

供需协同下考虑蓝绿碳汇的能源电力转型路径

——基于LEAP-NEMO模型的行业精细化建模

檀勤良^{1,2,5,*}, 陈飞扬¹, 史超凡¹, 李晓斐¹,
丁毅宏³, 杜翼⁴



1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206;
2. 华北电力大学 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室, 北京 102206;
3. 华北电力大学 国家能源发展战略研究院, 北京 102206;
4. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福州 350013;
5. 北京市能源发展研究基地, 北京 102206

摘 要 : 科学规划中长期能源电力转型路径, 是落实碳中和目标、减缓气候变化的关键。然而, 现有能源电力转型路径研究缺乏对能源供需双侧协同转型的系统性建模, 且沿海地区碳汇核算普遍忽略海洋固碳能力, 难以准确预测地区能源消费与碳排放趋势。为此, 本文基于耦合低排放分析平台 (Low Emissions Analysis Platform, LEAP) 与下一代能源建模优化系统 (Next Energy Modeling System for Optimization, NEMO) 的 LEAP-NEMO 模型, 从能源供需双侧视角构建覆盖全经济部门的省域中长期能源电力转型模型。该模型基于行业精细化预测的能源电力消费数据, 以电力系统总成本最小化为目标, 优化形成符合地区实际的电源规划, 并在常规绿碳核算基础上补充蓝碳核算方法。本文以福建省为案例开展模型实证研究, 综合考虑地区资源禀赋、产业结构及政策诉求, 系统评估供需双侧转型政策对能源消费、电力转型及碳排放的影响。结果表明, 虽然能效提升、用能结构优化和电力清洁化加速政策对能源供需双侧的作用方式不同、对各部门的碳减排贡献各异, 但在地区净碳排放路径中的作用力度与时段能够形成优势互补, 具有显著协同降碳作用。综合情景下的累计碳减排量较各政策单独实施的累计碳减排量提升 36.1%。与国家层面的研究类似, 地区能源转型的关键仍为电力部门, 其在本文设定的综合情景下的碳减排量占预测期内累计碳减排量的 47.2%。自然碳汇是实现净碳排放量大幅下降的关键支撑, 其在综合情景下抵消了部门累计碳排放量的 61.93%。其中, 蓝碳是碳汇提升的主要贡献源, 其增长占总自然碳汇增长的 65.56%。

关 键 词 : 能源转型; LEAP-NEMO模型; 供需协同; 自然碳汇; 碳中和

中图分类号 : TK01 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 2097-4981(2026)04-0489-20

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2026-0020

0 引言

为应对全球气候变化, 中国作为世界上最大的

年度能源消费国和碳排放国^[1], 于2020年正式提出碳达峰碳中和 (“双碳”) 目标。在此目标下, 各省级行政区 (下文简称省份) 陆续出台省级层面践行

收稿日期: 2026-04-13; **接受日期:** 2026-06-08

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (25&ZD139)

通讯作者: 檀勤良 (1969—), 博士, 教授, 主要从事能源经济与政策、能源环境建模与优化等研究。E-mail: tan.qinliang1@gmail.com

引用格式: 檀勤良, 陈飞扬, 史超凡, 等. 供需协同下考虑蓝绿碳汇的能源电力转型路径——基于LEAP-NEMO模型的行业精细化建模[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(4): 489–508.

TAN Q L, CHEN F Y, SHI C F, et al. Energy and Power Transition Pathways Considering Blue and Green Carbon Sinks Under Supply-Demand Coordination: A Sector-Detailed Modeling Approach Based on LEAP-NEMO[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(4): 489–508.

“双碳”目标的行动方案，并制定净零排放政策和可再生能源发展规划。省份是中国“双碳”治理成果实现的关键主体，其规划的合理与否决定了“双碳”目标践行程度的高低。然而，各省份在自然条件、资源禀赋和发展水平方面存在显著差异^[2]，同时承担着工业脱碳、电力系统重构及生态固碳等多维任务，若采用不契合本地实际的规划方案，可能导致经济发展、节能减排与能源安全三者之间的失衡。因此，明确科学合理的省域中长期能源电力转型路径，构建符合区域实际的“双碳”方案，成为亟须解决的关键问题。

