



《北京理工大学学报(社会科学版)》网络首发论文

题目: 中国碳达峰碳中和路径优化方法
作者: 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 刘兰翠, 廖华, 陈景明, 安润颖, 赵光普, 孙飞虎, 吴郢, 谭锦潇, 邹颖, 赵子豪
DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1164
收稿日期: 2022-05-29
网络首发日期: 2022-05-31
引用格式: 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 刘兰翠, 廖华, 陈景明, 安润颖, 赵光普, 孙飞虎, 吴郢, 谭锦潇, 邹颖, 赵子豪. 中国碳达峰碳中和路径优化方法[J/OL]. 北京理工大学学报(社会科学版).
<https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1164>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2022.1164

收稿日期：2022-05-29

基金项目：国家自然科学基金项目（71822401，71603020，71521002）；北京市自然科学基金项目（JQ19035）

作者简介：魏一鸣（1968—），男，教授，博士生导师；E-mail: wei@bit.edu.cn; 余碧莹（1986—），女，教授，博士生导师，E-mail: yubiyang_bj@bit.edu.cn

中国碳达峰碳中和路径优化方法

魏一鸣¹，余碧莹¹，唐葆君¹，刘兰翠²，廖华¹，陈景明¹，安润颖¹，赵光普¹，孙飞虎¹，吴郢¹，谭锦潇¹，邹颖¹，赵子豪¹

(1. 北京理工大学 能源与环境政策研究中心 能源经济与环境管理北京市重点实验室，北京 100081；2. 北京师范大学 经济与工商管理学院，北京 100875)

摘要：碳中和是涉及自然、社会、经济、行为、技术、能源等多系统交织耦合和多重反馈的复杂巨系统，面临跨系统跨部门耦合性、分行业异构性、技术成本动态性、技术和行为演变非线性、社会经济不确定性等诸多挑战。开展“双碳”目标约束下碳排放技术体系研究，亟需建立能刻画上述挑战内涵的方法和技术。为此，从复杂系统的视角，自主设计构建了自下而上的国家能源技术模型（C³IAM/NET），耦合“能源加工转换—运输配送—终端使用—末端回收治理”全过程、行业“原料—燃料—工艺—技术—产品/服务”全链条，实现以需定产、供需联动、技术经济协同的复杂系统建模。为碳达峰碳中和路径优化、时间表和路线图的设计提供了有效的方法和工具。该工具成功应用于中国碳达峰和碳中和路径的优化设计，但为了方便不同类型读者的阅读，关于模型应用的相关内容，将在本文的姊妹篇（中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究）中介绍。

关键词：碳达峰碳中和；复杂系统建模；国家能源技术模型；路径优化

中图分类号：F205

文献标识码：A

文章编号：1009-3370(2022)04-0000-00

实现碳中和是一项复杂系统工程，涉及自然系统（碳汇）、社会系统、经济系统、行为系统、能源系统等多系统耦合，亦涉及能源系统内部能源加工转换—运输配送—终端使用—末端治理全过程的技术耦合，同时还涉及供给和需求侧的耦合以及终端用能部门之间的跨部门耦合，最终目标是实现技术经济协同，以权衡成本收益风险之间的关系。为了刻画上述复杂交互机理，面临跨系统跨部门耦合性、分行业异构性、技术成本动态性、技术和行为演变非线性、社会经济不确定性等诸多方面的挑战，加大了统筹成本收益的难度和碳排放路径规划的不确定程度^[1]。因此，从复杂系统的视角，建立能刻画上述挑战内涵的方法和技术，是开展双碳目标约束下碳排放技术体系优化研究有效和可行的途径。

已有大量文献对中国低碳转型路径开展了研究，通过对 40 多类国内外主流综合评估模型进行

对比和相关文献总结，发现当前全球多类模型模拟了 1.5°C 和 2°C 目标下各区域的碳排放路径^[2-7]，但模型中对于中国的参数设置差异大，导致关于中国的碳排放路径和排放空间相差较大，且缺少对需求不确定性的刻画；例如，已有模型对 2°C 目标约束下中国 2015—2050 年的碳排放空间估计结果为 1 500~4 600 亿吨 CO₂，相差极大。国内学者也开展了大量研究，特别是针对单一碳密集型行业或对多个行业分别开展了技术优化和减排潜力评估^[8-11]，但仍需要进一步加强对跨系统跨部门耦合性、需求不确定性、技术行为非线性等特征的刻画^[12-14]。

针对碳中和路径优化的复杂性对建模的需求，本文应用复杂系统理论，自主设计，构建了自下而上的国家能源技术模型（National Energy Technology model，以下简称 NET），它是气候变化综合评估模型（China's Climate Change Integrated Assessment Model，以下简称 C³IAM）的重要组成部分，因此，取名为 C³IAM/NET。该模型实现了“用能产品/服务需求预测—终端行业生产规划—终端能源需求集成—能源加工转换技术选择—供需两侧碳排放耦合”的五维一体^[14-15]，为全国—行业—技术多个层面的碳排放精细化管理提供科学方法。

