和各方面体现	7
1.4 基于能源模型的相关研究	11
1.5 研究思路	15
第 2 章 China-MAPLE 模型的设计与构建	18
2.1 模型构建的框架	18
2.2 气候变化与经济影响的模型研究	20
2.3 模型的主要原理和变量	25
2.4 主要社会经济参数	33
2.5 资源供给	35
2.6 能源加工转换部门	42
2.7 终端能源需求部门	45
2.8 基年校准和数据来源	49
2.9 污染物排放模块	52
2.10 协同效益估算模块	53
2.11 本章小结	53
第 3 章 基于技术的能源环境连接	55
3.1 气候政策综合评估中的协同效益	55
3.2 从国别研究看协同控制的重要性	58
3.3 大气污染物排放历史和现状	63
3.4 污染物排放系数	65
3.5 污染物排放控制技术	76

3.6 本章小结	78
第4章 参考情景结果及分析	80
4.1 参考情景的主要结果分析	80
4.2 模型结果对比和因素分解	102
4.3 参考情景下常规污染物排放	104
4.4 边际减排成本曲线	107
4.5 本章小结	111
第5章 强化末端、深度碳减排和协同控制情景分析	113
5.1 情景设置	113
5.2 强化末端控制情景	117
5.3 深度碳减排情景	124
5.4 协同控制情景	132
5.5 本章小结	139
第6章 考虑环境效益的边际减排成本	141
6.1 协同效益的量化衡量	141
6.2 局部均衡模型对外部性的处理：考虑协同效益的边际减排成本曲线	143
6.3 水泥行业的边际减排成本曲线	145
6.4 全经济部门考虑协同效益的边际减排成本曲线	151
6.5 本章小结	157
第7章 结论及建议	159
7.1 结论及主要政策建议	159
7.2 研究特点和创新之处	161
7.3 研究侧重点	162
参考文献	164
致谢	185

第1章 绪 论

本章主要从研究的背景出发，首先在 1.1 节分析了我国面临的包括气候变化在内的多重严峻挑战。而后在 1.2 节主要从气候变化和经济系统相互影响的八个维度出发，着重分析了气候变化和经济的相互作用，指出应对气候变化既有减排成本也存在显著的效益。1.3 节进一步对气候变化的协同效益从概念和内涵到主要的表现形式进行了分析，指出环境健康的协同效益是气候减缓行动协同效益的主要方面，并对国内外的主要研究及结果进行了综述。基于以上各节对协同效益重要性的渐进论述，1.4 节对比和列述了对协同效益进行量化研究的模型研究工具，将使用最优经济增长、一般均衡模型和局部均衡模型等三种主流建模方法对二氧化碳减排和协同效益进行的分析做了对比，并分析了各自的优点和局限性。最后，1.5 节总结了现有的问题，给出了本书主要试图回答的问题，以及主要的研究内容、研究步骤、研究路线和结构安排。

1.1 研究背景

1.1.1 我国面临气候变化和多重严峻挑战

近年来，全球气候变暖的大背景下，极端气候事件频发，气候变化问题日益受到人们的关注。政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第四次评估报告^[1]中指出，“近五十年内，气候变暖有 90% 的可能性是和温室气体浓度的增加相关”。在最新发布的 IPCC 第五次评估报告^[2]中，进一步确认“造成 20 世纪中期以来气候变暖的主要原因，非常有可能是人为的影响”。因此，应对气候变化的关键是降低因人类活动所引起的温室气体排放量。自哥本哈根气候变化大会以来，各国已就到 21 世纪末将全球地表平均温升控制到工业化前 2°C 之内作为减排的长期目标达成了政治共识。

中国是温室气体排放大国，在国际社会上承担着巨大的减排压力。同时，中国目前正处在工业化的末期，并快速进入城镇化进程的中期，因此能源依然是我国经济发展的重要基础。近年来，我国一方面提高可再生能源比例，另一方面提高能效，已经在节能减排的道路上取得了显著的成果。但是，我国的能源消费总量依然快速增长，并且能源的利用效率依然低于发达国家平均水平，单位能源使用的 GDP 产出仍然低于世界平均能源强度水平。同时，化石能源的对外依存度仍然较高，我国的能源结构仍然是以煤为代表的化石能源为主，这给维护我国的能源安全带来了巨大的压力。

