

中国多地区低碳能源技术的优化选择

彭盼¹, 任心原², 范英², 朱磊²

(1. 中国节能环保集团有限公司, 北京 100082; 2. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

摘要 自巴黎气候大会顺利召开之后, 全球各国在立即开展相关措施应对气候变化上已达成更深的共识. 人类需要实施更多的努力减缓温室气体排放, 以此将大气中温室气体浓度控制在 450 ppmv 以下, 将很大可能达到 IPCC 提出的 21 世纪末全球平均温度上升在 2 摄氏度以内的预期目标. 全球各国的经济和技术发展存在较大的差异, 甚至像中国这样最大的发展中国家, 其不同地区的经济发展和资源禀赋也存在较大的差异. 因此, 非常有必要构建相关多区域模型研究全球乃至中国不同地区在应对气候变化背景下经济发展和能源技术演变的规律. 本文基于全球多区域综合评估模型 (WITCH) 建立全球-中国多区域 WITCH-China 模型, 根据地区经济发展和资源禀赋的差异性, 将中国地区划分至东、中、西三部分, 以研究在全球温控目标下中国不同地区的能源技术演化和碳排放路径的变化规律, 同时对比中国和其他世界各地的宏观经济水平受到气候变化影响的差异性.

关键词 综合评估模型; 低碳能源技术; 多区域分析; 气候变化

The optimal pathway of low carbon technologies of multiregions in China

PENG Pan¹, REN Xinyuan², FAN Ying², ZHU Lei²

(1. China Energy Conservation and Environmental Protection Group (CECEP), Beijing 100082, China; 2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract After the successful conclusion of Paris Climate Conference (COP21), countries are now attempting to identify implementation measures to address climate issues. In order to achieve the 2-degrees target, human needs to make more efforts on mitigation measures to control atmospheric carbon concentration under 450 ppmv. Due to the different levels of economic development, countries, even for the different regions in China, have different local development pathways of low carbon technologies. Therefore, it is of great significance to study the evolution of economic development and energy technologies in multi-regions by establishing multi-region integrated assessment model (IAM). This article extends the WITCH model to a Global-Chinese multi-regional IAM model, named as WITCH-China, to study the evolution of Chinese multi-regional economic development, energy consumption and low-carbon energy technology development. This may provide useful insights for scholars and policy designers to forecast the future consumption pathways of low-carbon technologies of different regions in China, and contribute to the creation of strategic development plans related to the diffusion of carbon-free technologies throughout the world and China.

收稿日期: 2017-04-10

作者简介: 彭盼 (1991-), 男, 汉, 江西南昌人, 博士, 中国节能环保集团有限公司, 研究方向: 能源经济学、系统建模, E-mail: pengpan43@126.com; 任心原 (1994-), 男, 汉, 河北人, 硕士研究生, 北京航空航天大学经济管理学院, 研究方向: 能源经济学, E-mail: rxy13051590235@126.com; 范英 (1966-), 女, 汉, 河北人, 博士, 北京航空航天大学经济管理学院教授, 研究方向: 能源经济学, E-mail: yfan1123@buaa.edu.cn; 通信作者: 朱磊 (1983-), 男, 汉, 安徽人, 博士, 北京航空航天大学经济管理学院副教授, 研究方向: 低碳投资、能源经济管理, E-mail: leizhu@buaa.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (71673019, 71133005, 71690245, 71273253)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71673019, 71133005, 71690245, 71273253)

中文引用格式: 彭盼, 任心原, 范英, 等. 中国多地区低碳能源技术的优化选择 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(8): 1968-1982.

英文引用格式: Peng P, Ren X Y, Fan Y, et al. The optimal pathway of low carbon technologies of multiregions in China[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(8): 1968-1982.

Keywords integrated assessment model; low carbon technologies; multi-region analysis; climate change

1 研究背景

全球气候变化的特点主要表现为长期性、全球性、环境损害性、技术依赖性和不确定性。其中, 环境损害性、技术依赖性和不确定性都会由于全球各地区的经济发展和能源技术演变的不同特征而体现出相应的地区特征。因此, 应对和解决气候变化问题势必需要考虑和研究各个国家和地区经济体的减排行为、替代能源技术发展、碳排放水平以及能源消费状况等。因此, 全球多区域综合评估模型的构建对研究气候变化问题具有重要的意义。Manne^[1] 等人于 1995 年构建的 MERGE 模型就是全球多区域综合评估建模研究的代表模型。其基于 Ramsey-Solow 模型框架构建而得, 一方面将能源技术模块细分为电力和非电力, 并将多类低碳能源技术引入至模型能源技术模块; 另一方面还对气候损失进行量化评估, 并将其细分为市场损失和非市场损失。Nordhaus 和 Yang^[2] 建立的 RICE 模型也是全球多区域综合评估模型的经典模型。除了基于 DICE 模型将全球进行区域细分之外, 他们还在模型的经济生产机制, 能源价格机制设计以及碳循环和气候损失之间的关系建立等进行了较大的改进。此外, Bosetti^[3] 等人建立的 WIT-CH 模型也是此类研究领域的又一典型模型。其将自底而上和自顶而下两种模型框架相结合, 并根据具体的研究问题将全球细分为 12~15 个区域。该模型通过自底而上的建模思想将多种能源技术引入至能源模块, 并基于 learning-by-doing (LBD)、learning-by-searching (LBS) 和地区间的知识溢出等内生考虑能源技术的技术进步。

然而, 随着全球经济的快速发展, 各国的经济水平和能源技术已经发生了巨大的变化。尤其是对于中国, 作为最大的发展中国家, 其经济水平一直以来保持高速增长势头。此外, 由于能源投入是经济生产过程中必不可少的要素, 中国在能源消费总量和温室气体排放水平也高居世界第一。然而, 中国各地区由于资源禀赋和经济结构的差异, 其能源技术演变以及可能遭受的气候损失水平也各不相同。因此, 当前不仅仅需要在全球多区域建模研究的基础上对全球应对气候变化措施影响进行分析, 还需要重点考虑类似中国这样的最大排放国, 以及其各地区在气候变化背景下的经济发展和能源技术演变轨迹的差异。目前, 控制 CO₂ 排放的方法主要包括: 提高能源利用效率、控制化石能源的消耗量, 积极发展无碳或低碳能源技术, 以及碳捕获与封存技术 (CCS)。长期来看, 控制温室气体最根本的方式还是积极发展无碳和低碳的能源技术, 以降低对传统化石能源 (煤炭、石油和天然气) 的需求和依赖。

面对愈演愈烈的气候问题, 作为最大碳排放国家, 中国需要大力发展这些低碳能源技术, 以便应对未来中国持续上升的能源需求和减排控制目标。然而, 由于资源禀赋和经济发展路径存在较大的差异, 中国地区间低碳能源技术的最优演变规律也存在较大的差异。因此, 为进一步考虑全球各地区和中国地区之间的经济和能源技术特点, 本文进一步建立包含中国地区特征的全球多区域综合评估模型, 并在在全球温控目标约束下, 研究中国和世界其他地区的经济发展和能源使用所遭受的影响。同时, 进一步探索中国各地区之间的能源结构变化存在的差异性, 并试图得到全球各地区和中国的能源技术演变的最优变化轨迹。本文的研究贡献主要体现在以下两点: 1) 基于 WITCH 模型建立全球 - 中国多区域综合评估模型, 针对气候变化背景下中国的低碳能源技术演变规律进行建模分析。2) 基于中国各地区历史数据, 合理估算中国不同地区的宏观经济和能源技术参数, 并进一步将模型中国区域细分为东部、中部和西部地区, 以更好地研究全球温控目标下中国不同地区间低碳能源技术最优演变路径之间的差异。

2 文献综述

研究气候变化问题需要综合考虑大气环境、海洋环境、陆地环境、人类社会生存环境和人类经济活动组成的复杂系统, 因此, 作为考虑要素最为全面的综合评估模型 (integrated assessment model, IAM), 该模型被广泛应用于研究气候变化影响的研究当中。不同于气候系统模型 (climate system model, CSM) 和影响、适应和脆弱性模型 (impact adaptation vulnerability model, IAVM) 仅仅关注或侧重气候系统中单个或者部分元素, IAM 模型不仅仅包括描述经济生产、居民消费和技术投资等社会系统模块, 而且还描述包含碳循环和温室效应过程的气候系统模块, 以及气候变化对人类经济生产和生存环境反馈影响的气候损失评估模块。经过 40 多年的发展, IAM 模型在研究不同气候约束情景下的经济增长、能源技术演化, 碳排放路径变化以及

气候损失评估等方面具有非常广泛的应用实践。基于此, IAM 模型逐渐成为研究气候变化背景下能源 - 经济 - 环境系统交互问题的重要建模工具 (dowlatabadi)^[4]。