一、国家能源技术模型（C³IAM/NET）总体设计

C³IAM/NET 模型目前涵盖一次能源供应、电力、热力、钢铁、水泥、化工（乙烯/甲醇/合成氨/电石等多种关键产品）、有色、造纸、农业、建筑（居民/商业）、交通（城市/城际，客运/货运）、其他工业等 20 个细分行业的 800 余类重点技术^[14-27]。由于能源需求主要受全社会终端产品和服务的消费需求、以及技术效率和资源供给的影响，因此，C³IAM/NET 模型首先在综合考虑经济发展、产业升级、城镇化加快、老龄化加速、智能化普及等社会经济行为动态变化的基础上，对各个终端用能行业的产品（如钢铁、水泥、化工、有色等工业产品）和服务（如建筑取暖、制冷、货运交通运输、客运交通出行等服务）需求进行预测。进而以需求为约束，引入重点技术成本动态变化趋势，针对 17 个终端用能细分行业，分别开发了涵盖行业“原料—燃料—工艺—技术—产品/服务”全链条上物质流和能量流的技术优化模型，模拟各行业以经济最优方式实现其产品或服务供给目标的技术动态演变路径和分品种能耗、碳排放及成本的变化过程；进一步集成所有终端用能行业对一次能源（煤、油、气）和二次能源（电力、热力）的动态使用需求函数，建立终端行业能源需求函数和能源加工转换行业生产函数的平衡关系，以此为约束，对能源供给和加工转换行业进行技术优化布局；最终将上述过程纳入到统一模型框架，耦合“能源加工转换—运输配送—终端使用—末端回收治理”全过程、行业“原料—燃料—工艺—技术—产品/服务”全链条，实现以需定产、供需联动、技术经济协同的 C³IAM/NET 复杂系统建模。模型框架如图 1 所示。

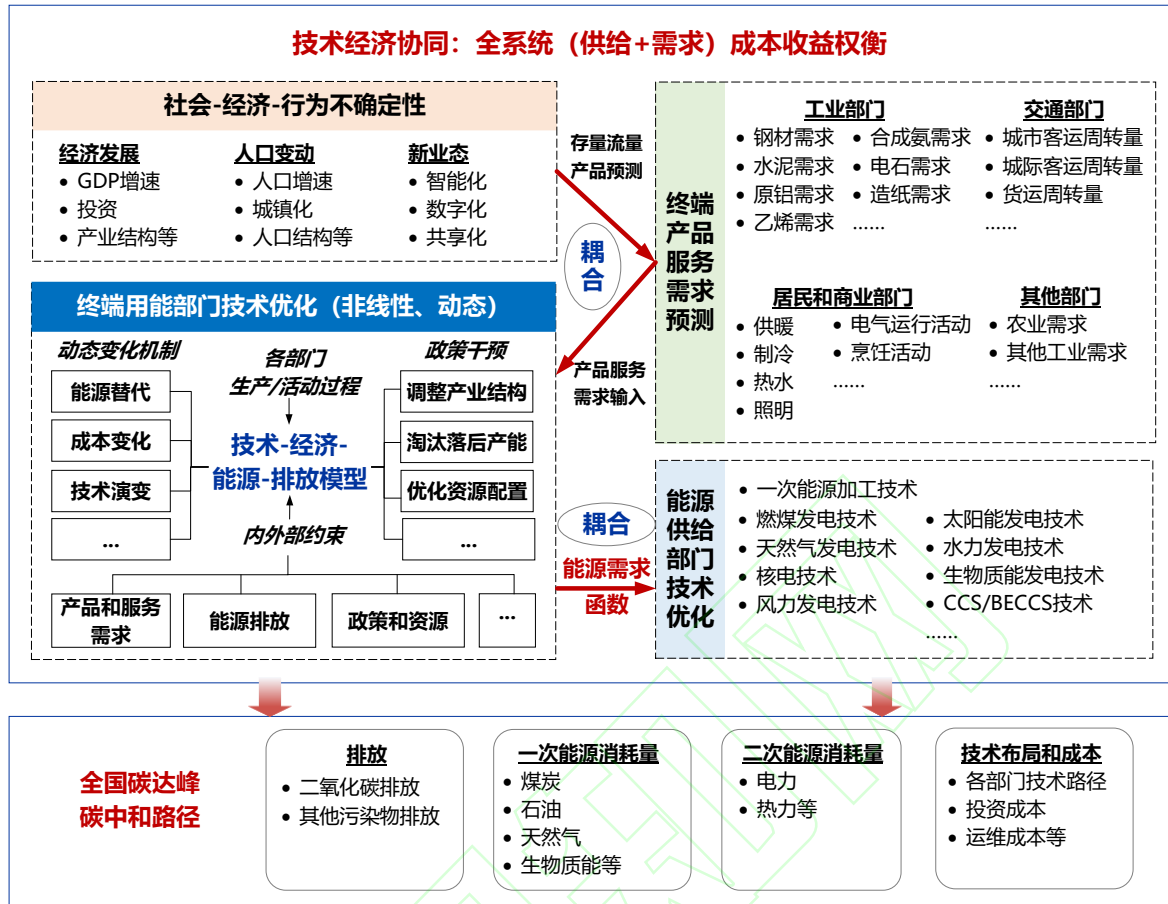


图 1 C³IAM/NET 模型框架

二、C³IAM/NET 模型体系

C³IAM/NET 模型的基本原理是实现能源系统成本最小的技术布局优化，下面将对其数学表达进行系统描述。

（一）目标函数

设置为规划期内能源系统年化总成本最小^[28]，包含三个部分：设备或技术的年度化初始投资成本、设备或技术的年度化运行和维护成本、以及燃料成本。总成本最小即为

$$\min TC_t = IC_t + OM_t + EC_t \quad (1)$$

其中， t 为年份； TC_t 表示折算到第 t 年的总成本； IC_t 为设备折算到第 t 年的年度化初始投资总成本； OM_t 为设备的运行和维护总成本； EC_t 为燃料总成本。

1. 年度化初始投资成本

计算时需考虑政府可实施的补贴率、内部收益率、设备寿命因素，表达式为

$$IC_t = \sum_i^I \sum_d^D ic_{i,d,t} \cdot (1 - SR_{i,d,t}) \cdot \frac{IR_{i,d,t} \cdot (1 + IR_{i,d,t})^{T_{i,d}}}{(1 + IR_{i,d,t})^{T_{i,d}} - 1} \quad (2)$$