2013 年华沙气候大会提出“所有缔约方在 2015 年需通报国内自主决定的贡献 (intended nationally determined contribution, INDC)”^①，并且 IPCC 评估报告指出，为了在 21 世纪末将全球温升控制在 2°C 内，温室气体的浓度应当稳定在 450×10^{-6} ，全球排放需要在 2050 年比 2010 年减少 40%~70%。对我国而言，温室气体排放目前仍处于爬坡期，实现减排目标需要付出更多的额外努力。因此，实现二氧化碳的深度减排和各部门能效的进一步提升对我国尤为重要。

与发达国家不同，我国在承担着较大的温室气体减排压力的同时，还面临着环境污染、能源安全、人类健康和经济发展等多重挑战。能源方面，我国仍然面临着能源需求全面超过供给能力的压力。此外，我国能源对外依存度居高不下，能源安全面临巨大挑战。环境方面，过去几年大气污染现象在我国的中东部地区加剧，尤其在京津冀地区以及沿海的长三角和珠三角地区，多次出现严重雾霾现象。保持现有的环保力度，依然有不少城市面临空气质量不达标的问题。大气雾霾问题演变成与公众健康直接相关的重大民生问题并引起公众强烈关注。当前我国政府仍然面临着来自多方面的严峻挑战，需要从解决多重问题的角度出发，寻求能源、环境、经济和社会良性共存和发展的低碳道路。

1.1.2 应对气候变化的成本和效益

应对气候变化需要付出相对应的经济成本。在以往的气候变化经济学中，大量研究关注的是气候变化所造成的影响和损失，以及由于采取了适应和减缓气候变化的行动所带来的减排效果和经济成本。气候变化经济学的系统研究从 20 世纪 90 年代就已经开始，但应对气候变化的经济成本真正引起广泛关注是因为 2006 年世界银行首席经济学家 Nicholas Stern 发布的研究报告，即著名的《斯特恩报

^① The nineteenth session of the Conference of the Parties (COP 19) took place from 11 to 22 November 2013 in Warsaw, Poland. <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/warsaw-climate-change-conference-november-2013/cop-19>.

告》。报告中明确提出，气候变化将给经济、环境和人类生活带来影响，并且随着温室气体排放的增加，采取适应和减缓行动的成本在温度较高时会同时增高，推迟减缓行动会带来更大的代价和成本^[3]。此后，IPCC 第四次评估报告强调了气候变化会对农业、水资源分布、陆地生态系统及人类健康造成重要的影响，以及适应和减缓温室气体排放的主要措施等。在此基础上出现大量基于能源经济模型的针对气候变化相关的成本研究，如 Paltsev 等^[4]、Goulder 和 Pizer^[5]的研究以及围绕该问题的争议。IPCC 第五次评估报告指出，实现 2100 年将温室气体浓度稳定在 450×10^{-6} 的情景会导致全球消费的损失，在不计算减少气候变化的效益及其他共生效益的情况下，相比基准情景全球总消费将在 2030 年减少 1%~4%（中位数 1.7%），在 2050 年减少 3%~11%（中位数 4.8%）。但 IPCC 第五次评估报告中明确指出，应对气候变化的相关行动同时也会带来明显的效益，主要的效益包括两个部分，一是相对于不减排情景下避免的气候变化负面影响的成本，二是在空气质量、能源安全、社会就业等其他非气候变化领域相关的协同效益。

2014 年发布的《中美气候变化联合声明》中明确指出，“经济证据日益表明现在采取应对气候变化的智慧行动可以推动创新、提高经济增长并带来诸如可持续发展、增强能源安全、改善公众健康和提高生活质量等广泛效益”^[6]。

近年来，随着气候变化的负面影响日益显现，在同时面临多重压力的情况下，我国推进二氧化碳减排工作和实现经济可持续发展，需考虑因积极采取气候变化措施所带来的收益，实现能源、环境、社会、经济的多方共赢，成为气候变化经济学的最新发展方向，同时也是多目标决策下更切实际的立足点。而从国际层面，从应对气候变化的效益出发可以将目前以减排成本和成本分担为核心的气候谈判从“零和博弈”的泥沼中拉出来，有利于各国认真审视本国的核心利益并在此基础上提出更为现实可行的减排行动目标，也有利于全球向将温升控制在 2°C 之内的目标迈进。