关于综合评估模型的研究始于美国经济学家 Nordhaus^[5-7] 于 1994 年构建的动态气候经济综合模型 (dynamic integrated model of climate and economy, DICE) 和国际应用系统分析研究所 (IIASA) 于 20 世纪 90 年代左右发展的能源供给替代系统及其环境影响模型 (model of energy supply system alternative and their general environment impact, MESSAGE)。随后, 20 世纪 90 年代左右, 许多学者在综合评估模型构建方面继续开展一系列相关研究。例如, Peck 和 Tiesberg^[8] 开发的碳排放轨迹评估模型 (carbon emissions trajectory assessment, CETA), 1992 年由剑桥大学商学院的 Hope^[9] 教授为研究欧盟问题而发展的温室气体影响政策分析模型 (policy analysis for the greenhouse effect, PAGE), 经合组织 (OECD) 基于 GREEN (General equilibrium Environmental model) 模型框架发展的排放预测与政策分析模型 (emissions prediction and policy analysis model, EPPA) 以及美国能源经济学家 Alan S. Manne 等在 Ramsey-Solow 模型的框架下合作构建的全球和地区温室气体减排政策影响模型 (model for evaluating regional and global effects of GHG reductions policies, MERGE), 柏庆国^[10] 等人构建了碳排放限额和碳限额与交易政策下的两类分布式鲁棒优化模型等, 周艳菊^[11] 等人在考虑碳排放限额与交易机制下, 对基于嵌入式低碳服务的一个低碳服务提供商与一个碳排放依赖型制造商的产量决策、碳净化水平选择和收益分配问题进行了研究, 此外, Duan^[12-15] 等基于 E3METL 模型构建中国综合评估模型 (CE3METL), 并以此分析和研究不同碳排放约束情景下中国的最优碳税路径演化。CE3METL 模型在遵循拉姆西 (Ramsey) 法则基础上, 并根据新古典经济理论建立的最优增长模型。CE3METL 在结构上包括宏观经济、能源技术和碳排放三个模块, 能源部门除了考虑由煤炭、石油和天然气等构成的复合化石能源 (Fossil) 外, 还包括核能 (NUC)、生物质能 (BIO)、水电 (HYD)、光伏太阳能 (PVS)、风能 (WIND)、地热能 (GEO) 和海洋能 (MAR) 等其它七种清洁能源技术。

由于温室效应形成和气候影响的全球性, 对气候变化问题的研究通常会基于全球视角展开。如 Nordhaus^[6] 在 1993 年使用的 DICE 模型, DEMETER (DE-carbonisation model with endogenous technologies for emission reductions) 模型, Van der Zwaan^[16] 于 2002 年以及 Popp^[17] 于 2004 年使用的 ENTICE (a model for endogenous technological change) 模型, Kemfert^[18] 于 2005 年使用的 WIAGEM (world integrated assessment general equilibrium model) 模型和 Simon^[19] 与 Freeman^[20] 于 2016 年使用的 E3METL (energy-economy-environment model with endogenous technological change by employing logistic curves) 模型, 以及宋马林^[21] 于 2016 年使用的关联网数据包络分析模型等。此外, 为了研究各个国家或区域的能源 - 经济 - 环境系统交互关系, 许多综合评估模型的构建将全球区域更加细化。Manne 和 Richels^[1] 在 Ramsey-Solow 模型的框架下发展了全球多区域能源 - 经济 - 环境综合评估模型, 即 MERGE 模型, 将全球划分为中国、美国、东欧、西欧、加拿大 - 澳大利亚 - 新西兰、墨西哥 - 欧佩克、印度、日本和世界其它地区等 9 个区域, 是较早研究应对气候变化问题的全球多区域综合评估模型。Nordhaus 和 Yang^[2] 基于 DICE 模型建立多区域的动态气候经济模型, 即 RICE 模型。其研究表明地区非合作情景下的碳减排量要远小于合作情形, 但此类情景难以在现实中复制。随后, Hope^[9] 基于早期的 PAGE 模型, 拓展开发得到全球 8 区域气候政策分析模型, 即 PAGE2002。此外, 还有 Fischer^[22], Liang^[23], Su^[24], Wu^[25] 等人的研究对中国不同地区进行相应的建模分析。

综上所述, 由于气候变化及其经济影响具有全球性、长尺度性以及地域性, 因此, 对于全球气候变化问题的研究大多数通过建立全球多区域的综合系统模型进行分析。本研究基于 Bosetti^[3] 等人于 2006 年建立的全局技术变化混合模型 (world induced technical change hybrid model, WITCH) 建立全球 - 中国综合评估模型, 并进一步将中国细分为东、中、西部地区。WITCH 模型为全球多区域综合评估模型, 其将全球分为 12 个区域。相比于其他模型, WITCH 模型对能源技术的刻画较为详细, 有利于研究多种低碳能源技术演变等相关问题。WITCH 模型的能源模块通过 CES (constant elasticity of substitution) 复合包含电力和非电力 18 类能源技术, 除了考虑 LBD 和 LBS 学习曲线引导的技术进步, WITCH 模型还刻画包含能效提升的知识累积和地区间知识溢出效应带来的技术进步。此外, WITCH 模型还将博弈思想引入到建模中, 通过递归求

得系统的纳什均衡解, 从而使得各区域的资本、能源资源进行最优分配. 因此, 本文基于 WITCH 模型建立全球 - 中国多区域综合评估模型, 研究全球温控目标下中国不同地区间低碳能源技术最优演变路径之间的差异. 本文接下来的结构安排如下: 第 3 节展示了本文建立的全球 - 中国多区域综合评估模型, 第 4 节详细介绍了本文的数据来源与情景设置, 第 5 节对全文主要结果进行阐述和分析, 第 6 节给出主要结论和相关政策建议.

3 模型介绍

本文将基于 Bosetti 等人^[3]建立的 WITCH 模型 (world induced technical change hybrid) 建立全球 - 中国多区域综合评估模型, 即 WITCH-China 模型, 将延续综合评估模型的传统结构特征, 主要表现在: 1) 经济模块, 基于跨期最优经济增长模型构建, 以此捕捉长期经济增长动态演变规律. 2) 能源模块, 基于自底而上的建模框架, 将多种能源技术以 CES 形式组合, 并通过在生产函数引入能源投入实现与经济模块的强连接. 此外, 为了更好地刻画能源技术的内生技术进步机制, 我们不仅仅考虑了 LBD 和 LBS 学习曲线引导的技术进步, 还考虑能效提升的知识累积和地区间知识溢出效应带来的技术进步. 3) 气候模块, 基于传统碳循环模块建立全球温室气体浓度上升所引发的全球平均温度上升机制, 并对全球气候损失进行了量化分析和评估.

此外, 为了进一步考察全球各地区和中国地区间的差异性, 我们将模型所涉及的区域进一步细分. 全球分为 11 个非中国区域和 3 个中国区域, 11 个非中国区域主要包括: cajaz、easia、India、kosau、laca、mena、Europe、sasia、ssa、te、USA; 此外, 3 个中国区域主要包括: 中国东部地区 (China-east)、中国中部地区 (China-central) 和中国西部地区 (China-west). 区域的详细划分介绍详见表 1.

表 1 各区域详细划分介绍

区域名称	具体国家或者地区
cajaz	加拿大、日本、新西兰
easia	东南亚地区 (含印度尼西亚)
India	印度
kosau	韩国、南非和澳大利亚
laca	拉丁美洲、墨西哥和加勒比地区
mena	中东和北非
Europe	欧洲
sasia	南亚 (不含印度)
ssa	非洲撒哈拉以南
te	东欧非欧盟国家 (含俄罗斯)
USA	美国
China-east	北京市、天津市、河北省、辽宁省、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省、海南省、香港、澳门、台湾
China-central	山西省、吉林省、黑龙江省、安徽省、江西省、河南省、湖北省、湖南省
China-west	内蒙古自治区、广西壮族自治区、重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区

数据来源: Bosetti^[3]; 国家统计局^[26].

3.1 目标函数

在 WITCH-China 模型中, 假设每个地区均存在一个虚拟中央计划人, 负责最大化该地区的累积效用. 这里, 我们假设累积效用主要由人均消费来表示. 由此, 每个地区的目标函数可以表示为下式:

$$W_n = \sum_t L_{n,t} \cdot \frac{(C_{n,t})^{1-\eta} - 1}{1-\eta} \beta^t. \quad (1)$$

其中, W_n 表示第 n 个地区的累积效用, $L_{n,t}$ 表示第 n 地区第 t 期的人口, $C_{n,t}$ 表示第 n 地区第 t 期的消费水平, η 表示相对风险厌恶程度, β 表示纯时间偏好贴现因子, 并满足 $\beta = (1 + \rho)^{\Delta t}$, ρ 为贴现率, Δ 等于 5, n 和 t 分别表示地区和时间.