其中, i 表示能源系统各行业; I 为行业总量; d 表示能源系统各行业的技术设备和碳捕集利用与封存 (CCS) 技术设施; D 为设备总量; $ic_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的初始投资成本; $SR_{i,d,t}$ 为补贴率; $IR_{i,d,t}$ 为内部收益率; $T_{i,d}$ 为生命周期。

2. 运行和维护成本

运行和维护成本是指设备的维修成本、管理成本、人力成本、政府补贴等, 表达式为

$$OM_t = \sum_i^I \sum_d^D om_{i,d,t} \cdot OQ_{i,d,t} \cdot (1 - SR_{i,d,t}) \quad (3)$$

其中, $om_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的单位运行和维护成本; $OQ_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的运行数量。

3. 能源成本

能源成本是指所有设备的能源消费量与相应能源品种价格的乘积, 考虑到不同能源品种价格随时间变化、设备能源效率提高、政府可实施补贴等情况, 表达式为

$$EC_t = \sum_i^I \sum_d^D \sum_k^K ENE_{i,d,k,t} \cdot P_{i,d,k,t} \cdot (1 - SR_{i,d,k,t}) \quad (4)$$

$$ENE_{i,d,k,t} = E_{i,d,k,t} \cdot OQ_{i,d,k,t} \cdot (1 - EFF_{i,d,k,t}) \quad (5)$$

其中, k 表示能源品种; K 表示能源品种数量; $ENE_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 所耗能源品种 k 的总消费量; $P_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 所耗能源品种 k 的价格; $E_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 所耗能源品种 k 的设备 d 的单位消费量; $OQ_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 所耗能源品种 k 的设备 d 的运行数量; $EFF_{i,d,k,t}$ 为第 t 年行业 i 所耗能源品种 k 的设备 d 的技术进步率。

(二) 约束条件

1. 产品和能源服务需求约束

产品和能源服务需求约束是指对于给定的某种工业产品或交通、建筑服务, 所有设备运行量与单位设备产品或服务产出量的乘积, 必须大于或等于该产品或服务的需求量, 从而体现以需定产的实际过程。表达式为

$$\sum_d^D OT_{i,d,j,t} \cdot OQ_{i,d,j,t} \cdot (1 - EFF_{i,d,j,t}) \geq DS_{i,j,t} \quad (6)$$

其中, $OT_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的单位产出量; $OQ_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的运行数量; $EFF_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的技术进步率; $DS_{i,j,t}$ 为第 t 年行业 i 的产品或能源服务 j 的总需求量。

2. 能源消费约束

能源消费约束是指设备运行量与单位设备能源消费量的乘积，不得超过或低于某个限制值，从而满足国家或行业能源总量控制的政策约束。可以对国家能耗总量、也可对某个行业的能耗量、还可对某个行业的某一种能源品种消耗量进行约束，表达式为

$$\text{ENE}_t^{\min} \leq \text{ENE}_t \leq \text{ENE}_t^{\max} \quad (7)$$

$$\text{ENE}_{i,t}^{\min} \leq \text{ENE}_{i,t} \leq \text{ENE}_{i,t}^{\max} \quad (8)$$

$$\text{ENE}_{i,k,t}^{\min} \leq \text{ENE}_{i,k,t} \leq \text{ENE}_{i,k,t}^{\max} \quad (9)$$

$$\text{ENE}_t = \sum_{i=1}^I \text{ENE}_{i,t} \quad (10)$$

$$\text{ENE}_{i,t} = \sum_{k=1}^K \text{ENE}_{i,k,t} \quad (11)$$

$$\text{ENE}_{i,k,t} = \sum_{d=1}^D \text{ENE}_{i,d,k,t} \quad (12)$$

其中， ENE_t 、 $\text{ENE}_{i,t}$ 、 $\text{ENE}_{i,k,t}$ 分别为第 t 年国家、行业 i 、行业 i 能耗品种 k 的能源消费量； ENE_t^{\min} 为第 t 年国家能耗总量下限约束； ENE_t^{\max} 为第 t 年国家能耗总量上限约束； $\text{ENE}_{i,t}^{\min}$ 为第 t 年行业 i 能耗总量下限约束； $\text{ENE}_{i,t}^{\max}$ 为第 t 年行业 i 能耗总量上限约束； $\text{ENE}_{i,k,t}^{\min}$ 为第 t 年行业 i 能耗品种 k 消耗量下限约束； $\text{ENE}_{i,k,t}^{\max}$ 为第 t 年行业 i 能耗品种 k 消耗量上限约束。

3. 排放约束

碳排放约束是指所有设备运行量乘以单位设备排放量的总和，不得超过某个限制值，从而满足国家和行业低碳或绿色发展目标的约束。可以对全社会排放总量、也可对能源系统的排放总量、还可对某个行业的排放量进行约束，表达式为

$$\text{EMS}_{n,g,t} \leq \text{EMS}_{n,g,t}^{\max} \quad (13)$$

$$\text{EMS}_{s,g,t} \leq \text{EMS}_{s,g,t}^{\max} \quad (14)$$

$$\text{EMS}_{i,g,t} \leq \text{EMS}_{i,g,t}^{\max} \quad (15)$$

$$\text{EMS}_{n,g,t} = \text{EMS}_{s,g,t} + \text{EMS}_{\text{sink},t} \quad (16)$$

$$\text{EMS}_{s,g,t} = \sum_{i=1}^I \text{EMS}_{i,g,t} \quad (17)$$

$$\text{EMS}_{i,g,t} = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \text{ENE}_{i,d,k,t} \cdot \text{GAS}_{i,d,k,g,t} \quad (18)$$