1.1.3 二氧化碳减排的协同效益

应对气候变化的行动在经济发展、社会就业、能源安全和环境健康等领域均存在着协同效益。例如，减少温室气体排放和提高能源的利用效率等技术及措施会在不同方面带来协同效益，主要体现在提高行业竞争力、增加绿色就业机会、增强能源安全和增加实际收入以促进减贫，以及减少相关有害气体的排放以增加健康收益和社会福利等方面。表 1.1 分别从不同的经济层面分类总结了这些潜在的协同效益。

表 1.1 减少温室气体排放主要措施的潜在协同效益

个人层面	部门层面	国家层面	国际层面
带来健康收益和社会福利影响； 减少贫穷：能源可负担性和可获取性； 增加可支配收入	提高行业生产力和竞争力； 能源供应商/基础设施效益	创造更多的就业（也可能造成一部分失业）； 能源相关的公共支出降低； 能源安全； 宏观经济效应（如实际收入增加）	减少温室气体排放； 削减能源价格； 自然资源优化管理； 实现可负担的能源发展目标

研究发现，截至目前，本地和区域大气污染导致的健康损害的减少是温室气体减排带来的最大协同效益。能源活动的主要影响体现在经济社会发展和与能源活动相关的环境现状等。临床医学的研究证明，能源活动会对人类健康等方面造成影响。例如，电力行业对经济社会的影响体现在经济增长和结构调整，以及新能源发电就业岗位的增加等方面；对环境的影响一方面体现在有害气体如二氧化硫、氮氧化物等的排放方面，另一方面体现在噪声、电磁辐射和温度影响等方面；对人类健康的影响则体现为呼吸系统和心血管系统相关疾病的发病率增加。

1.2 气候变化和经济的相互影响

气候变化与经济系统有着复杂的相互影响。经济与气候共存于一个反馈回路。经济活动会产生温室气体（greenhouse gas, GHG），而温室气体会在大气中积累，造成辐射、温度和其他气候变量的增加，如降水和大风。反过来气候变化又会对实体经济及其他具有经济价值的环境、金融和社会资产等产生影响。同时，这些因素会影响温室气体排放，从而构成一个反馈回路。在目前大部分研究中，气候变化的学术文献往往更多地考虑反馈回路中温室气体排放与气候变化对经济的影响之间的关系^[6]。

气候变化对经济的影响主要体现在以下两个层面：①通过影响因子存量 and 生产率，以及这两者的增长率进而影响经济。②通过影响代理人实现最优化目标的行为方式来影响经济。例如，未来世界的不确定性会影响居民的生活方式，可能从而会使对医疗保健或空调的需求增加；或气候变化可能会影响到生物多样性。从主要的相互作用方面来看，可分类为八个关键的方面，分别在以下各小节中阐述。

1.2.1 气候变化对经济的直接影响及时间尺度

气候变化对不同行业的影响不同,其中一部分行业易受到气候变化的直接影响。典型的经济学研究的重点行业有农业、林业、能源和水资源利用,以及沿海地区的医疗保健和旅游经济活动等。

由于温室气体排放产生的影响可以延续几个世纪,因此时间尺度的研究是一个重要问题。还应注意的是,一些模型估计气候变化经济影响的方式是动态的,因此需要估计每一个时期内气候变化所产生的经济成本或者经济收益,但是对这种影响的描述实际上是静态的,因为在每一个时间段气候变化的影响都是独立的,彼此之间并不会产生影响。

1.2.2 气候变化对行业间相互作用的影响

气候变化给行业带来的冲击是多样的,如:①气候变化将直接影响到农业经济的贸易条件;②气候的变化可能会影响到能源使用的标准和能源的价格,这会影响到所有需要耗用能源的部门;③直接的健康影响会影响到劳动生产率,从而影响到相关部门的收入和生产力。

1.2.3 气候变化对经济增长的影响

气候变化会对经济增长产生影响,气候变化通过改变现存的产量或未来的回报,可以影响经济的增长速度。如果现存的产量下降,如生产力下降或对一个生产因素产生负的冲击,那么,这将减缓资本积累速度,因为经济总产量降低,绝对投资也将降低,这就是资本积累效应。气候变化也可能通过减少投资回报率进而降低储蓄率,如降低生产率,这就是众所周知的储蓄效应。当投资减少时,经济不能在下一个周期内增长对应的减少量,那么经济增长速度也会减慢。在内生增长模型中,低投资也会抑制生产率的提高,所以经济增长率也会降低^[7]。