3.2 经济模块

由上节可知, 各地区的效用函数主要是由地区人均消费水平来衡量的. 在 WITCH-China 模型中, 总消

费由社会净总产出与各类投资和运营成本的差值计算得到. 具体表达如下式:

$$C_{n,t} = Y_{n,t} - I_{n,t}^{FG} - \sum_j (I_{j,n,t}^{RD} + I_{j,n,t} + (oem_{j,n,t} \cdot K_{j,n,t})) - \sum_f (I_{f,n,t}^{OUT} + (oem_{exf} \cdot Q_{f,n,t}^{OUT})) - I_{n,t}^{GRID} - I_{n,t}^{PRADA} - I_{n,t}^{SCAP} - I_{n,t}^{RADA} \quad (2)$$

其中, $Y_{n,t}$ 表示社会净总产出, $I_{n,t}^{FG}$ 表示最终产品投资, $I_{j,n,t}^{RD}$ 表示第 j 种能源技术的研发投入, $I_{j,n,t}$ 表示第 j 种能源技术的能源投资, $oem_{j,n,t}$ 表示第 j 种能源技术的单位运营成本, $K_{j,n,t}$ 表示第 j 种能源的装机容量, $I_{f,n,t}^{OUT}$ 表示第 f 种化石能源开采部门的投资, oem_{exf} 表示化石能源开采的单位成本, $Q_{f,n,t}^{OUT}$ 表示第 f 种化石能源的开采量, $I_{n,t}^{GRID}$ 表示对电网基础设施的投资, $I_{n,t}^{PRADA}$, $I_{n,t}^{SCAP}$, $I_{n,t}^{RADA}$ 表示适应类措施投资.

此外, WITCH-China 模型中的经济生产方程由劳动力、资本、能源要素投入的 CES 形式符合, 如下式:

$$Y_{n,t} = \frac{tfp0_n \left(\alpha_n \left(tfpy_{n,t} K_{n,t}^{FG\beta_n} L_{n,t}^{(1-\beta_n)} \right)^\rho + (1 - \alpha_n) ES_{n,t}^\rho \right)^{1/\rho}}{\Omega_{n,t}} - \sum_f C_{f,n,t} - \sum_{ghg} C_{ghg,n,t} \quad (3)$$

其中, $K_{n,t}^{FG}$ 表示最终产品的资本存量, $ES_{n,t}$ 表示经济生产的能源投入, $L_{n,t}$ 表示劳动力, $\Omega_{n,t}$ 表示气候反馈系数, $C_{f,n,t}$ 表示第 f 种化石能源使用成本, $C_{ghg,n,t}$ 表示温室气体排放成本, $tfp0_n$ 表示用于校准初期 GDP 水平的参数, α_n 和 ρ 分别表示为 CES 生产函数的参数, 其中 $\rho = \frac{1-\xi}{\xi}$, ξ 表示资本劳动力和能源投入要素之间的替代弹性, β_n 为 CD 生产函数的参数, $tfpy_{n,t}$ 表示全要素生产率.

最终产品的资本累积遵循折旧叠加的原则, 如下式:

$$K_{n,t+1}^{FG} = K_{n,t}^{FG} \cdot (1 - \delta_{FG})^{\delta_t} + \delta_t \cdot I_{n,t}^{FG} \quad (4)$$

其中, $\delta_{n,t}^{FG}$ 为年折旧率, $I_{n,t}^{FG}$ 表示最终产品的投资.

3.3 能源技术模块

在 WITCH-China 模型中的能源要素投入 ($ES_{n,t}$) 由实际能源投入和能效进步的知识存量复合而成, 如下式:

$$ES_{n,t} = \phi_n^{ES} \left(\alpha_n^{ES} R DEN_{n,t}^{\rho_{ES}} + (1 - \alpha_n^{ES}) tfp_{n,t} EN_{n,t} \rho_{ES} \right)^{1/(\rho_{ES})} \quad (5)$$

其中, α_n^{ES} , ϕ_n^{ES} , ρ_{ES} 表示 CES 方程的参数, 分别根据第 n 地区基年的数据估算得到. $tfp_{n,t}$ 表示能源的要素生产率, $R DEN_{n,t}$ 表示能效进步的知识存量, $EN_{n,t}$ 表示实际能源投入. 实际能源投入由电力和非电力能源投入复合而成, 如下式:

$$EN_{n,t} = \left(\alpha_n^{EN} EL_{n,t}^{\rho_{EN}} + (1 - \alpha_n^{EN}) NEL_{n,t}^{\rho_{EN}} \right)^{1/(\rho_{EN})} \quad (6)$$

其中, $EL_{n,t}$ 表示电力能源投入, $NEL_{n,t}$ 表示非电力能源投入, α_n^{EN} 和 ρ_{EN} 分别表示实际能源投入 CES 方程的参数. 图 1 展示了具体能源技术的 CES 复合形式.

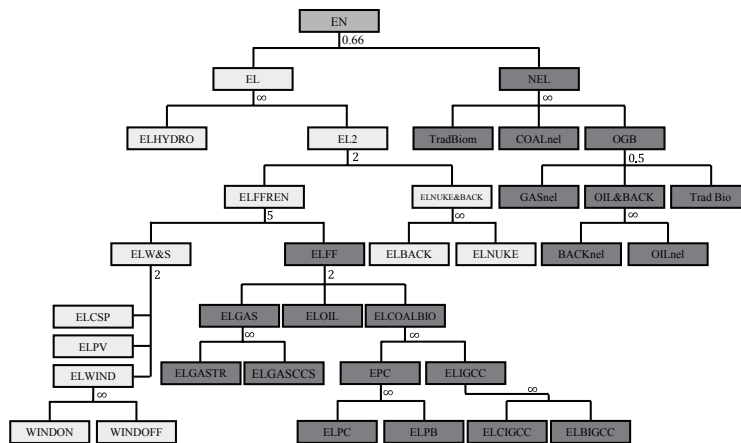


图 1 WITCH-China 模型能源技术的 CES 复合

如图 1 所示, 实际能源投入分为电力能源和非电力能源投入. 电力能源投入中包含化石能源发电和非化石能源发电. 基于化石能源的电力主要包含: 天然气、煤炭以及石油发电, 其中天然气发电分为装备 CCS 和

普通天然气发电, 基于煤炭发电则包括煤粉发电 (PC) 和整体煤气化联合循环发电系统 (integrated gasification combined cycle, IGCC). 基于非化石能源的电力投入主要包括: 水电、核能、太阳能发电和风电等 (具体参数介绍见表 2).

表 2 能源技术符号解释

技术符号	解释	技术符号	解释
EN	能源 CES 组合	ELNUKE	核电
EL	电力	ELCSP	聚光太阳能发电
NEL	非电力	ELPV	光伏
TradBiom	传统生物质能	WINDON	陆上风电
COALnel	非电力煤炭	WINDOFF	海上风电
GASnel	非电力天然气	ELGASTR	传统天然气发电
Trad Bio	传统生物燃料	ELGASCCS	CCS 天然气发电
BACKnel	非电力低碳技术 (backstops)	ELOIL	油电
Oilnel	非电力石油	ELPC	粉煤发电
ELHYDRO	水电	ELCIGCC	综合气化联合循环煤电
ELBACK	低碳技术发电 (backstops)		

一次能源总供给等于各部门能源消耗总和, 如下式:

$$Q_f(t, n) = \sum_j Q_{j,f}(t, n). \tag{7}$$

其中, $Q_f(t, n)$ 表示第 t 时期第 n 地区第 f 种一次能源的总供给量, $Q_{j,f}(t, n)$ 表示第 t 时期第 n 地区第 j 部门第 f 种一次能源的总供给量.

第 f 种一次能源消费量与资源开采量和地区该能源净进口量之和相等, 如下式:

$$\sum_n Q_f(t, n) = \sum_x X_f(t, n). \tag{8}$$

其中, $X_f(t, n)$ 表示第 t 时期第 n 地区第 f 种一次能源资源开采量和地区该能源净进口量之和.

能源净成本则包含资源开采成本和净进口成本, 如下式:

$$C_f(t, n) = MC_f(t, n) \times Q_f(t, n) + p_f(t, n) \times X_f(t, n). \tag{9}$$

其中, $C_f(t, n)$ 表示第 f 种一次能源的使用成本, $MC_f(t, n)$ 表示该种资源开采的边际成本, $p_f(t, n)$ 表示进口的价格.

对于电力部门, 电力生产装机容量受到生产能力资本存量和生产能力系数的乘积的约束:

$$EL_j(t, n) \leq \mu_j(t, n) \times KEL_j(t, n). \tag{10}$$

此外, 本文参考 German Aerospace Centre (DLR) 和 the Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) (Pietzcker^[27]) 研究得到的各地区太阳能潜力分布刻画各地区太阳能的供给曲线. 风电供给曲线则参考于 National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Arent^[28]).

对于可再生能源技术, 参考于基准 WITCH 模型的设置 (Bosetti 等^[3]), 本模型除了考虑 LBD 和 LBS 学习曲线引导的技术进步, 还刻画了能效提升的知识累积和地区间知识溢出效应带来的技术进步.