其中， g 表示能源利用所产生的气体； $\text{EMS}_{n,g,t}$ 、 $\text{EMS}_{s,g,t}$ 、 $\text{EMS}_{i,g,t}$ 分别为第 t 年全社会、能源系统、行业 i 所产生的气体 g 的排放量； $\text{EMS}_{n,g,t}^{\max}$ 、 $\text{EMS}_{s,g,t}^{\max}$ 、 $\text{EMS}_{i,g,t}^{\max}$ 分别为第 t 年全社会、能源系统、

行业 i 所产生的气体 g 的最大排放约束； $EMS_{\text{sink},t}$ 为第 t 年生态系统的碳汇量（负值），碳汇量可根据土地类型、土地面积、植被类型和固碳潜力等特征测算； $GAS_{i,d,k,g,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 所耗能品种 k 产生的气体 g 的排放因子。

4. 设备运行数量约束

设配运行数量约束是指设备运行量不得大于开机的设备库存量，表达式为

$$SQ_{i,d,t} = SQ_{i,d,t-1} + NQ_{i,d,t} - RQ_{i,d,t} \quad (19)$$

$$OQ_{i,d,t} \leq SQ_{i,d,t} \cdot \text{RATE}_{i,d,t} \quad (20)$$

其中， $SQ_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的库存量； $SQ_{i,d,t-1}$ 为第 $t-1$ 年设备 d 的库存量； $NQ_{i,d,t}$ 为第 t 年设备 d 的新增数量； $RQ_{i,d,t}$ 为第 t 年设备 d 的退役数量； $OQ_{i,d,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 的运行数量； $\text{RATE}_{i,d,t}$ 为设备 d 的开机率，不大于 1。

5. 技术渗透率约束

技术渗透约束是指对于给定的某种服务，由某种设备供给的比例，不得超过或低于某个约束值，从而满足淘汰落后产能，或达到鼓励先进技术发展的政策需求。表达式为

$$\text{SHARE}_{i,d,j,t} = OT_{i,d,j,t} \cdot OQ_{i,d,j,t} \cdot (1 - \text{EFF}_{i,d,j,t}) / \text{DS}_{i,j,t} \quad (21)$$

$$\text{SHARE}_{i,d,j,t}^{\min} \leq \text{SHARE}_{i,d,j,t} \leq \text{SHARE}_{i,d,j,t}^{\max} \quad (22)$$

其中， $\text{SHARE}_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 设备 d 生产的产品或能源服务 j 在产品或能源服务 j 总产出量中的比例（渗透率）； $OT_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的单位产出量； $OQ_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的运行数量； $\text{EFF}_{i,d,j,t}$ 为第 t 年行业 i 生产产品或能源服务 j 的设备 d 的技术进步率； $\text{DS}_{i,j,t}$ 为第 t 年行业 i 的产品或能源服务 j 的总需求量； $\text{SHARE}_{i,d,j,t}^{\min}$ 为渗透率下限约束； $\text{SHARE}_{i,d,j,t}^{\max}$ 为渗透率上限约束。上限和下限约束视技术与政策规划而定。

（三）供需平衡过程

C³IAM/NET 刻画的能源系统以各类能源为载体，将供应侧、加工转换环节和消费侧连接起来，模型中各行业之间通过硬连接的方式进行系统集成。

1. 一次能源供应总量

一次能源供应总量等于各类一次能源品种供应量之和，表达式为

$$\text{ENE}_{t}^{\text{pri_supply}} = \sum_k \text{ENE}_{k,t}^{\text{pri_supply}} = \text{ENE}_{\text{col},t}^{\text{pri_supply}} + \text{ENE}_{\text{oil},t}^{\text{pri_supply}} + \text{ENE}_{\text{ngs},t}^{\text{pri_supply}} + \text{ENE}_{\text{pri_ele},t}^{\text{pri_supply}} + \text{ENE}_{\text{bms},t}^{\text{pri_supply}} \quad (23)$$

其中， k 表示所有一次能源品种，共 K 种，包括煤炭（col）、石油（oil）、天然气（ngs）、一次电力

(pri_ele)、其他可再生能源(bms)等； $ENE_t^{pri_supply}$ 为第 t 年一次能源供应总量； $ENE_{k,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年一次能源品种 k 的供应量； $ENE_{col,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年煤炭供应量； $ENE_{oil,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年石油供应量； $ENE_{ngs,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年天然气供应量； $ENE_{pri_ele,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年一次电力供应量； $ENE_{bms,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年可再生能源供应量。

2. 一次能源供需平衡（除一次电力外）

除一次电力外的其他一次能源品种，包括煤炭、石油、天然气、其他可再生能源，这些能源种类的供应量等于二次能源加工转换环节消费的一次能源数量、终端行业的一次能源直接消费量、净出口量、损失量和库存量之和，表达式为

$$ENE_{k,t}^{pri_supply} = \sum_s \sum_d ENE_{k,s,d,t}^{pri_sec_consume} + \sum_f \sum_d ENE_{k,f,d,t}^{pri_fin_consume} - IMPORT_{k,t} + EXPORT_{k,t} + LOSS_{k,t} + ENE_{k,t}^{stock} \quad (24)$$

其中， s 表示生产二次能源的各类能源加工转换环节，共 S 个环节； f 表示不同的终端能源消费行业（ $f \in i$ ），共 F 个终端行业； d 表示设备， D 为设备总量； $ENE_{k,s,d,t}^{pri_sec_consume}$ 为第 t 年一次能源 k 在加工转换环节 s 设备 d 的消费量； $ENE_{k,f,d,t}^{pri_fin_consume}$ 为第 t 年一次能源 k 在终端行业 f 设备 d 的消费量； $IMPORT_{k,t}$ 为第 t 年一次能源 k 的进口量； $EXPORT_{k,t}$ 为第 t 年一次能源 k 的出口量； $LOSS_{k,t}$ 为第 t 年一次能源 k 在运输、分配、储存等过程中的损失量； $ENE_{k,t}^{stock}$ 为第 t 年一次能源 k 的库存量。