1.2.4 空间和跨境溢出效应

气候变化的影响随着地区的不同而不同,所以不考虑空间维度的研究可能无法充分说明气候变化的影响。大多数关于气候变化的宏观经济研究或者是基于全球结果的汇总,或者将全球分为不同的区域来进行多区域或者单区域的研究。

在不同区域间存在跨境交易,因此也就存在一定的跨境溢出效应。采用多国

家宏观经济模型可以模拟气候变化对贸易流动的影响。然而，为了使这项分析更合理，需要将贸易商品进行高度分类。

1.2.5 不确定性

气候和经济预测都是不确定的，两者之间的相互联系自然也不确定。因此，模型的结果需要进行不确定性分析，且决策者也应该考虑不同的建模方法会对结果产生什么影响。

不确定性研究主要通过以下三种方式进行：①对参数的敏感性分析：这通常基于哪个参数是最重要的或什么参数最有意义的假设。灵敏度的相关分析近年来开始广泛地应用于研究当中^[8, 9]。②情景分析：一组场景描述了一组可能发生的且被认为是合理的参数设置。温室气体排放的不确定性经常以这种方式处理。③蒙特卡罗模拟：利用蒙特卡罗模拟对经济影响进行概率估计。在该方法中，关键参数的概率分布及参数选择必须预先指定。

1.2.6 极端天气

极端天气可能经常在短期内有较大影响，但在长期内影响不显著，从宏观经济的角度来看，应侧重于在短期内的分析。从适应的角度来看，确定一个经济体是否容易受到极端天气的影响也是非常重要的。极端天气可能会带来直接或间接的损失。直接的损失包括：直接市场损失，如农业干旱和资产流失；直接的非市场损失，如生命和财产损失、自然和文化遗产的损失等。间接的市场损失是指，随着时间的推移，业务中断会带来资金上的损失；间接的非市场损失包括由于疾病等带来的损失，以及生态系统和文化服务的损失。

除了造成的损失之外，还应充分考虑其带来的收益。例如，激励重建可能会导致住房成本的降低和劳动力的增加，同时还有生产率的变动。

1.2.7 脆弱性和适应

进行适应是为了降低经济的脆弱性。研究表明，经济上最佳的适应是积极的减缓。和减缓不同，并非所有的适应都需要政策干预。这是因为适应不会面临像减缓行动一样的显著外部性。适应的过程中会遇到很多障碍，但是同样很多研究证明适应存在着不可忽视的有效性^[10]。

1.2.8 环境和健康的影响

气候变化是影响环境问题及公众健康的许多关键因素之一。这些影响的大小和分布将取决于人口年龄、社会经济地位和种族,以及关键的公共卫生基础设施区域和地方差异等。有证据表明,基于目前的减缓和适应活动,在人口增长的敏感性(老龄化、有限的经济资源等)不变的前提下,一些现有的健康威胁仍将加大,并且会有新的健康威胁出现^[11]。潜在的气候变化对健康的影响是多方面的,温度相关的死亡率影响是重要的体现之一。

因而采取积极的应对气候变化的行动可以避免气候变化对经济系统产生的上述影响,避免经济系统的直接或间接损失,这些避免的损失即应对气候变化行动的效益。而如果这些效益是由于应对气候变化的行动产生的,那么作用于气候目标之外的其他社会经济目标,则就是协同效益。

1.3 协同效益的概念和各方面体现

1.3.1 国内外关于协同效益概念的论述

协同效益的正式提出是在 IPCC 第三次评估报告中,在该报告中首次提出了附属效益(ancillary benefits)的概念,也就是定义中广泛意义上的协同效益。附属效益具体包括,在实现气候减缓的相关行动中,由于减缓行动对社会经济系统的联动作用所引发的资源效率提高等方面所带来的社会经济效益。经济合作与发展组织(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)进一步把协同效益定义为,在温室气体减排的行动过程中,对该目标以外的其他相关系统带来的影响,以及可以用货币化的方法评估的部分。美国国家环境保护局(United States Environmental Protection Agency, EPA)的定义则从温室气体减缓及大气污染治理的综合政策的角度出发,指出在这样的综合政策情景下所产生的所有的相关正效益都归属于协同效益的范畴。亚洲开发银行对协同发展的定义更多地关注和立足于发展中国家的发展,着重提出了需要包括减缓行动对发展中国家经济发展的影响等^[12]。