3.4 气候模块

每个地区由化石能源燃烧产生 CO₂ 排放满足下式:

$$emi_{n,t}^{CO_2} = \sum_t \omega_{f,CO_2} X_{f,n,t} - CCS_{n,t} \tag{11}$$

$$WE_t^{CO_2} = \sum_n \frac{emi_{n,t}^{CO_2}}{wemi2qemi_{CO_2}} \tag{12}$$

其中, $emi_{n,t}^{CO_2}$ 表示第 n 地区第 t 期的化石能源燃烧产生的 CO₂ 排放量, ω_{f,CO_2} 表示第 f 中化石能源的碳排放因子, $X_{f,n,t}$ 表示第 f 种化石能源的使用量, $CCS_{n,t}$ 表示碳捕获封存 CO₂ 的排放量. $WE_t^{CO_2}$ 表示全球 CO₂ 排放导致的碳排放, $wemi2qemi_{CO_2}$ 为 CO₂ 排放的碳排放转换因子. 除了考虑 CO₂ 排放, WITCH-China 模型通过 Environmental Protection Agency (EPA) 的数据估算了其他温室气体的边际减排成本曲线,

并将其考虑至本模型的温室气体排放,具体包括: CH_4 和 N_2O . 当然,除了排放温室气体以外,能源消费还会产生其他污染物,如二氧化硫、烟粉尘等. 由于温室效应主要是大气层温室气体浓度上升而引起的,因此本文没有考虑这些其他污染物排放对于模拟结果的影响.

WITCH-China 模型中的气候模块由三层碳循环系统构建,并由 Meinshausen 等^[29]建立的气候模型 MAGICC 模型进行参数校准. 碳循环方程如下式:

$$M_{a,t+1} = A_{a,a} \times M_{a,t} + A_{u,a} \times M_{u,t} + \Delta_t W E_t^{\text{CO}_2}, \quad (13)$$

$$M_{u,t+1} = A_{a,u} \times M_{a,t} + A_{u,u} \times M_{u,t} + A_{t,u} \times M_{l,t}, \quad (14)$$

$$M_{l,t+1} = A_{u,l} \times M_{u,t} + A_{t,l} \times M_{l,t}. \quad (15)$$

其中 $M_{a,t}$ 、 $M_{u,t}$ 、 $M_{l,t}$ 分别表示大气层、浅海层和深海曾层碳浓度, A 表示三类碳循环层之间的转换因子,且满足下式:

$$A = \begin{pmatrix} 0.88 & 0.04704 & \\ 0.12 & 0.94796 & 0.00075 \\ & 0.005 & 0.99925 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

此外, CH_4 和 N_2O 在大气层中的浓度如下式:

$$M_{oghg,atm,t+1} = d_{1,oghg}^{\Delta t} \times M_{oghg,atm,t} + d_{2,oghg} \times \frac{1}{2}(W E_t^{oghg} + W E_{t+1}^{oghg}) + (1 - d_{1,oghg}^{\Delta t}) \times \overline{stock}_{oghg}. \quad (17)$$

其中, $M_{oghg,atm,t}$ 表示第 $oghg$ 种温室气体的大气层浓度, $W E_t^{oghg}$ 表示第 $oghg$ 种温室气体的排放量, \overline{stock}_{oghg} 表示第 $oghg$ 种温室气体的大气层初期存量, $d_{1,oghg}$ 和 $d_{2,oghg}$ 分别表示浓度计算方程的参数, $oghg$ 表示 CH_4 和 N_2O . 辐射强度的估算如下式:

$$F_t = \sum_{ghg} R F_{ghg,t} + R F_{aerosols,t}, \quad (18)$$

$$R F_{\text{CO}_2,t} = \alpha \times (\ln(M_{\text{CO}_2,atm,a}) - \ln(M_{pre})), \quad (19)$$

$$R F_{\text{CO}_2,t} = inter \times fac \times \left(\sqrt{stm \times M_{oghg,t}} - \sqrt{stm \times M_{pre,oghg}} \right). \quad (20)$$

其中, F_t 表示第 t 期总辐射强度, $R F_{ghg,t}$ 表示第 ghg 种温室气体的辐射强度, $R F_{aerosols,t}$ 表示大气层气溶胶的辐射强度,该变量由 MAGICC 模型外生给定. M_{pre} 为工业革命前 CO_2 的大气层浓度, $M_{pre,oghg}$ 为第 $oghg$ 种温室气体工业革命前的大气层浓度, $inter$ 、 fac 和 stm 分别表示辐射强度估算方程的参数. 全球平均温度变化如下式:

$$T_{t+1} = T_t + \sigma_1 \times (F_t - \lambda \times T_t - \sigma_2 \times (T_t - T_t^o)), \quad (21)$$

$$T_{t+1}^o = T_t^o + \sigma_{ho}(T_t - T_t^o). \quad (22)$$

其中, T_t 表示相对工业革命前的全球大气层平均温度的变化量, σ_1 为滞后参数, σ_2 为大气层和海洋温度的转换率, T_t^o 表示相对工业革命前的全球海洋平均温度的变化量. λ 为气候反馈参数, $\lambda = \frac{4.1}{s}$, s 表示气候敏感性系数, σ_{ho} 为海洋层升温能力系数. 最后, WITCH-China 模型通过全球平均温度上升变量测算气候变化带来的经济影响,如下式:

$$\Omega_{n,t} = 1 + \frac{\omega_{1,n}^- T_t + \omega_{2,n}^- T_t^{\omega_{3,n}^-}}{1 + Q_{n,t}^{ADA}} + (\omega_{1,n}^+ T_t + \omega_{2,n}^+ T_t^{\omega_{3,n}^+}), \quad (23)$$

$$Damages_{n,t} = \frac{1}{1 - \Omega_{n,t}}. \quad (24)$$

其中, $\Omega_{n,t}$ 表示全球平均温度上升的气候因子, $Damages_{n,t}$ 表示气候经济反馈因子, $Q_{n,t}^{ADA}$ 表示适应气候变化系数,其用于反映适应行为对气候损失的作用. $\omega_{1,n}^-$ 、 $\omega_{2,n}^-$ 、 $\omega_{3,n}^-$ 和 $\omega_{4,n}^-$ 分别表示第 n 地区气候负反馈参数, $\omega_{1,n}^+$ 、 $\omega_{2,n}^+$ 、 $\omega_{3,n}^+$ 和 $\omega_{4,n}^+$ 分别表示第 n 地区气候正反馈参数.

正如方程 (3) 所示,本文将气候损失反馈刻画至生产函数当中,因此在社会福利最大化和全球碳浓度目标的约束下,化石能源消费会得到有效的控制,并进一步促进低碳能源技术的发展.

4 数据来源与情景设置

相比 WITCH 模型, WITCH-China 模型主要在地区划分上对中国的东部、中部和西部地区进行细分. 因此, 在模型构建初期, 我们基于 WITCH 模型各地区宏观经济和能源技术的数据, 以及中国统计年鉴 (国家统计局^[26])、中国能源统计年鉴 (国家统计局^[30]) 以及各地区统计年鉴, 对于初期中国各地区的宏观经济和能源技术数据的区域份额进行整理, 其中包括 GDP、人口、以及各类能源使用量等, 详见表 3.

表 3 2005 和 2010 年中国东部、中部、西部主要数据

主要数据	2005				2010				
	西部	中部	东部	全国	西部	中部	东部	全国	
GDP (万亿美元)	0.39	0.53	1.35	2.27	0.87	1.13	2.68	4.68	
人口 (亿人)	3.63	4.25	5.19	13.07	3.60	4.25	5.53	13.38	
发电能源 (TWh)	煤炭	407.55	535.10	1032.31	1974.96	778.90	867.38	1572.39	3218.67
	石油	0.91	1.20	53.46	55.56	1.41	2.30	15.21	18.92
	天然气	7.03	3.20	6.59	16.81	11.69	12.50	70.15	94.34
	核能	0.00	0.00	139.63	139.63	0.00	0.00	194.32	194.32
	风能	2.07	0.67	2.37	5.11	58.77	20.76	50.40	129.93
	PV	0.0018	0.0007	0.0007	0.0032	1.57	0.04	0.46	2.07
	CSP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	水能	555.48	291.81	196.94	1044.23	1010.47	530.84	358.26	1899.57
一次能源 (TWh)	煤炭	1854.68	2925.42	3142.12	7922.22	2925.56	3761.95	4334.15	11021.66
	石油	615.69	735.81	2319.90	3671.41	926.01	857.80	3261.00	5044.80
	天然气	256.27	62.94	136.95	456.16	455.82	151.39	335.44	942.65
	生物燃料	4.45	6.13	5.32	15.90	-	-	-	-
	生物质能	755.55	691.95	799.73	2247.22	-	-	-	-

数据来源: Bosetti^[3]; 国家统计局^[26].