3. 从一次能源到除电力、热力外的二次能源

一次能源进入到加工转换环节，将加工生产成为二次能源，各环节的一次能源消费量等于产出的二次能源与效率之比，表达式为

$$ENE_{k,s,d,t}^{pri_sec_consume} = ENE_{m,s,d,t}^{sec_produce} \cdot \eta_{k \rightarrow m,s,d,t} \cdot (1 - EFF_{k \rightarrow m,s,d,t}) \quad (25)$$

$$ENE_{m,s,d,t}^{sec_produce} = ENE_{m,t}^{sec_produce} \cdot SHARE_{m,s,d,t} \quad (26)$$

其中， m 表示各类二次能源品种，共 M 种二次能源，包括焦炭、焦虑煤气、高炉煤气等煤炭制品，汽油、柴油、燃料油等石油制品； $ENE_{k,s,d,t}^{pri_sec_consume}$ 为第 t 年一次能源 k 在加工转换环节 s 设备 d 的消费量； $ENE_{m,s,d,t}^{sec_produce}$ 为第 t 年二次能源 m 在加工转换环节 s 设备 d 的生产量； $\eta_{k \rightarrow m,s,d,t}$ 为第 t 年加工转换环节 s 设备 d 由一次能源 k 转换成二次能源 m 的能源效率； $EFF_{k \rightarrow m,s,d,t}$ 为第 t 年加工转换环节 s 生产二次能源 m 的设备 d 的技术进步率； $ENE_{m,t}^{sec_produce}$ 为第 t 年二次能源 m 的总生产量； $SHARE_{m,s,d,t}$ 为第 t 年加工转换环节 s 设备 d 在二次能源 m 总产量中的渗透率。

4. 从一次能源到除电力、热力外的终端能源

一次能源进入到终端用能部门，在各部门的一次能源消费量等于该行业产品或能源服务的需求量与单位产品耗电量的乘积，表达式为

$$ENE_{k,f,d,t}^{pri_fin_consume} = E_{k,f,d,t} \cdot OQ_{k,f,d,t} \cdot (1 - EFF_{k,f,d,t}) \quad (27)$$

其中, $E_{k,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 所耗能源品种 k 的设备 d 的单位消费量; $OQ_{k,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 所耗能源品种 k 的设备 d 的运行数量; $EFF_{k,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 所耗能源品种 k 的设备 d 的技术进步率, $EStock_{k,f,d,t}$ 是指。

5. 除电力、热力外的二次能源平衡

二次能源生产量等于在其他加工转换环节的二次能源消费量与终端行业的二次能源消费量及过程损失量之和, 表达式为

$$ENE_{m,t}^{sec_produce} = \sum_s \sum_d ENE_{m,s,d,t}^{sec_sec_consume} + \sum_f \sum_d ENE_{m,f,d,t}^{sec_fin_consume} + LOSS_{m,t} \quad (28)$$

其中, $ENE_{m,s,d,t}^{sec_sec_consume}$ 为第 t 年二次能源 m 在加工转换环节 s 设备 d 的消费量; $ENE_{m,f,d,t}^{sec_fin_consume}$ 为第 t 年二次能源 m 在终端行业 f 设备 d 的消费量; $LOSS_{m,t}$ 为第 t 年二次能源 m 在运输、分配、储存等过程中的损失量。

6. 从二次能源到二次能源 (除电力、热力外)

二次能源进入其他加工转换环节后, 将产出其他种类的二次能源 (例如二次能源供热、油品再投入生产石油制品、焦炭再投入生产天然气等), 其消费量等于在其他加工转换环节产出的二次能源与能源转换效率的乘积, 表达式为

$$ENE_{m,s,d,t}^{sec_sec_consume} = ENE_{n,s,d,t}^{sec_produce} \cdot \eta_{m \rightarrow n,s,d,t} \cdot (1 - EFF_{m \rightarrow n,s,d,t}) \quad (29)$$

其中, n 表示除二次能源 m 外的其他二次能源种类; $ENE_{n,s,d,t}^{sec_produce}$ 为第 t 年二次能源 n 在加工转换环节 s 设备 d 的生产量; $\eta_{m \rightarrow n,s,d,t}$ 为第 t 年加工转换环节 s 设备 d 由二次能源 m 转换成二次能源 n 的能源效率; $EFF_{m \rightarrow n,s,d,t}$ 为第 t 年加工转换环节 s 生产二次能源 n 的设备 d 的技术进步率。

7. 从二次能源到终端能源 (除电力、热力外)

二次能源进入到终端用能部门, 在各部门的二次能源消费量等于该部门为满足其产品和服务生产需求所使用的相应设备在运行过程中的二次能源消费量, 表达式为

$$ENE_{m,f,d,t}^{sec_fin_consume} = E_{m,f,d,t} \cdot OQ_{m,f,d,t} \cdot (1 - EFF_{m,f,d,t}) \quad (30)$$

其中, $E_{m,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 消耗二次能源 m 的设备 d 的单位消费量; $OQ_{m,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 消耗二次能源 m 的设备 d 的运行数量; $EFF_{m,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 消耗二次能源 m 的设备 d 的技术进步率。

8. 总发电量

总发电量等于可再生能源发电量和火电发电量之和, 表达式为

$$ENE_{ele,t}^{supply} = ENE_{pri_ele,t}^{pri_supply} + ENE_{the_ele,t}^{sec_supply} \quad (31)$$

