（项目logo）

中国能源模型论坛研究报告

第13期

**GCAM模型及在我国能源低碳转型中应用**

## 研究背景

我国在全球应对气候变化中发挥积极的建设性作用。2018年，我国能源消费总量达到46亿吨标准煤，CO2排放总量100亿吨左右，居世界第一，均占全球能源消费和CO2排放1/4左右。因此，我国能源低碳转型和CO2减排，对全球实现《巴黎协定》温升控制目标，具有非常重要的作用。

本研究是针对《巴黎协定》温升控制目标，在全球视角下，充分考虑全球主要区域的历史排放和未来排放路径，从能源供应和能源需求两个方面，研究我国能源低碳转型路径及其量化影响，我国温室气体减排潜力及其对全球贡献等，对学术界和政策制定者都具有重要的参考价值。

从全球层面来看，尽管世界各国的自主贡献（NDC）)减排承诺不足以实现《巴黎协定》目标，但是，在NDC减排承诺下，全球总体排放到2030年仍然比过去的参考情景排放低10%-20%。从中国区域来看，随着经济增速的放缓和产业结构的调整，我国能源消费将进入长期低速增长，并逐渐达到饱和阶段。总体来说，我国工业部门能耗整体进入饱和期，高耗能行业基本上已经达到峰值；建筑和交通部门尽管将继续增长，但因占比相对较少，不会带来大的影响；未来电力需求将持续增长，但电力供应结构将越来越多样化、低碳化，燃煤发电比例下降，水电、核电、风电、光伏等非化石发电技术将得到较大发展。

## 模型及方法学

本研究采用GCAM模型清华版本(GCAM-TU)。GCAM是一个全球气候变化综合评价模型，包括能源、农业与土地利用、水资源和简单气候系统四大模块。其中能源模块将全球分为32个地区，中国是其中的一个地区。该模型已经被广泛用于全球层面和区域层面的能源消费和CO2排放相关研究，是IPCC历次报告的主要综合评价模型之一。该模型为开源模型，可以公开下载获得。GCAM模型是一个长期动态递归的部分均衡模型，运行区间为2010–2100年，每5年为一个计算步长。能源系统模块是模型的核心，详细刻画了不同类型的能源类型从开采、加工、转换、分配到终端消费等环节，考虑了能源系统中已有成熟的和处于研发和示范的各种技术。



图1 GCAM模型全球分区示意图

在GCAM模型的基础上，GCAM-TU模型对中国区域能源系统做了大量改进：包括更细致的工业部门结构分解、更多的服务和技术类型、更本土化的参数设置和假设。其中，将工业部门细分为钢铁、水泥、化工、电解铝等高耗能行业，便于更加合理地模拟我国工业部门快速发展和产业转型过程，能源结构变化及其对CO2排放路径的影响。基于我国最新统计数据，重新校准与能源和CO2排放的相关数据，使得与2015年实际情况和2020近期估算相一致，从而更好地反映我国目前能源消费与排放现状和近期预期。该模型所有参数和数据都是公开透明的。

GCAM模型由大量相互关联的计算公式和相关参数构成，其中重要为能源技术选择计算公式。即在满足相同的能源服务需求下，各种能源技术市场比例$S\_{k}$，可以通过如下公式确定：

$S\_{k}=\frac{b\_{k}×c\_{k}^{r\_{p}}}{\sum\_{j=1}^{N}\left(b\_{j}×c\_{j}^{r\_{p}}\right)}$

其中$c\_{k}$ 为能源技术k的平准化成本，包括初始投资、运行成本、燃料价格、技术寿命、贴现率、税收等因素。

$b\_{k}$为能源技术k的权重系数，也即社会偏好程度，能够反映公众或者政策者对该技术的偏好和认可程度，即愿意以多大的意愿来购买该能源技术产出。该参数通过历史数据或者基准年数据校准得到。

$r\_{p}$为logit指数。该参数反映了能源价格变化对该技术市场份额的影响，也称价格弹性系数。

该公式说明，竞争市场的能源技术市场份额主要依靠价格及其概率分布范围，以及该技术与其他替代技术相比较的社会偏好因素。这种技术选择模型，可以避免传统成本最小化模型中的“赢者通吃”的局限性。