根据 Nordhaus 和 Sztorc^[7] 更新的碳循环模块以及 MAGGIC 模型的校准, WITCH-China 模型假设了气候模块的相关参数. 对于中国和其他地区的人口和 GDP 的预测路径, 本文基于基准 WITCH 模型所引入的社会经济份额路径情景 (the shared socio-economic pathways, SSP) 五类情景进行假设, 五类 SSP 情景的设置参考于 (KC & Lutz^[31]; Dellink^[32]; Emmerling^[33]). 图 2 和图 3 分别展示了 SSP2 情景下中国三地区的人口和 GDP 趋势路径. 此外, 本文选择五类 SSP 情景中适中的 SSP2 情景作为 WITCH-China 模型中各地区 GDP 和人口趋势情景. 基于 SSP2 情景, 我们设定基准情景 (BAU) 以及全球 2100 年平均温度上升 2 摄氏度的约束情景 (2deg), 考察在全球温控目标下, 中国各地区和全球其他地区的经济发展、能源技术演变以及碳排放的动态演变.

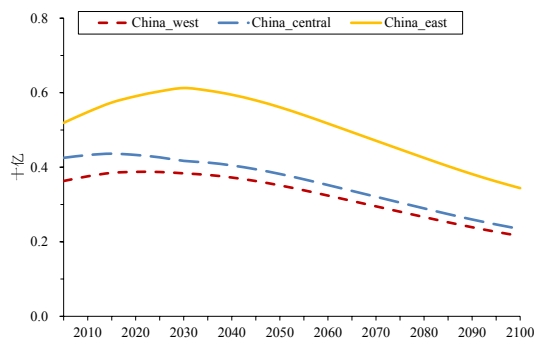


图 2 SSP2 情景下中国三地区人口的预测路径

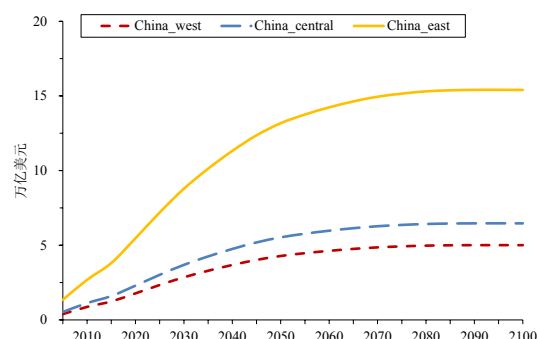


图 3 SSP2 情景下中国三地区 GDP 的预测路径

数据来源: 中国统计年鉴 2015 (国家统计局^[26])、WITCH 模型数据库 (Emmerling^[33])、IIASA 数据库 (KC & Lutz^[31])、OECD 数据库 (Dellink^[32]).

5 结果分析

5.1 基准情况

在基准情景 (BAU) 下, 2100 年全球平均温度相比工业革命前上升 5.37°C , 远高于 21 世纪末 2°C 升温目标 (IPCC^[34]). 2100 年中国西部、中部和东部地区的 GDP 分别达到 5.08、6.49 和 15.35 万亿美元. 如图 4 所示, 三地区的 GDP 均呈现增长趋势, 但是地区 GDP 水平的高低存在一定的差异, 东部地区的 GDP 水平处于最高水平, 其次是中部地区, 西部地区的 GDP 水平处于较低的水平. 从中国与全球的 GDP 比例路径来看, BAU 情景下中国的经济水平相较于全球水平处于更高的增长趋势, 在 2040 年以前, 中国与全球的 GDP 比例呈现快速增长的趋势, 并于 2040 年达到峰值 16.95%. 2045 至 2100 年期间, 该比例逐渐下降, 并于 2100 年降至 8.92% 水平.

图 5 展示了 BAU 情景下中国三地区一次能源消费量以及其中国与全球比例的变换趋势. 类似于三地区 GDP 之间的差异, 东部地区的一次能源消费量处于最高的水平, 其次是中部地区, 西部地区的一次能源消费量处于较低的水平. 不难发现, 由于 GDP 水平的逐渐上升 (见图 4), 作为经济生产过程中最为重要的投入要素之一, 中国三地区的一次能源消费量均在 2035 年呈现上升趋势, 并于 2035 年左右达到峰值, 西部、中部和东部地区 2035 年一次能源消费量分别为 18366.19、21163.46 和 43975.88 TWh. 从 2040 至 2100 年, 中国三地区的一次能源消费量开始逐渐下降, 并于 2100 年分别降至 9008.41、19345.40 和 35090.78 TWh. 这是因为, 在模型地区社会福利最大化的目标约束下, 地区的经济生产效率和能效的提升使得单位生产总量的能耗下降. 此外, 类似中国 GDP 与全球 GWP 的比例路径, 一次能源消费量的中国与全球的比例也呈现先增后减的趋势, 在 2025 年达到峰值 34.96%. 然后, 2030 至 2100 年期间该比例逐渐下降, 并于 2100 年降至 10.16%.

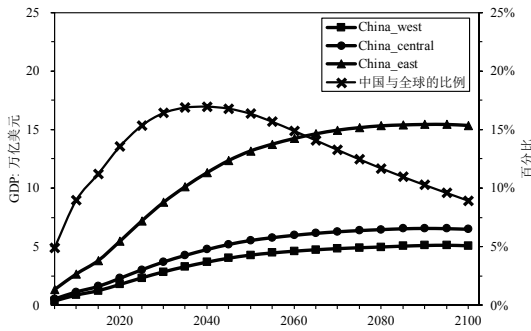


图 4 BAU 情景下中国三地区 GDP 及中国与全球比例的变化趋势

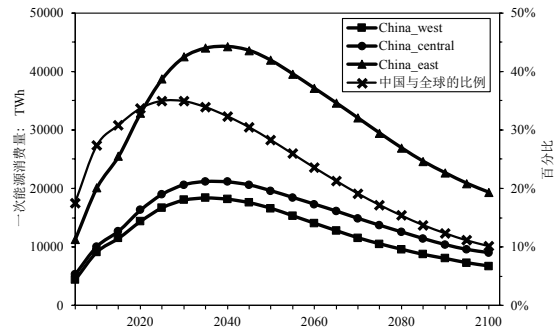


图 5 BAU 情景下中国三地区一次能源消费及中国与全球比例的变化趋势

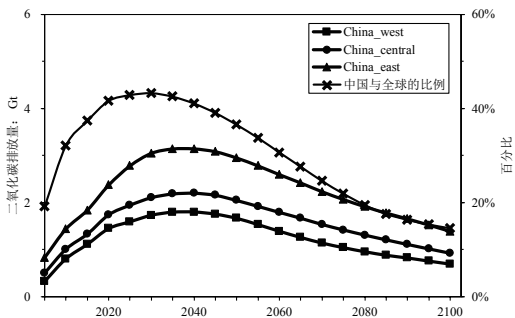


图 6 BAU 情景下中国三地区 CO_2 排放及中国与全球比例的变化趋势

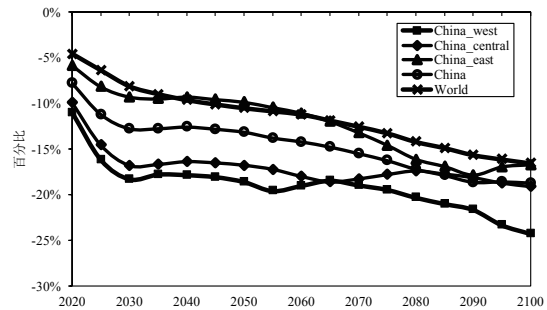


图 7 2°C 温控情景下全球及中国三地区 GDP 的变化比例 (相比 BAU 情景)

图 6 展示了 BAU 情景下中国三地区 CO_2 排放水平及其中国与全球比例的变化趋势. 类似中国三地区一次能源消费的变化趋势, 三地区的 CO_2 排放路径均呈现先增后减的趋势. 具体如下, 在 2040 年以前, 西部、中部和东部地区的 CO_2 排放水平均呈现上升趋势, 于 2040 年达到峰值, 分别达 1.80、2.20 和 3.15 Gt. 在 2045 至 2100 年期间, 三地区的排放水平逐渐下降. 这是因为在此期间, 中国一次能源消费量也呈现下降

趋势(见图 5), 因此作为 CO₂ 排放最大排放源的化石能源消费产生的排放下降, 进而导致此期间中国三地区的 CO₂ 排放水平逐渐下降。不难发现, 东部地区的碳排放处于最高水平, 其次是中部地区的碳排放, 西部地区的碳排放处于较低水平。从中国碳排放与全球排放的比例路径来看, 在 2030 年以前, BAU 情景下中国排放占全球的比例呈逐渐上升趋势, 并于 2030 年达到峰值 43.22%。2035 至 2100 年期间, 其排放占比逐渐下降, 于 2100 年下降至 14.53%。