其中, ele 表示电力; ENE_t^{supply} 为第 t 年电力总发电量; $ENE_{pri_ele,t}^{pri_supply}$ 为第 t 年可再生能源发电量; $ENE_{the_ele,t}^{sec_supply}$ 为第 t 年火力发电量。

9. 可再生能源发电量

可再生能源发电量等于各类可再生发电技术的装机容量与该设备年发电小时数、发电效率、技术进步率的乘积汇总, 表达式为

$$ENE_{pri_ele,t}^{pri_supply} = \sum_r^R \sum_d^D OT_{r,d,t} \cdot Hour_{r,d,t} \cdot \eta_{r,d,t} \cdot (1 - EFF_{r,d,t}) \quad (32)$$

其中, r 表示可再生电力, 共 R 种可再生发电技术; $OT_{r,d,t}$ 为第 t 年可再生发电技术 r 设备 d 的装机容量; $Hour_{r,d,t}$ 为第 t 年可再生发电技术 r 设备 d 的发电小时数; $\eta_{r,d,t}$ 为第 t 年可再生发电技术 r 设备 d 的发电效率; $EFF_{r,d,t}$ 为第 t 年可再生发电技术 r 设备 d 的技术进步率。

10. 火力发电量

火力发电量等于各类火电技术的装机容量与该设备年发电小时数、发电效率、技术进步率的乘积汇总, 表达式为

$$ENE_{the_ele,t}^{sec_supply} = \sum_h^H \sum_d^D OT_{h,d,t} \cdot Hour_{h,d,t} \cdot \eta_{h,d,t} \cdot (1 - EFF_{h,d,t}) \quad (33)$$

其中, h 表示火电, 共 H 种火电技术; $ENE_{the_ele,t}^{sec_supply}$ 为第 t 年火力发电量; $OT_{h,d,t}$ 为第 t 年火电技术 h 设备 d 的装机容量; $Hour_{h,d,t}$ 为第 t 年火电技术 h 设备 d 的发电小时数; $\eta_{h,d,t}$ 为第 t 年火电技术 h 设备 d 的发电效率; $EFF_{h,d,t}$ 为第 t 年火电技术 h 设备 d 的技术进步率。

11. 电力供需平衡

电力的总发电量等于终端行业电力消费量、电力储能、损失量和净出口量之和, 表达式为

$$ENE_{ele,t}^{supply} = ENE_{ele,t}^{consume} + ENE_{ele,t}^{storage} + ENE_{ele,t}^{loss} + ENE_{ele,t}^{export} - ENE_{ele,t}^{import} \quad (34)$$

其中, $ENE_{ele,t}^{consume}$ 为第 t 年终端电力消费量; $ENE_{ele,t}^{storage}$ 为第 t 年电力储能; $ENE_{ele,t}^{loss}$ 为第 t 年在传输、分配、储存等过程中的电力损失量; $ENE_{ele,t}^{import}$ 为第 t 年电力进口量; $ENE_{ele,t}^{export}$ 为第 t 年电力出口量。

12. 从电力消费到用电服务

电力进入到终端用能部门, 在各部门的电力消费量等于该部门为满足其产品和服务生产需求所使用的所有用电设备在运行过程中的电力消费量, 表达式为:

$$ENE_{ele,t}^{consume} = \sum_f^F \sum_d^D E_{ele,f,d,t} \cdot OQ_{ele,f,d,t} \cdot (1 - EFF_{ele,f,d,t}) \quad (35)$$

其中, $E_{ele,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 耗电设备 d 的单位耗电量; $OQ_{ele,f,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 耗电设备 d

的运行数量； $EFF_{elef,d,t}$ 为第 t 年终端行业 f 耗电设备 d 的技术进步率。

模型中关于热力和氢能等的供需平衡过程，依照上述电力供需平衡过程进行建模。

三、情景和主要参数设置

为了开展应用研究，本研究围绕碳达峰碳中和路径中的不确定性设计了相应情景，并对 C³IAM/NET 模型的主要参数设置说明如下。

（一）情景设计

C³IAM/NET 模型，以 2020 年为基准年，以 2060 年为目标年。由于中国实现碳达峰碳中和的路径面临多方面的不确定性，因此，本研究从源头产品和服务需求，以及末端自然碳汇可用量的不确定性两方面，设计了多种组合情景，具体来说：

1. 在考虑社会、经济、行为不确定性的基础上对各行业的产品和服务需求进行预测，具体过程可参照 C³IAM/NET 模型相关文献^[14-27]。基于预测结果，按照统一标准设置各行业产品和服务需求的三种情景，分别为高、中、低需求情景。

2. 考虑到 2060 年自然系统碳汇可用量的不确定性^[29]，根据现有研究对碳汇评估的范围，设置实现碳中和目标需要能源系统相应转型力度的三个情景，分别是（1）当 2060 年碳汇可用量仅为 10 亿吨左右时，能源系统需承担极大的减排量，因此对应能源系统高速转型情景，从安全降碳的角度考虑，在高速转型情景下又进一步区分为长平台期情景和短平台期情景，用于体现煤炭退出速度慢和快的影响；（2）当 2060 年碳汇可用量约 20 亿吨左右时，对应能源系统中速转型情景；（3）当 2060 年碳汇可用量约 30 亿吨左右时，对应能源系统低速低型情景。能源系统不同转型力度对应各个行业低碳技术和措施的不同实施程度，为了实现 2030 碳达峰、2060 碳中和目标，C³IAM/NET 模型将刻画 20 个细分行业的低碳技术和措施之间基于成本收益和政策约束的互补及替代过程，最终提出不同情景下的最优减排路径。

