

中国 - 全球能源模型 (C-GEM) 及在中国能源低碳转型中应用



2019 年 12 月

中国 - 全球能源模型 (C-GEM) 及在中国能源低碳转型中应用

【编者按】

中国能源模型论坛旨在集合国内外能源、经济、环境研究领域领先的模型团队，共同探讨模型方法学的最新进展与未来趋势，促进国内外模型团队的写作、互动与沟通，提高模型团队开发和应用模型的能力，提升研究成果和政策建议的针对性、时效性、可实施性及影响力，加强模型工作者与政策制定者之间的交流。

《巴黎协定》邀请所有缔约方在 2020 年前提提交长期温室气体低排放发展战略。习近平主席在十九大报告指出：加快生态文明体制改革，建设美丽中国。到 2035 年，生态环境根本好转，美丽中国目标基本实现；到本世纪中叶，把我国建设成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。

CEMF02 于 2016 年底启动，旨在运用并比较多种不同的能源、经济、环境模型，以十三五、十四五的近中期发展目标为实践节点，并探讨到 2050 年的低温室气体（包括非二氧化碳温室气体）排放发展的长期目标，构建符合中国技术的政策要求的低排放发展路径。

为实现研究目标，CEMF 委托国内知名模型团队开展了相应研究，包括：

- 宏观经济模型组。利用自上而下的宏观经济模型，分析和讨论 2050 中国宏观经济情景。
- 能源系统模型组。利用自下而上的能源系统模型，实现特定社会经济情景下能源供给与需求的平衡。
- 农业与土地利用组。具体分析农业温室气体排放和土地利用碳汇。
- 废弃物与非二氧化碳排放组。具体分析城市垃圾、其他废弃物、废水的温室气体排放，油气行业中产生的甲烷排放等。
- 环境污染与健康组。具体分析大气环境、水环境、土壤污染和人体健康的关系。
- 气候变化与适应组。具体开展气候风险性评价，脆弱性评价及生态系统适应评价。

本研究工作是在 CEMF 学术委员会的指导下完成的，研究过程中，得到了来自清华大学、北京大学、中国农业科学研究院、国家发展和改革委员会能源研究所、国家应对气候变化战略中心、国家信息中心、国务院发展研究中心、交通部科学研究院、中国环境科学研究院、生态环境部环境规划院等多家单位的专家学者的大力支持，同时也离不开 CEMF 秘书处的协调工作。

CEMF 研究报告将陆续刊发 CEMF02 各研究报告的摘要版本，供读者参考。如您对本研究有咨询和建议，**请联系北京市清华大学公共管理 615 室，中国能源模型论坛（100084）**，或发送邮件至 cemf@tsinghua.edu.cn。我们的官方网站是 www.cemf.net.cn。

研究背景

《巴黎协定》下世界各国国家自主贡献（NDC）目标与全球控制温升不超过 2℃甚至不超过 1.5℃减排目标的排放路径仍然有较大的差距。在《巴黎协定》“自下而上”和每 5 年一次的全球盘点机制下，世界各国应不断加大减排努力，进而加速全球向低碳的转型。本研究基于所开发的全球能源经济模型的基础上，聚焦国家自主贡献目标下全球低碳发展的情景分析，并提出全球减排义务分担下中国低碳发展的路径。

模型及方法学

中国 - 全球能源模型（China in Global Energy Model, C-GEM）是全球多区域递归动态可计算一般均衡（CGE）模型。该模型是在清华大学能源环境经济研究所与美国麻省理工学院全球变化科学与政策联合项目（MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change）共同开展的中国能源与气候项目（CECP）下合作开发，用于开展中国与全球低碳减排政策的经济、贸易、能源消费与温室气体排放的影响与评估研究。本模型采用递归动态，以 GTAP9 数据库为基础，全球 19 个分区和 21 个生产部门的详细刻画下，从全球视角刻画对中国能源经济的政策仿真。