5.2 全球温控目标对我国各地区经济和能源消费的影响

图 7 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间全球和中国西部、中部以及东部地区 GDP 的变化比例(以 BAU 情景水平为参考)。不难发现, 相比于 BAU 情景, 2 摄氏度温控情景下无论是全球还是中国的 GDP 在 2020 至 2100 年期间均呈现下降趋势, 且下降幅度逐渐增大。其中, 2 摄氏度温控情景下全球的 GDP 下降幅度相比于中国的 GDP 下降幅度相对较小, 具体如下, 2 摄氏度温控情景下 2020 年全球 GDP 相比于 BAU 情景下降 -4.59%, 2100 年全球 GDP 相比于 BAU 情景下降 -16.53%; 2 摄氏度温控情景下 2020 年中国 GDP 相比于 BAU 情景下降 -7.77%, 2100 年中国 GDP 相比于 BAU 情景下降 -18.71%。

此外, 从中国三地区层面来看, 2065 年以前, 中国西部地区 2 摄氏度温控情景下 GDP 相比于 BAU 情景下降幅度最大, 其次是中国中部地区, 中国东部地区 2 摄氏度温控情景下 GDP 相比于 BAU 情景下降幅度则相对较小。然而, 2070 至 2100 年期间, 随着中国中部地区 GDP 下降幅度的逐渐减缓, 其下降幅度于 2090 年开始小于中国东部地区 GDP 的下降幅度。

图 8 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间全球和中国西部、中部以及东部地区一次能源消费的变化比例(以 BAU 情景水平为参考)。不难发现, 相比于 BAU 情景, 2 摄氏度温控情景下无论是全球还是中国三地区的一次能源消费在 2020 至 2100 年期间均呈现大幅下降的趋势。这是因为, 在 2 摄氏度温控目标的约束下, 全球层面乃至作为最大排放国的中国, 均需要通过控制化石能源消费以减缓温室气体的排放。从全球角度来看, 全球一次能源消费在 2020 至 2100 年期间得到有效的控制, 且全球一次能源消费的下降趋势逐渐加强。具体如下, 相比于 BAU 情景, 在 2 摄氏度温控情景下全球一次能源消费的变化比例路径在 2020 至 2100 年期间大体呈现逐渐下降的趋势, 即在此期间, 全球的一次能源消费量的下降趋势将逐渐增大, 其中, 2020 年全球一次能源消费的变化比例为 -43.54%, 下降至 2100 年 -61.37%。

此外, 从中国全国层面来看, 中国一次能源消费在 2020 至 2100 年期间得到有效的控制, 但是随着经济水平的逐渐上升, 作为经济生产中的必要投入要素, 中国一次能源消费的下降趋势有所减缓。具体如下, 相比于 BAU 情景, 在 2 摄氏度温控情景下中国一次能源消费的变化比例路径在 2020 至 2045 年期间呈现逐渐下降的趋势(见图 8), 并于 2045 年达到最低水平, 大约为 -67.89%。在 2050 至 2100 年期间, 该情景下中国一次能源消费相比于 BAU 情景的变化比例路径呈现逐渐上升的趋势, 并于 2100 年达到 -52.70%。

从中国三地区来看, 2 摄氏度温控情景下地区一次能源消耗相比 BAU 情景也得到有效的控制, 其变化比例路径呈现先降后升的趋势。在 2060 年以前, 中国西部地区的一次能源消耗量的下降比例最大, 其次是中部地区, 东部地区的下降比例最小。2065 至 2100 年期间, 随着中部和西部地区的一次能源消耗下降趋势减缓, 中部和西部地区的一次能源消耗量的下降幅度相比东部地区更小。

这是因为东部地区所需的能源投入, 尤其是化石能源投入更高, 而中部和西部地区的可再生能源资源更为丰富(如水能、太阳能、风能等), 因此在 2060 年以前中部和西部地区以化石能源为代表的一次能源消耗量能够得到最大的控制, 而东部地区的一次能源消耗量的下降幅度则相对较小。然而, 随着非化石能源竞争力的上升, 东部地区的一次能源消耗量的下降幅度则进一步增大。

5.3 全球及我国低碳能源技术的最优发展路径

图 9 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间中国与全球低碳能源技术消费量的比例路径。不难发现, 中国水电、核电、风电以及太阳能发电在 2020 至 2100 年期间的发展非常迅速, 其占世界该能源技术消费量的比例也处于较高的水平。这是因为, 我国作为最大的碳排放国家, 同时是最大的发展中国家, 为达成 21 世纪末全球平均温度上升不超过 2 摄氏度的约束目标, 需要投入更多的低碳或者无碳能源技术。同时, 我国也是全球经济总量第二大的国家, 近年来我国经济的快速增长, 也需要更多的能源投入以完成经济生产。因此, 21 世纪末我国低碳能源技术的投入量占全球比例也将处于较高的水平。

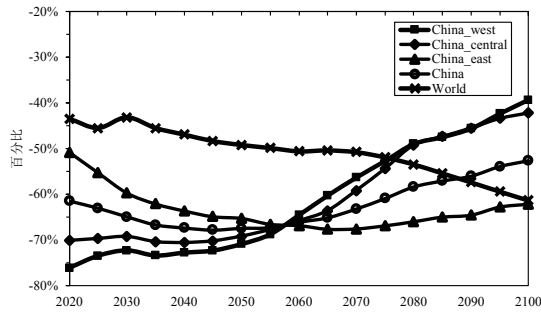


图 8 2°C 温控情景下全球及中国三地区一次能源消费的变化比例 (相比 BAU 情景)

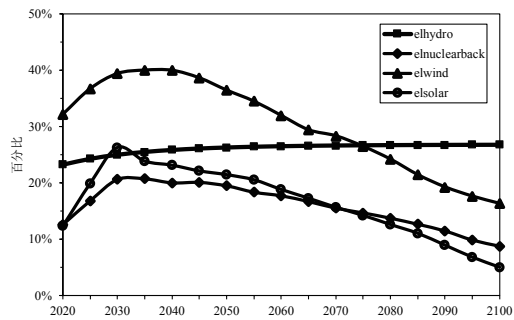


图 9 2°C 温控情景下中国和全球低碳能源技术消费量的比例路径

具体来看, 对于风电, 2 摄氏度温控情景我国风电的投入量占全球比例呈先增后减的趋势. 在 2020 至 2035 年期间, 风电投入量占全球比例呈现上涨趋势, 并于 2035 年达到峰值, 大约为 40.04%. 2040 至 2100 年期间, 我国风电投入量占全球比例有所下降, 于 2100 年降至 16.33%. 对于水电, 由于我国水资源相对比较丰富, 2020 至 2100 年期间我国水电消费量占全球比例呈稳步上升趋势, 从 2020 年的 23.26% 上升至 2100 年的 26.79%. 对于太阳能发电, 我国的太阳能发电占全球比例于 2030 年达到峰值, 大约为 26.31%, 2035 至 2100 年期间我国的太阳能发电占全球比例逐渐下降, 并于 2100 年期间降至 5.02%. 对于核电, 类似于太阳能发电的消费量占比变化趋势, 我国核电消费量占全球比例于 2035 年达到峰值, 大约为 20.78% (见表 4), 2040 至 2100 年期间我国核电消费量占全球比例逐渐下降, 并于 2100 年降至 8.80%.

表 4 中国和世界其他地区低碳能源技术消费量占全球水平的比例路径

	elhydro					elnuclearback				
	2020	2040	2060	2080	2100	2020	2040	2060	2080	2100
cajaz	7.9%	5.1%	3.6%	3.0%	2.3%	7.9%	5.1%	3.6%	3.0%	2.3%
easia	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
India	2.4%	4.1%	7.3%	10.1%	13.7%	2.4%	4.1%	7.3%	10.1%	13.7%
kosau	6.2%	6.3%	6.2%	6.0%	5.2%	6.2%	6.3%	6.2%	6.0%	5.2%
laca	1.5%	1.7%	2.4%	3.0%	2.2%	1.5%	1.7%	2.4%	3.0%	2.2%
mena	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Europe	22.2%	20.2%	19.8%	20.0%	21.5%	22.2%	20.2%	19.8%	20.0%	21.5%
sasia	0.2%	0.6%	1.5%	3.6%	8.1%	0.2%	0.6%	1.5%	3.6%	8.1%
ssa	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%
te	19.3%	18.3%	19.6%	18.1%	16.5%	19.3%	18.3%	19.6%	18.1%	16.5%
USA	27.7%	23.7%	21.9%	22.4%	21.4%	27.7%	23.7%	21.9%	22.4%	21.4%
China	12.6%	20.1%	17.8%	13.8%	8.8%	12.6%	20.1%	17.8%	13.8%	8.8%
	elwind					elsolar				
	2020	2040	2060	2080	2100	2020	2040	2060	2080	2100
cajaz	8.7%	3.4%	2.5%	2.2%	1.8%	17.0%	7.8%	4.5%	3.5%	1.9%
easia	0.8%	1.2%	2.2%	4.2%	4.2%	0.5%	1.7%	6.6%	9.0%	6.6%
India	9.1%	10.7%	13.7%	15.1%	15.0%	11.6%	15.6%	23.6%	29.2%	16.0%
kosau	3.1%	2.6%	3.0%	3.2%	2.7%	2.4%	2.3%	2.4%	2.3%	1.3%
laca	2.3%	3.3%	4.6%	6.2%	5.6%	1.7%	1.9%	2.9%	3.8%	2.0%
mena	11.5%	9.2%	10.2%	10.9%	12.8%	16.5%	17.3%	14.0%	12.1%	8.9%
Europe	15.5%	12.5%	12.6%	12.7%	12.9%	21.7%	15.6%	13.5%	12.0%	8.7%
sasia	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.6%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	1.6%
ssa	0.0%	0.0%	0.1%	2.2%	10.1%	0.0%	0.0%	0.1%	3.1%	40.3%
te	2.6%	2.9%	3.4%	4.4%	4.1%	1.5%	2.1%	2.7%	2.1%	1.4%
USA	14.1%	14.2%	15.5%	14.2%	13.8%	14.8%	12.6%	10.8%	9.8%	6.4%
China	32.2%	40.0%	32.0%	24.2%	16.3%	12.4%	23.2%	18.8%	12.6%	5.0%