3. 将 BAU (Business as Usual, 基准情景) 设置为延续当前政策力度和技术渗透的发展情景。

（二）参数设定

由于 C³IAM/NET 模型中涉及的行业较多，每个行业在开展产品或服务需求预测过程中考虑的因素和过程相差较大，因此，此处仅对各个行业需求预测的共性参数设定进行说明，主要包括对经济增长、城镇化与人口、产业结构的预测，具体介绍如下。

1. 经济增长

中国未来的经济增长速度如表 1 所示。按照表 1 中的 GDP 增长速度，中国 GDP 将在 2035 年实现翻番，并于 2060 年实现再翻番。具体而言，中国人均 GDP 将由 1.6 万国际元增至 2035 年的

3.5 万国际元，和 2060 年的 7.8 万国际元 (按世行 2017 年购买力平价计)。

表 1 GDP 年均增速预测

单位：%

情景	2021—2025 年	2026—2030 年	2031—2035 年	2036—2040 年	2041—2050 年	2051—2060 年
低速	5.0	4.5	3.5	3.5	2.5	1.5
中速	5.6	5.5	4.5	4.5	3.4	2.4
高速	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0

数据来源：综合国务院发展研究中心、国家信息中心、经济学家等判断^[30]

2. 城镇化与人口

城市化率和人口预测参考联合国发布的《世界人口展望 2019》和《世界城市化展望 2018》报告^[31-32]。其中，人口数据根据第七次全国人口普查进行微幅校正，暂未考虑人口政策调整；2051—2060 年的城镇化率采用趋势外推(联合国无该时段数据)，预测结果如表 2 所示。中国预计 2030 年人口达峰，峰值 14.4 亿人，2060 年降至 13.1 亿人；城镇化率持续提升，将在 2030 年超过 70%，2050 年超过 80%，并于 2060 年增至 84.2%。当前高收入国家城镇化率 81%^[32]，美国 83%^[33]，预计中国城镇化率将于 2050—2060 年达到高收入国家水平。

表 2 人口及城镇化率预测

指标	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年	2055 年	2060 年
人口/亿人	14.1	14.3	14.4	14.3	14.2	14.0	13.8	13.4	13.1
城镇化率/%	63.9	68.7	72.6	75.6	77.9	79.5	81.0	82.6	84.2

3. 产业结构

在产业结构方面，参照魏一鸣等^[16]的中发展情形，并根据 2020 年实际的产业结构数据进行调整更新(图 2)。预测结果显示，第二产业增加值占国内生产总值比重将逐步下降，分别在 2030 年、2045 年、2060 年下降至 34.6%、28.5%、25.9%；第三产业增加值比重逐步提升，分别在 2030 年、2045 年、2060 年提升至 61.1%、70.4%、73%。

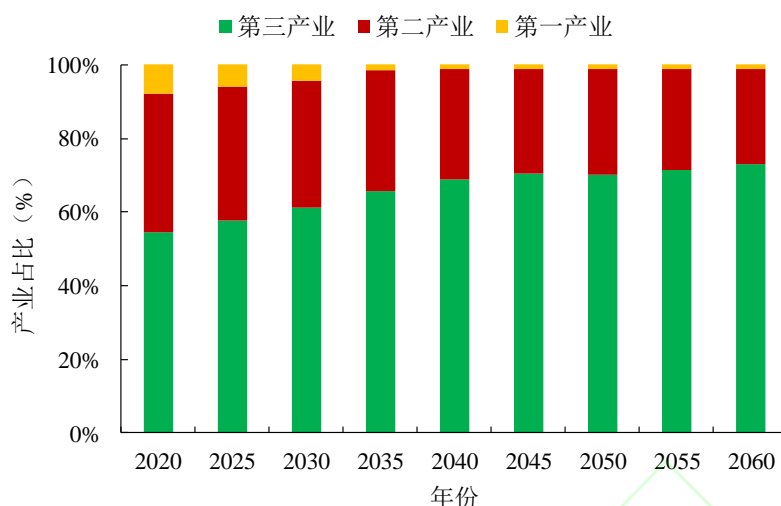


图2 中国产业结构预测

应用 C³IAM/NET 模型，针对上述设计的情景，优化得到了碳汇和各行业产品服务需求约束下的全国碳达峰碳中和路径、行业减排行动和技术布局，形成了中国碳达峰碳中和时间表与路线图，笔者将在本文的姊妹篇（中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究）中进行讨论。

参考文献：

- [1] WEI Y M, KANG J N, CHEN W. Climate or mitigation engineering management[J/OL]. Engineering, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.008>.
- [2] ROGELJ J, LUDERER G, PIETZCKER R, et al. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C[J]. Nature Climate Change, 2015, 5:519–527.
- [3] HOF A F, M DEN ELZEN G J, ADMIRAAL A, et al. Global and regional abatement costs of nationally determined contributions (NDCs) and of enhanced action to levels well below 2 °C and 1.5 °C[J]. Environmental Science & Policy, 2017, 71:30–40.
- [4] SANDERSON B M, XU Y, TEBALDI C, et al. Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5 and 2 °C futures[J]. Earth System Dynamics. 2017, 8:827–847.
- [5] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, H-O PÖRTNER, et al. IPCC, 2018: summary for policymakers[R]//Global warming of 1.5°C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.
- [6] VRONTISI Z, LUDERER G, SAVEYN B, et al. Enhancing global climate policy ambition towards a 1.5 °C stabilization: a short-term multi-model assessment[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13: 044039.
- [7] DUAN H, ZHOU S, JIANG K, et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit[J]. Science, 2021,372:378-385.
- [8] REN M, LU P, LIU X, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298:117209.