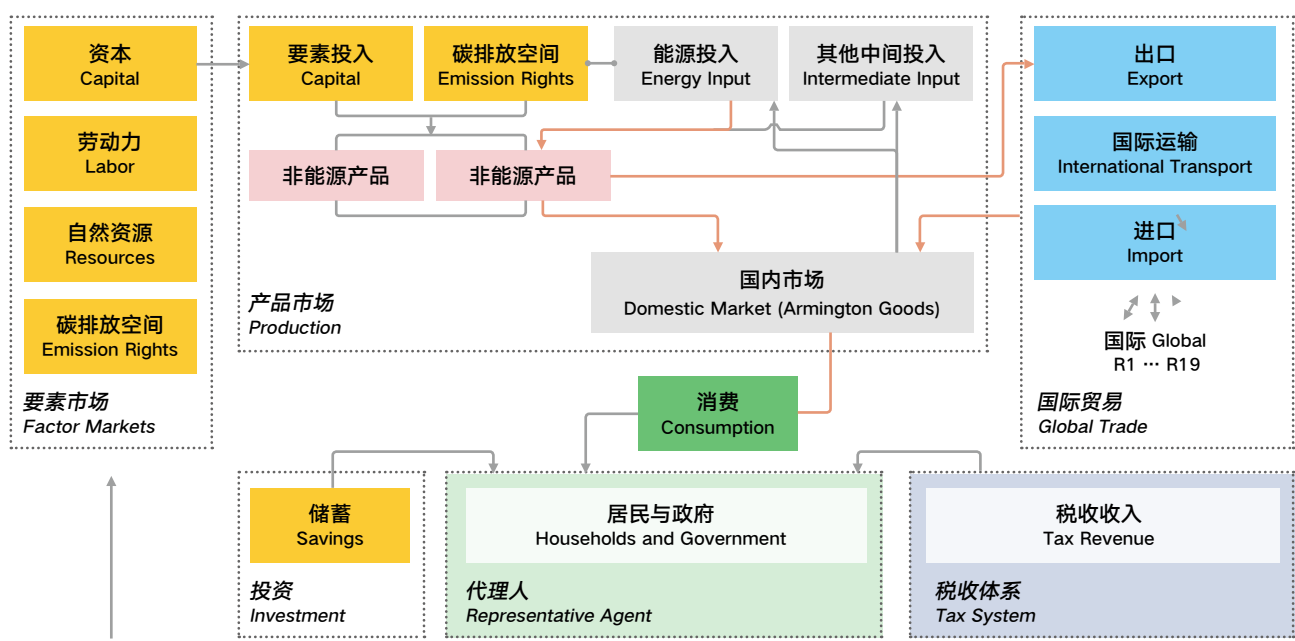


图 1 C-GEM 模型架构示意图

作为一般均衡模型，C-GEM 的求解需要满足三个均衡条件：生产零利润条件、市场出清条件以及收入平衡条件。

生产零利润。所有从事生产活动的部门，其生产成本一定不小于其最终产品价格；如果生产成本小于最终产品价格，模型将增加该产品供给，使得该部门产品价格下降，生产成本上升，直到生产成本等于生产价格时为止。该条件主要对生产活动 y 做出约束。

$$profit \geq 0, y \geq 0, y^T \times (-profit) = 0$$

市场出清。所有从事生产活动的部门，其产品需求一定不小于其产品供给；如果产品需求小于产品供给，模型将调低产品价格，增大产品需求，减小产品供给，直到产品供给等于需求为止。该约束主要对产品价格 p 做出约束。

$$\text{Supply} - \text{Demand} \geq 0, p \geq 0, p^T \times (\text{Supply} - \text{Demand}) = 0$$

收入平衡。每个地区的总收入必须等于要素收入与税收收入的和，此约束定义了收入的来源与价值，从而为模型闭合条件（收入等于支出）做出准备。

$$\text{Income} = \text{endowment} + \text{tax revenue}.$$

C-GEM 模型描述和求解的是大型复杂非线性动态优化问题。模型基于通用数学建模系统 GAMS (General Algebraic Modeling System) 平台开发，采用一般均衡数学规划系统 (MPSGE) 编译，并采用 PATH 求解器求解。