在我国,协同效益更多地和环境相关效益联系在一起,一方面是在降低温室气体排放的同时,会带来SO₂、NO_x和PM等主要常规污染物排放的变化;另一方面体现在对主要常规污染物的排放进行的相关控制措施,也会对以二氧化碳为主

的温室气体排放带来一定的影响。总体来看,协同效益的定义包含多方面内容,既包括减缓行动对空气质量的影响,以及进而带来的人类健康问题,也包括本地经济发展、能源安全、绿色创新、就业情况和社会福利等内容。1.3.2节和1.3.3节主要从产业竞争力、社会就业、能源安全等经济社会效益和环境健康效益方面进行主要研究文献的综述和总结。

1.3.2 经济社会方面的协同效益研究

二氧化碳减排的行动在经济社会层面存在着广泛的协同效益,本小节主要从微观层面的企业竞争力、技术创新,宏观层面的国家竞争力,社会福利相关的绿色就业,以及国际层面的能源安全等几个角度来总结减缓行动对经济社会效益影响的研究。

最早研究环境对竞争力的影响的是哈佛商学院的经济学家和战略学教授Porter^[13],他提出了如果采用合理规划和设计的环境监管措施,实际上可以增强企业的竞争力的观点。这一观点强烈冲击着当时关于环境监管的传统观点,人们仍普遍认为要求企业减少污染这样的外部性必定会限制企业的选择,从而减少利润。关于这一假设和结论的争论逐渐增多,Ambec等^[14]对这些争论性的研究展开分析,并对主要的研究方向进行了总结。

近年来,越来越多的研究表明^[15-24],实施积极的二氧化碳减缓行动并不会使企业因付出额外的成本而导致竞争力下降,同时在国家层面也没有明显证据显示国家因增加了相应的减排成本而对整体福利或整体经济生产力造成损失。严格的控制措施在某种程度上是对积极减排企业的隐形补贴,进而在更严格的减排目标的前提下提高技术创新,实现资源优化配置,并在一定程度上提高整体经济效率和福利。

Johnston和Haščić^[15]研究发现,除了激发创新,不同可再生能源政策也会对不同种类可再生能源的投资产生不同的影响。Slowak和Taticchi^[23]论述了工业领域对气候变化的关注持续升温的现状,在工业领域的新技术具备怎样的减排效果已经成为工程经济学评判该技术的重要标准。Zain和Kassim^[24]以样本研究的方式发现公司实施持续改进气候和环境的措施会对企业竞争力产生积极的影响。Berman和Bui^[25]以洛杉矶地区炼油厂为例,经研究证明其生产率明显高于污染管制并不严格的其他地区相似的炼油厂。在此基础上,Buxel等^[26]提出企业使用环境生命周期评估(life cycle assessment, LCA)的方法来系统评估产品或服务在减少碳排放及环境方面的表现,以提高产品的竞争力。减缓行动和排放控制的监管在生产率及竞争力提高之间存在着一定的滞后。例如,Lanoie等^[27]通过对魁

北克制造业的跟踪分析,证明减排的措施和法规在 3~4 年后会促使生产率有相当程度的增加。

和企业竞争力相对应的另一个问题是气候减缓政策和相应的环境政策对就业的影响,一部分研究者担心这会增加失业率,而另一部分则认为减缓行动可以创造相当多的与节能环保相关的绿色就业机会。主要的实证研究包括 James^[28]和 Wei 等^[29]的研究,这些代表研究强调了环保工作在不同领域的定义,分别在不同行业研究了减缓行动对总工作岗位和净工作岗位的影响。近年来,关于绿色就业问题更多地考虑了劳动力市场完善程度和减缓行动推进程度等因素对就业率的影响。例如,Chateau 等^[30]采用 OECD 的考虑环境连接的可计算的一般均衡 (computable general equilibrium, CGE) 模型研究了劳动力市场不完善情况下的就业和实际工资情况,研究结果表明劳动力市场机制对于气候减缓行动在就业方面有着不可忽略的影响,在推行气候减缓行动时需要同时关注劳动力市场的变化。Deschenes^[31]回顾了主要的关于绿色就业的研究,评估了减缓行动在对就业率造成影响方面的证据。