## 我国能源低碳转型模拟分析

在不影响GDP发展速度前提下，为全面反映我国能源低碳转型及其对实现《巴黎协定》温升控制目标的减排贡献。在全球视角下，设置三种排放情景：自主贡献情景（NDC）、2度温升情景（T20）和1.5度温升情景（T15），重点模拟和分析我国低碳转型下的能源消费和CO2排放路径、CO2减排潜力和全球减排贡献等，模型模拟和分析结论如下。

### 1、CO2排放路径

2015年我国与能源相关的CO2排放为9.40GtCO2。到2030年，NDC、T20和T15情景下CO2排放分别增加10%、持平和减少20%；到2050年，三种情景下CO2排放分别持平、减少30%和减少90%。为实现2度温升和1.5度温升控制目标，我国需要在2075年开始负排放，CO2排放达峰时间需要提前到2025年。若要实现1.5度温升控制目标，则需要在2055年开始负排放，2020年就实现CO2排放达峰。

模型计算表明，我国累计CO2排放占全球累计排放比例，1990年为6%、2015年为13%、2030年为17%，2030年以后，基本稳定在18%左右，低于全球平均排放水平。我国CO2减排贡献，特别是近期减排努力，高于我国对应的累计排放水平（小于20%），其中2025年占全球增量减排比例能达到33%左右，2030年能达到30%左右，2050年能达到25%左右。



左上：我国能源低碳转型-CO2排放路径

右上：我国能源低碳转型-累积CO2排放路径

左下：我国能源低碳转型-一次能源消费

右下：我国能源低碳转型-电力供应

### 2、一次能源消费

与CO2排放路径相对应，我国能源系统需要进行大幅度低碳转型，到2050年，一次能源消费总量需要减少10%-20%，燃煤比例大幅度下降到20%-40%（含燃煤CCS，热值当量），天然气比例稳步上升，非化石能源比例上升到30-60%。

### 3、电力供应

我国电力需求将持续增加，电力结构逐渐低碳化。到2050年，我国电力需求总量将达到9-13pWh，比2015年增加60%-120%。届时人均电力需求为7300-10000k之间，与目前发达国家人均电力需求相当。为实现2度或者1.5度温升控制目标，到2050年，低碳电力比例需要大幅度增加到55%-85%。其中核电比例增加到15%-25%；非水可再生能源电力增加到25%-40%；CCS和BECCS电力比例，增加到10%和25%。

### 4、关键指标

单位GDP碳排放强度（tCO2/1000US$，2015年价）。相比2015年，单位GDP碳排放强度2050年自主贡献情景将下降70%，温升2度控制情景下降80%，而温升1.5度控制情景则下降98%。可见，在T15情景下，碳排放强度接近于近零排放。

人均碳排放（tCO2/人）。2015年，人均碳排放为7.0。到2050年，三种情景下分别为7.5、5.0和0.6，分别为增加10%、下降30%和下降90%。其中T15情景下，人均碳排放不能超过1吨。

电气化程度。即终端能源中的电力和天然气占比。2015年，终端能源中电力占比为21%，天然气占比9%。到2050年，天然气占比缓慢增加到11-13%左右，电力比例增加到30%-50%。

一次能源非化石能源比例（发电煤耗计算）。2015年为14%。到2050年，增加到25%-65%，化石能源中的CCS等低碳技术也将得到大幅度推广。



左上：图4-1 不同情景指标下单位GDP碳排放强度模拟

右上：图4-2 不同情景指标下人均碳排放模拟

左下：图4-3 不同情景指标下电气化程度模拟

右下：图4-4 不同情景指标下一次能源非化石能源比例模拟

## 主要结论与政策建议

为实现2度温升和1.5度温升目标，我国的能源系统低碳转型面临巨大的挑战。我国CO2排放达峰时间需要提前到2025年甚至2020年。到2050年，我国CO2排放需要大幅度减少30%甚至90%，其中80%以上的碳减排需要来自工业部门和电力部门。从燃料类型来看，主要来自于燃煤的大幅度减少。

从我国减排努力对全球减排的贡献来看，考虑到我国的累计排放全球占比始终不超过20%，我国的全球减排努力，特别是近期的减排努力，远高于其所对应的累计排放水平。

因此，为实现《巴黎协定》温升控制目标，我国需要控制能源消费总量，特别是煤炭消费总量；能源结构需要大幅度低碳化、电气化、清洁化和多元化。加快转变经济发展方式，调整和优化产业结构，促进社会向低能耗、高附加值行业发展。