模型及方法学

中国 - 全球能源模型 (China in Global Energy Model, C-GEM) 是全球多区域递归动态可计算一般均衡 (CGE) 模型。该模型是在清华大学能源环境经济研究所与美国麻省理工学院全球变化科学与政策联合项目 (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change) 共同开展的中国能源与气候项目 (CECP) 下合作开发，用于开展中国与全球低碳减排政策的经济、贸易、能源消费与温室气体排放的影响与评估研究。本模型采用递归动态，以 GTAP9 数据库为基础，全球 19 个分区和 21 个生产部门的详细刻画下，从全球视角刻画对中国能源经济的政策仿真。

1. 国家自主贡献目标下全球碳排放缺口

尽管 NDC 情景下的二氧化碳排放相比参考情景已经出现了大幅下降,但是对于实现《巴黎协定》提出的“ 将全球平均温升控制在工业革命前的 2°C 以内并努力限制在 1.5°C 以内 ” 的全球应对气候变化的长期目标仍有较大的差距 (如图 2 所示)。REF 情景和 NDC 情景下, 2011-2030 年全球累计二氧化碳排放分别为 7010 亿吨和 6566 亿吨, 2011-2050 年全球累计二氧化碳排放分别为 16205 亿吨和 13779 亿吨, 2011-2100 年全球累计二氧化碳排放分别为 45056 亿吨和 30375 亿吨。而根据 IPCC 第五次评估报告第三工作组的研究, 2011-2100 年间以大于 66% 的可能性实现 2 度温升控制目标的累计二氧化碳排放水平为 6300-11800 亿吨 (图中红线所标示位置)。