图 10 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间中国西部地区五类低碳能源技术投入量的变化趋势。不难看出, 在 2 摄氏度温控情景下, 中国西部地区低碳能源技术投入量具有较大的增幅, 其中最为明显的是风电。在 2020 至 2045 年期间, 中国西部风电的消耗量呈现快速上涨趋势, 从 2020 年的 751.48 TWh 上升至 2045 年的 2997.93 TWh。2050 至 2070 年期间, 中国西部地区风电消耗量的上升趋势收缓。2075 至 2100 年期间, 中国西部地区风电消耗量呈现逐渐下降的趋势, 从 2075 年的 3113.41 TWh 下降至 2100 年的 2497.63 TWh。其次, 中国西部地区的水电投入量在 2020 至 2100 年期间持续缓慢上升的趋势, 从 2020 年的 523.64 TWh 上升至 2100 年的 1144.90 TWh。此外, 2020 至 2065 年期间, 中国西部地区光伏的消费量呈现逐渐上升趋势, 并于 2065 年达到峰值, 峰值水平为 501.41 TWh。2070 至 2100 年期间, 中国西部地区光伏的消费量逐渐下降, 并于 2100 年降至 313.72 TWh。类似光伏的发展路径, 中国西部地区 CSP (chip scale package) 的消费量在 2020 至 2055 年期间呈现逐渐上升趋势, 并于 2055 年达到峰值, 峰值水平为 180.79 TWh。在 2060 至 2100 年期间中国西部地区 CSP 的消费量呈现逐渐下降趋势, 并于 2100 年降至 77.99 TWh。最后, 由于中国核电厂的分布特点, 其发展主要集中在东部地区 (见图 12), 中国西部和中部地区的核电发展较低 (见图 10 和图 11)。

图 11 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间中国中部地区五类低碳能源技术投入量的变化趋势。类似中国西部地区的低碳能源技术的发展趋势, 在 2 摄氏度温控情景下, 中国中部地区风电投入量占非化石能源技术投入量的最大比例。具体如下, 在 2020 至 2045 年期间, 中国中部风电的消耗量呈现快速上涨趋势, 从 2020 年的 658.02 TWh 上升至 2050 年的 3158.30 TWh。2055 至 2070 年期间, 中国中部地区风电消耗量的上升趋势收缓。2075 至 2100 年期间, 中国中部地区风电消耗量呈现逐渐下降的趋势, 从 2075 年的 3290.15 TWh 下降至 2100 年的 2421.20 TWh。但是, 不同于中国西部地区, 中国中部地区的水电技术发展相对较缓, 这是因为中国西部地区的水资源更为丰富, 可用于发电的水能潜力巨大。中国中部地区的水电投入量在 2020 至 2100 年期间持续缓慢上升的趋势, 从 2020 年的 275.09 TWh 上升至 2100 年的 601.46 TWh。

此外, 2020 至 2075 年期间, 中国中部地区光伏的消费量呈现逐渐上升趋势, 且于 2050 年开始中国中部地区光伏的消费量开始超过水电的消费量。但是, 2080 至 2100 年期间, 随着中国中部地区光伏消费量的逐渐下降, 其消费量又开始低于中国中部地区的水电消费量。类似中国西部地区, 中国中部地区 CSP 的消费量在 2020 至 2060 年期间呈现逐渐上升趋势, 并于 2060 年达到峰值, 峰值水平为 215.39 TWh。在 2065 至 2100 年期间中国中部地区 CSP 的消费量呈现逐渐下降的趋势, 并于 2100 年降至 106.55 TWh。

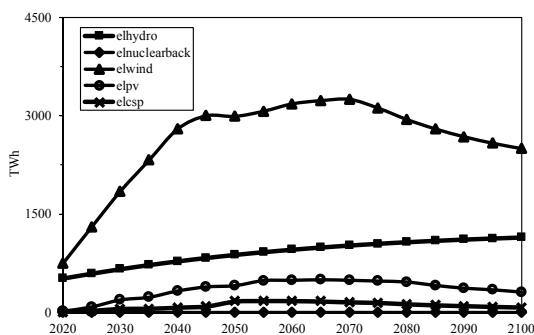


图 10 2°C 温控情景下中国西部地区低碳能源技术的变化趋势

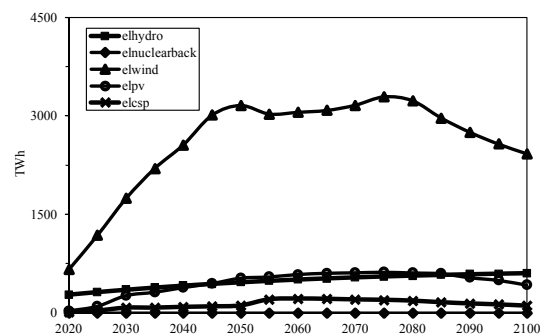


图 11 2°C 温控情景下中国中部地区低碳能源技术的变化趋势

图 12 展示了 2 摄氏度温控情景下 2020 至 2100 年期间中国东部地区五类低碳能源技术投入量的变化趋势。与中国西部和中部地区的五类低碳能源技术发展不同的是, 2 摄氏度温控情景下中国东部地区的低碳能源技术在 2020 至 2100 年期间具有更高的增长趋势。首先, 在此期间风电再次成为中国东部地区低碳能源技术中消耗量最高的能源技术, 在 2020 至 2075 年期间, 其呈快速增长趋势, 于 2075 年达到峰值, 大约为 6996.21 TWh。在 2080 至 2100 年期间, 中国东部地区风电消费量出现缓慢下降趋势, 并于 2100 年下降至 6292.80 TWh。此外, 不同于中国西部和中部地区, 由于东部地区具有较多的核电厂分布, 该地区的核能发展

更为迅速,并在 2080 年以前持续成为东部地区非化石能源技术消费水平仅次于风电的能源技术。

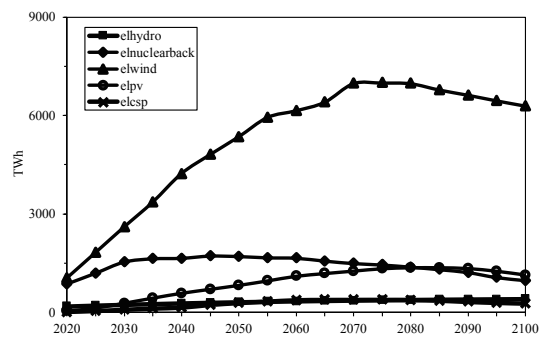


图 12 2°C 温控情景下中国东部地区低碳能源技术的变化趋势

最后,在 2020 至 2085 年期间中国东部地区的光伏消费量逐渐上升,并于 2085 年达到峰值 1362.62 TWh,2090 至 2100 年期间其消费量缓慢下降,于 2100 年降至 1141.52 TWh. 对于 CSP,在 2020 至 2075 年期间中国东部地区的 CSP 消费量逐渐上升,并于 2075 年达到峰值 390.97 TWh,2080 至 2100 年期间其消费量缓慢下降,于 2100 年降至 273.49 TWh. 最后,对于水电,在 2020 至 2100 年期间中国东部地区的水电消费量逐渐上升,从 2020 年的 185.65 TWh 上升至 2100 年的 405.92 TWh.