对能源安全问题的关注由来已久,随着原油市场价格的不断波动,以及能源供应局势的紧张,各国均将能源政策和能源安全上升到国家利益和安全的层面。在气候变化的大背景下,能源安全作为直接相关的关键问题,更加引起国际社会和各方利益体的密切关注。近年来有众多关于气候减缓行动和能源安全关系的研究^[32~38],如 Victor 等^[35]基于 MARKAL 模型对美国的能源系统安全进行研究,Vliet 等^[38]在 MESSAGE 模型的基础上研究了三个亚洲地区可持续发展的多个维度来模拟其发展情况,从气候和能源技术选择、能源安全、能源获取和空气污染的互动等多方面展开研究。

国际应用系统分析研究所 (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) 发布的全球能源评估 (global energy assessment, GEA) 报告^[39]中建立了简化的衡量能源安全的标准,也便于进一步衡量减缓气候变化的行动对能源安全的影响。在 GEA 报告中定义的能源安全强调了主权或者对外依存度和应对风险的稳健性,其中主权和对外依存度呈反向关系。基于以上研究,国家能源安全的指标 I 可以简化地用式 (1.1) 表示:

$$I = -\sum_i (1 - m_i) \cdot s_i \cdot \ln(s_i) \quad (1.1)$$

其中, i 是燃料类型; s_i 是燃料 i 在总的能源供应中的份额; m_i 是燃料 i 在总进口中的份额,那么第一项代表的是国内的能源供应份额。这个综合指数可以体现能源市场波动和燃料供应多样化等方面的因素。随着减缓气候变化的行动和相应政策的逐渐紧缩,能源安全的综合指数呈现出较为一致的增长趋势。该指数可以简化地表征减缓气候变化的政策带来的协同效益。当然,这种衡量方法存在一些风

险，能源安全的变化需要考虑多方面因素，进行综合跨区域的研究。

1.3.3 环境健康方面的协同效益研究

研究表明，减缓气候变化行动会对环境质量和人类健康造成影响，最大程度的协同效益来自因减缓行动带来的污染物排放的减少，这种效益又直接和人类健康损失相关。具体因果关系表现为：局地污染物在空间排放并传播，暴露在空气中的人群由于吸入一定量的污染物而使健康受到影响，文献通常从流行病角度和社会福利角度评价这种影响。

常规污染物排放的主要来源是电力生产过程中的化石燃料燃烧，工业生产过程、交通运输消耗的动力燃料燃烧，以及居民取暖消耗的燃料燃烧。对于每一项燃烧技术，确立和研究其直接排放因子和通过末端处理后的排放控制系数，可以有效建立能源和环境间的联系，深化理解在源头环节和末端处理环节对污染物排放的控制。

空气污染对人类健康的影响是流行病学的范畴，为了估计对人类健康的危害，研究需要将污染物浓度的空间信息与人口的空间信息进行叠加，基于浓度响应函数来估算主要的健康损失。在对损失额的价值量估计上，最常用的方法是统计生命损失价值的估值法（the value of a statistical life, VSL），其他常用的方法有潜在寿命损失年法和评估支付的意愿法。最典型的是被广泛引用的 Viscusi 和 Aldy^[40]的研究，该研究回顾了来自 10 个国家 60 多项研究的死亡风险估计，考虑了风险溢价的影响，以及不同年龄对统计生命损失价值的影响，结果表明统计生命损失价值的收入弹性在 0.5~0.6。这项研究为世界银行等机构核算协同效益的价值量提供了理论基础。

存在强有力的证据证明气候减缓存在环境和健康方面的协同效益，我们选取四篇典型文章来佐证。Shindell 等^[41]在《科学》杂志上发表研究，综合分析了减少甲烷和黑碳（短寿命温室气体）排放的协同效益。与国际能源署（International Energy Agency, IEA）基准情景相比，14 种不同的干预措施使 2050 年温升降低 0.47°C。2030 年，降低的黑碳暴露引起的死亡人数达到 180 万人，价值 5.3 万亿美元（约 5% 的世界生产总值）。印度、中国、巴基斯坦和印度尼西亚享有最大的健康效益。

West 等^[42]采用了相对严格的气候政策情景 RCP4.5，基于基准情景测量了大气污染减排带来的公众健康协同效益。他们发现大多数国家 21 世纪的 CO₂ 减排净效益（协同效益减去边际减排成本）可以以数百美元/吨 CO₂ 减排量计算。在 2050 年约 190 亿吨 CO₂ 减排量中，仅有 30 亿吨来自高收入国家，其余则来自中等收入