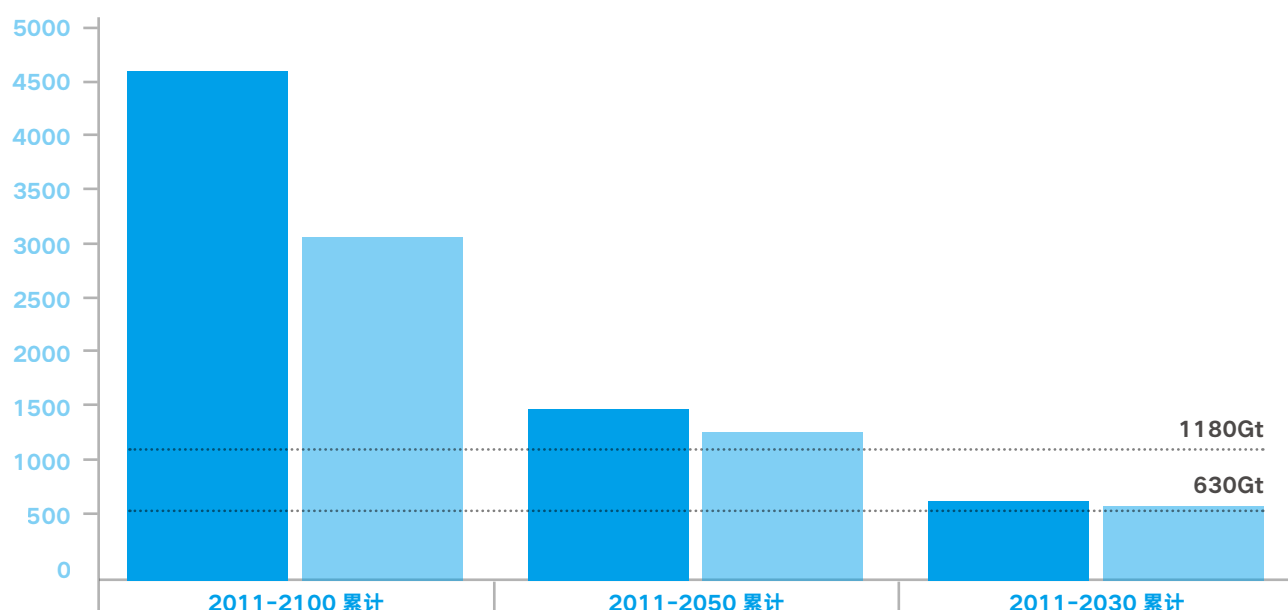


图 2 不同起始年 NDC 与 REF 情景下的排放量

2. 边际减排成本

国家自主贡献目标的实现不会自发完成, 需要政策干预创造动态的激励, 也需要付出一定的经济成本。本研究以碳价政策作为所有政策的代表, 并以碳价格表示二氧化碳减排过程中的边际减排成本, 间接反映各国所需政策力度的大小。同时, 为反映各国提出的国家自主贡献目标的减排力度, 这里主要展示 2030 年各国的价格水平。如图 3 所示, 发达国家的边际减排成本普遍高于发展中国家, 集中在 40—80 美元 / 吨之间, 说明发达国家实现国家自主贡献目标所需的政策力度更大, 付出的成本也更高; 发展中国家的边际减排成本在 25 美元 / 吨以内, 这与发展中国家具有较高的减排潜力有关。