6 结论

本文通过构建全球 - 中国多区域综合评估模型,即 WITCH-China 模型,将全球分为 11 个非中国区域和 3 个中国区域(中国西部、中部和东部地区),从 21 世纪末全球 2 摄氏度温控目标约束的视角,考察全球和中国三地区的经济发展和能源使用遭受的影响程度,以及对中国西部、中部和东部地区未来低碳能源技术(风电、核电、水电、光伏和 CSP)的发展路径进行分析. 本文的研究贡献主要体现在以下两点: 1) 基于 WITCH 模型建立全球 - 中国多区域综合评估模型,针对气候变化背景下中国的低碳能源技术演变规律进行建模分析. 2) 基于中国各地区历史数据,合理估算中国不同地区的宏观经济和能源技术参数,并进一步将模型中国区域细分为东部、中部和西部地区,以更好地研究全球温控目标下中国不同地区间低碳能源技术最优演变路径之间的差异. 通过模型模拟,我们得到以下主要结论:

首先,全球和中国为达成 2 摄氏度温控目标,需要付出较大的经济成本,且 GDP 的下降幅度会逐渐增大,不同于其他中国地区,我国西部地区 GDP 的下降幅度在 2070 年以后会逐渐减少. 其中,我国的 GDP 下降幅度相比于全球层面的 GDP 下降幅度更大. 此外,从我国西部、中部和东部地区层面来看,类似全国层面 GDP 下降比例的变化趋势,我国东部地区和中部地区 GDP 的下降幅度逐渐增大. 在 2065 年以前,我国西部地区在 2 摄氏度温控目标的约束下,其 GDP 相对 BAU 情景的下降幅度最大,其次是中部地区 GDP 的下降幅度,我国东部地区 GDP 在此期间的下降幅度较小. 然而,在 2070 年之后,西部地区的 GDP 下降幅度有所减少,并于 2090 年开始低于我国东部地区 GDP 的下降幅度.

其次,除了需要付出较大的经济成本,为应对全球气候变化问题,全球层面乃至作为最大排放国的中国,均需要通过控制化石能源消费以减缓温室气体的排放. 从全球层面来看,全球一次能源消费在 2020 至 2100 年期间得到有效的控制,且全球一次能源消费的下降趋势逐渐加强. 从中国国家层面来看,中国一次能源消费在 2020 至 2100 年期间得到有效的控制,但是随着经济水平的逐渐上升,作为经济生产中的必要投入要素,中国一次能源消费的下降趋势有所减缓. 从我国东部、中部和西部地区层面来看,2 摄氏度温控情景下地区一次能源消耗相比 BAU 情景也得到有效的控制,其变化比例路径呈现先降后升的趋势.

此外,为了应对气候变化问题,作为全世界最大的碳排放国家,为达到 2 摄氏度温控目标,中国低碳能源技术的消费量在未来将占全球相应低碳能源技术总消费量较高的比例. 我国作为最大的碳排放国家,同时是最大的发展中国家,为达成 21 世纪末全球平均温度上升不超过 2 摄氏度的约束目标,需要投入更多的低碳或者无碳能源技术. 同时,我国也是全球经济总量第二大的国家,近年来我国经济的快速增长,也需要更多的能源投入以完成经济生产. 因此,本世纪末我国低碳能源技术的投入量占全球比例也将处于较高的水平.

最后, 中国各地区均需要大力发展低碳或无碳能源技术, 以减缓由化石能源燃烧所产生的温室气体排放, 其中, 风电在我国乃至各地区低碳能源技术发展中将起到关键的作用, 地区间的低碳能源技术发展路径存在较大的差异. 此外, 由于地区资源禀赋和经济发展的差异性, 我国各地区在 2 摄氏度温控目标下的低碳能源技术发展路径存在较大的差异性.

参考文献

- [1] Manne A, Mendelsohn R, Richels R. MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies[J]. *Energy Policy*, 1995, 23(1): 17–34.
- [2] Nordhaus W D, Yang Z. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies[J]. *The American Economic Review*, 1996: 741–765.
- [3] Bosetti V, Carraro C, Galeotti M, et al. A world induced technical change hybrid model[J]. *The Energy Journal*, 2006 (Special Issue# 2): 13–38.
- [4] Dowlatabadi H. Integrated assessment models of climate change: An incomplete overview[J]. *Energy Policy*, 1995, 23(4–5): 289–296.
- [5] Nordhaus W D. *Managing the global commons: The economics of climate change*[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1994.
- [6] Nordhaus W D. Rolling the ‘DICE’: An optimal transition path for controlling greenhouse gases[J]. *Resource and Energy Economics*, 1993, 15(1): 27–50.
- [7] Nordhaus W, Sztorc P. DICE 2013R: Introduction and user’s manual[R]. Retrieved November, 2013.
- [8] Peck S C, Teisberg T J. CETA: A model for carbon emissions trajectory assessment[J]. *The Energy Journal*, 1992: 55–77.
- [9] Hope C, Anderson J, Wenman P. Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model[J]. *Energy Policy*, 1993, 21(3): 327–338.
- [10] 柏庆国, 徐健腾. 碳政策下分布式鲁棒优化模型的生产与减排策略 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7): 1696–1709.
Bai Q G, Xu J T. Joint production and emission reduction decisions for the distributionally robust optimization problem under carbon regulations[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1696–1709.
- [11] 周艳菊, 吴界朋, 陈晓红, 等. 低碳经济下嵌入式低碳服务机制设计研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(5): 1193–1204.
Zhou Y J, Wu J P, Chen X H, et al. Embedded low-carbon service mechanism design with low-carbon economy[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(5): 1193–1204.
- [12] Duan H B, Fan Y, Zhu L. What’s the most cost-effective policy of CO₂ targeted reduction: An application of aggregated economic technological model with CCS?[J]. *Applied energy*, 2013, 112: 866–875.
- [13] Duan H B, Zhu L, Fan Y. Optimal carbon taxes in carbon-constrained China: A logistic-induced energy economic hybrid model[J]. *Energy*, 2014, 69: 345–356.
- [14] Duan H B, Fan Y, Zhu L. Modelling the evolutionary paths of multiple carbon-free energy technologies with policy incentives[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2015, 20(1): 55–69.
- [15] 段洪波, 朱磊, 范英. 中国碳捕获与封存技术的成本演化和技术扩散分析 —— 基于中国能源经济内生技术综合模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(2): 333–341.
Duan H B, Zhu L, Fan Y. Analysis of cost and technological diffusion of carbon capture and storage for China — Based on Chinese energy economic endogenous technological model[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(2): 333–341.
- [16] Van der Zwaan B C C, Gerlagh R, Schratzenholzer L. Endogenous technological change in climate change modelling[J]. *Energy Economics*, 2002, 24(1): 1–19.
- [17] Popp D. ENTICE: Endogenous technological change in the DICE model of global warming[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 48(1): 742–768.
- [18] Kemfert C. Induced technological change in a multi-regional, multi-sectoral, integrated assessment model (WIAGEM): Impact assessment of climate policy strategies[J]. *Ecological Economics*, 2005, 54(2): 293–305.
- [19] Simon D H, Prince J T. The effect of competition on toxic pollution releases[J]. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2016, 79: 40–54.
- [20] Freeman M C, Groom B. How certain are we about the certainty-equivalent long term social discount rate?[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, 79: 152–168.
- [21] 宋马林, 金培振. 地方保护、资源错配与环境福利绩效 [J]. *经济研究*, 2016, 12: 47–61.
Song M L, Jin P Z. Regional protection, resource misallocation and environmental welfare performance[J]. *Economic Research Journal*, 2016, 12: 47–61.
- [22] Fischer G, Sun L. Model based analysis of future land-use development in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1): 163–176.

- [23] Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. Multi-regional input-output model for regional energy requirements and CO₂ emissions in China[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(3): 1685–1700.
- [24] Su B, Ang B W. Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: A multi-region model for China[J]. *Applied Energy*, 2014, 114: 377–384.
- [25] Wu J, Fan Y, Xia Y. The economic effects of initial quota allocations on carbon emissions trading in China[J]. *The Energy Journal*, 2016, 37: 1–10.
- [26] 国家统计局. 中国统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
State Statistics Bureau. Chinese statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2016.
- [27] Pietzcker R C, Stetter D, Manger S, et al. Using the sun to decarbonize the power sector: The economic potential of photovoltaics and concentrating solar power[J]. *Applied Energy*, 2014, 135: 704–720.
- [28] Arent D, Sullivan P, Heimiller D, et al. Improved offshore wind resource assessment in global climate stabilization scenarios[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2012.
- [29] Meinshausen M, Raper S C B, Wigley T M L. Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 - Part 1: Model description and calibration[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 11(4):1417–1456.
- [30] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
State Statistics Bureau. Chinese energy statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2016.
- [31] Lutz W, Butz W P, Kc S. World Population and Human Capital in the Twenty-First Century[J]. *Oup Catalogue*, 2014, 42(3-4):91.
- [32] Dellink R, Chateau J, Lanzi E, et al. Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways[J]. *Global Environmental Change*, 2015.
- [33] Emmerling J, Drouet L, Reis L A, et al. The WITCH 2016 model-documentation and implementation of the shared socioeconomic pathways[R]. 2016.
- [34] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [35] BP. Statistical review of world energy[R]. London, 2015, www.bp.com/statisticalreview.