- [9] YAO X, LEI H, YANG L, et al. Low-carbon transformation of the regional electric power supply structure in China: a scenario analysis based on a bottom-up model with resource endowment constraints[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167:105315.
- [10] LIU J, YIN M, XIA-HOU Q, et al. Comparison of sectoral low-carbon transition pathways in China under the nationally determined contribution and 2 °C targets[J/OL]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149:111336. <http://www.socolar.com/Article/Index?aid=100088962499&jid=100000002554>.
- [11] QIU S, LEI T, WU J, et al. Energy demand and supply planning of China through 2060[J]. *Energy*, 2021,234. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221014419>.
- [12] DUAN H, MO J, FAN Y, et al. Achieving China's energy and climate policy targets in 2030 under multiple uncertainties[J]. *Energy Economics*, 2018, 70: 45-60.
- [13] WEI Y M, CHEN K, KANG J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: a literature review[J/OL]. *Engineering*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809922001333?via%3Dihub>.
- [14] ZHAO G, YU B Y, AN R, et al. Energy system transformations and carbon emission mitigation for China to achieve global 2°C climate target[J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292: 112721. <https://sme.bit.edu.cn/2018gb/research/researcha/publications/06560884fd8945428543cd1614692956.htm>.
- [15] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. *北京理工大学学报 (社会科学版)*, 2021,23(2): 17-24.
- [16] 魏一鸣, 廖华, 余碧莹, 等. 中国能源报告 (2018): 能源密集型部门绿色转型研究[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [17] 张呈尧. 水泥行业节能减排路径模拟方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [18] 易兰丽君. 造纸行业节能减排路径模拟方法及其应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2020.
- [19] 吴郢, 余碧莹, 邹颖, 等. 碳中和愿景下电力部门低碳转型路径研究[J]. *中国环境管理*, 2021(3): 48-55.
- [20] AN R Y, YU B Y, RU L, et al. Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry[J]. *Applied Energy*, 2018, 226:862-880.
- [21] CHEN J M, YU B, WEI Y M. Energy technology roadmap for ethylene industry in China[J]. *Applied Energy*, 2018, 224:160-174.
- [22] LI X, YU B Y. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J/OL]. *Energy Policy*, 2019, 133:110913. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519304914>.
- [23] YU B Y, ZHAO Z, ZHANG S, et al. Technological development pathway for a low-carbon primary aluminum industry in China[J/OL]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 173. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521004844>.
- [24] TANG B J, LI R, YU B Y, et al. How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective[J]. *Energy Policy*, 2018, 120:365-381.
- [25] TANG B J, LI X Y, YU B Y, et al. Sustainable development pathway for intercity passenger transport: a case study of China[J/OL]. *Applied Energy*, 2019, 254. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v254y2019ics0306261919313194.html>.
- [26] TANG B J, GUO Y Y, YU B Y, et al. Pathways for decarbonizing China's building sector under global warming thresholds[J/OL]. *Applied Energy*, 2021, 298. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261921006371>.
- [27] ZHANG C Y, YU B Y, CHEN J M, et al. Green transition pathways for cement industry in China[J/OL]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 166: 105355.

<http://www.socolar.com/Article/Index?aid=100085767706&jid=100000004625>.

- [28] HIBINO G, PANDEY R, MATSUOKA Y, et al. A guide to AIM/Enduse model[M]. Japan: Springer Japan, 2003.
- [29] WANG J, FENG L, I PALMER P, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586:720-723.
- [30] 戴彦德, 康艳兵, 熊小平,等. 2050 中国能源和碳排放情景暨能源转型与低碳发展路线图[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [31] United Nations. World population prospects: 2019 revision. United Nations, department of economic and social Affairs, population division [DB/OL]. (2019) [2022-05-29]. <https://population.un.org/wpp/>.
- [32] United Nations. World urbanization prospects: 2018 revision. United Nations, department of economic and social Affairs, population division [DB/OL]. (2018) [2022-05-29]. <https://population.un.org/wup/DataQuery/>.
- [33] World Bank. World bank open data [DB/OL]. World Bank, [2022-05-29] <https://data.worldbank.org.cn/>.

Optimization Method for China's Carbon Peak and Carbon Neutrality Roadmap

WEI Yiming¹, YU Biying¹, TANG Baojun¹, LIU Lancui², LIAO Hua¹, CHEN Jingming¹, AN Runying¹, ZHAO Guangpu¹, SUN Feihu¹, WU Yun¹, TAN Jinxiao¹, ZOU Ying¹, ZHAO Zihao¹

(1. Beijing Key Lab of Energy Economics and Environmental Management, Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Business, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Achieving carbon neutrality is related to a complex giant system involving interwoven coupling and feedback of multiple systems including nature, society, economy, behavior, technology and energy. It faces many challenges such as cross-system and cross-sectoral coupling, sub-industry heterogeneity, technology cost dynamics, nonlinearity of technology and behavioral evolution, and social and economic uncertainties. To carry out the research of carbon emission technology planning under the constraint of carbon peak and carbon neutrality target, it is urgent to develop appropriate methods and models that can depict the connotation of the above challenges. To this end, this research designs and builds a bottom-up national energy technology model (named C³IAM/NET) from the perspective of complex system, by coupling the whole process including energy conversion, transportation, end-use consumption, recycling management and end treatment, and meanwhile coupling the whole industry chain including raw material, fuel, production process, technology and product/service. Finally, C³IAM/NET model fulfills the goal of production determined by demand, supply and demand interlinkage, and the coordination between technology and economy. C³IAM/NET model provides effective method and tools for the design of low-carbon transition pathway. C³IAM/NET model has been successfully applied to the optimization of carbon peak and carbon neutrality schedule and roadmap for China. But in order to facilitate the reading of different types of readers, the relevant content of the model application will be introduced in the sister article (Roadmap for achieving China's Carbon Peak and

Carbon Neutrality).

Keywords: carbon peak and carbon neutrality; complex system modelling; national energy technology model; pathway optimization

[责任编辑：孟青]