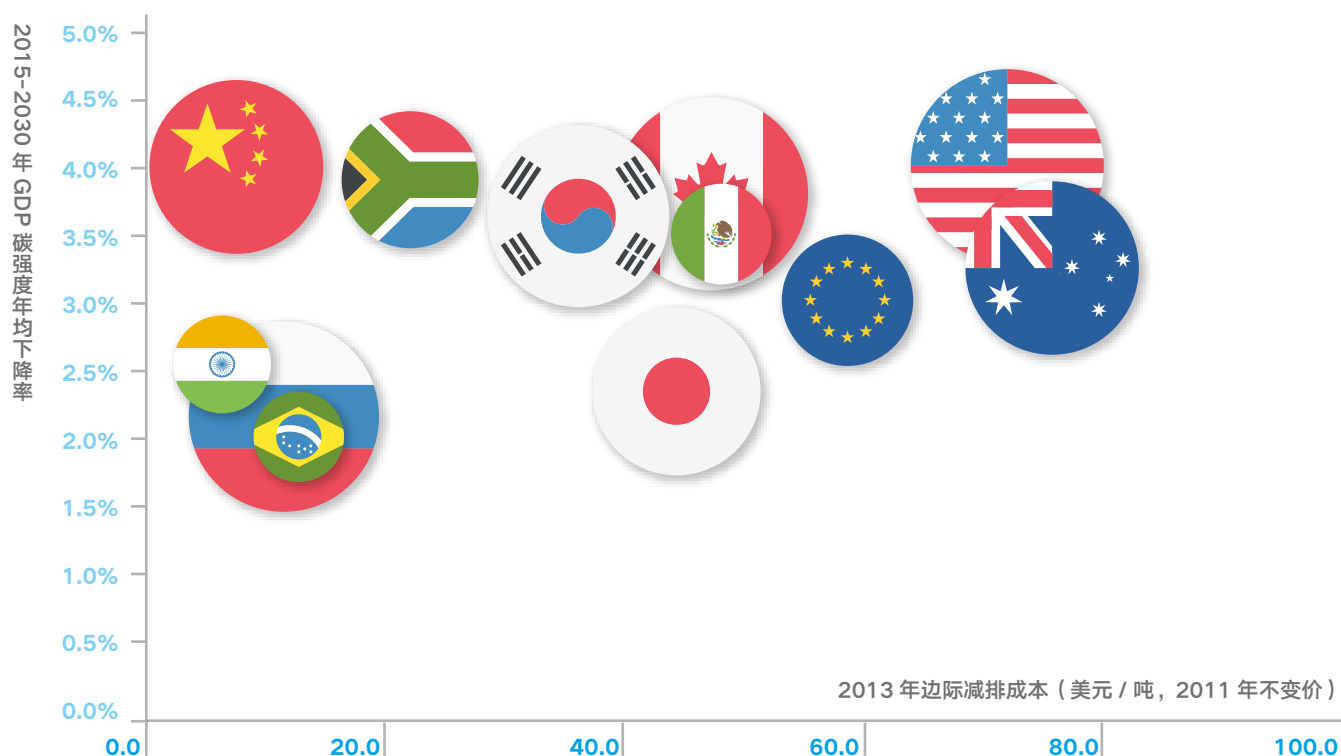


图 3 边际减排成本、人均排放与 GDP 碳强度年均下降率
注：圆圈的大小表示各国 2030 年人均排放的高低。

3. 全球减排义务分担下碳价和经济代价

图 4 显示了 NDC 情景下和更新方案下 2025 年和 2030 年的福利损失变化情况。与碳价变化趋势相类似，各国的福利损失在更新方案下也出现较大幅度的增加。比较 NDC 情景和更新方案下的福利损失，对于中国来说，2025 年更新方案下的福利损失是 NDC 情景下的 2 倍，2030 年则将近 3 倍。印度 2025 年更新方案的福利损失也是 NDC 情景下的 2 倍，2030 年则超过了 3.4 倍。美国 2025 年为 2.2 倍，2030 年为 3.17 倍。欧盟 2025 年为 2.37 倍，2030 年为 3.52 倍。



图 4 主要国家 2025 年和 2030 年福利损失

主要结论与政策建议

1. 提高能源利用的技术效率与经济产出效益，转变能源发展观与消费观，保持能源强度不断下降态势，控制能源消费总量在合理区间。我国当前能源利用产出效益仍然较低，中国主要工业产品的单品能耗与国际先进水平仍有一定差距。如果未来中国通过推进技术升级使得以上高耗能产品单品能耗达到当前国际先进水平，能源强度将进一步下降。同时新形势下我国能源发展战略需要新的思路，要从传统的以保障供给为核心的发展思路向调控能源需求转变，树立由供给侧和需求侧双向协调，“保障供给和保护环境并重”的新型能源环境协调发展观。为实现我国中长期低碳发展目标，需要控制我国能源消费总量在合理水平，形成促进经济发展方式转变的“倒逼”机制。

2. 推动能源体系的清洁化与低碳化。以多元化能源结构保障能源供应安全是我国实现能源生产革命与低碳化转型的战略目标和根本途径。当前我国能源结构以煤为主，煤炭比例过高不仅使能源系统效率低，而且带来严重的环境污染。加速能源结构向清洁化和低碳化转型，就要大力发展新能源和可再生能源以及天然气等低碳能源，最终目标将是到本世纪下半叶逐渐形成以新能源和可再生能源为主体的新型可持续能源体系，实现CO₂的近零排放，以顺应全球能源变革和应对气候变化的趋势和潮流。

3. 鼓励能源技术创新与国际合作，推动能源体制革命。技术创新是推动能源生产和消费革命和低碳化发展的重要支撑。当前在先进能源技术研发的诸多领域，我国和发达国家同步开展，全球应对气候变化的合作进程也为我国推动能源生产和消费革命提供了较好的国际合作环境和共赢的机遇。我国可以通过加强技术合作和技术转让，掌握先进技术的知识产权，提升核心技术竞争能力，同时可以利用我国市场需求大的优势，打造能源企业先进技术的竞争优势。

中立
Neutrality

独立
Independence

协同
Independence

透明
Transparency

公正
Fairness



官网二维码



微信公众号

清华大学产业发展与环境治理研究中心
Center for Industrial Development and Environmental Governance
清华大学公共管理学院 615
Room 615, School of Public Policy and Management, Tsinghua University
邮箱: cemf@tsinghua.edu.cn
E-mail: cemf@tsinghua.edu.cn
电话: (010) 62789263
Tel: (010) 62789263
网站: www.cemf.net.cn
Website: www.cemf.net.cn