省域中长期能源电力低碳转型路径的规划，通常需要借助能源环境模型，量化不同政策与技术路径下的转型效果，为方案规划提供科学依据。这类模型主要分为自上而下和自下而上两类。自上而下模型虽能从宏观层面评估政策对经济系统的冲击与反馈，但对能源技术的刻画较为粗放，难以精准评估某一低碳技术的减排潜力。自下而上模型能更全面地描述能源替代相关技术及其对环境的影响^[3]，更适用于评估技术驱动的低碳转型路径，典型模型包括低排放分析平台（Low Emissions Analysis Platform, LEAP）^[4]、TIMES（The Integrated MARKAL-EFOM System）^[5]、C³IAM/NET（China's Climate Change Integrated Assessment Model/ National Energy Technology Model）^[6]。其中，LEAP作为一种自下而上的核算模型，能够充分反映能源生产、输送、分配和消费的全生命周期过程^[7]，兼具灵活性与适中的数据需求，因而被广泛应用于不同尺度的能源体系研究，涵盖国家^[8-10]、省市^[11-12]、区域^[13]等空间以及交通^[14]、钢铁^[15]、水泥^[16]、电力^[17]等重点行业。然而，现有研究多以高排放行业为典型对象，对省域全经济部门的精细化建模仍较为缺乏，未能准确预测省域能源消费与碳排放趋势。

省域全经济部门的精细化建模需覆盖终端部门与能源加工转换部门。其中，终端部门一般按居民用户及三次产业进行细分建模；能源加工转换部门一般分为供电、供热、炼油等部门。随着终端用能电气化进程加快，电力部门已成为影响能源供需安

全与低碳转型稳定性的关键变量，其规划合理性决定全系统转型路径的可靠性。然而，现有基于LEAP模型的省域研究往往对各类电源技术装机容量进行外生预设，既无法在模型内部动态捕捉风电、光伏的间歇性特征^[18]，也未能充分考虑储能的调节作用，从而影响省域能源消费总量、电力部门转型以及省域碳排放量的预测结果。下一代能源建模优化系统（Next Energy Modeling System for Optimization, NEMO）是一款高性能的开源能源系统优化工具，以电力系统总成本最小化优化能源供需结构，可与LEAP模型结合用于电力发展规划、能源战略和深度脱碳研究^①。已有研究通过LEAP-NEMO模型建立了东盟、芬兰、肯尼亚、喀麦隆等地区 and 国家的能源系统，从宏观上探究电力发展路径^[19]。近年来，LEAP-NEMO模型开始被应用于省域尺度的电力低碳转型路径研究。文献^[20]构建LEAP-NEMO-EDT模型，分析颠覆性能源技术驱动下天津电力系统低碳转型路径；文献^[21]以煤电主导且可再生能源丰富的内蒙古为研究对象，基于LEAP-NEMO优化模型评估电力行业“双碳”路径。然而，现有省域尺度LEAP-NEMO应用集中于电力部门，从能源、环境和生态多系统协同构建省域中长期能源电力转型模型的研究仍较少。

省域碳中和目标的实现离不开清洁低碳技术的革新与应用。当前，关于碳中和路径的研究已广泛采用多种碳移除技术，如植树造林、生物质能碳捕集与封存（Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS）和蓝碳，同时涉及化石能源的清洁利用技术、核能技术以及可再生能源技术^[22]。其中，基于自然的解决方案通过保护、恢复和可持续管理自然碳汇与碳库，能够为脱碳进程提供支撑^[23]。部分省域能源转型路径研究^[7,12,24]逐渐重视自然碳汇对碳中和的贡献，通过建立自然碳汇核算模型，量化未来碳汇变化及其对碳排放的抵消作用，但对沿海地区海洋系统固碳能力的考虑仍显不足。随着蓝碳核算方法不断完善^[25]，已有研究从国家或沿海区域尺度^[23,26]开展蓝碳资源清单、碳储量和固碳能力评估，并为将蓝碳纳入国家气候减缓战略和碳汇项

① 资料来源：<https://sei-international.github.io/NemoMod.jl/stable>；<https://leap.sei.org/default.asp?action=nemo>。

目开发提供基础数据^[27]。然而, 现有研究较少将蓝碳与能源低碳转型路径研究相耦合, 碳汇在净碳排放量下降中的补充作用刻画不足。蓝绿碳汇是有助于实现气候变化减缓与适应目标的自然气候解决方案, 将二者共同纳入省域碳中和路径研究具有重要现实意义。

为此, 本文采用LEAP-NEMO模型构建省域中长期能源电力转型模型, 为沿海省份能源供需双侧协同转型路径制定提供方法支撑与决策参考。本文的创新主要体现在3个方面: 1) 在能源需求侧, 对经济部门开展精细化建模, 综合考虑工业、交通运输细分行业在当前及未来潜在的技术路径, 系统探讨终端部门能源消费趋势和低碳转型路径。2) 在能源供给侧, 摒弃传统研究对外生装机容量预设的依赖, 考虑区域资源禀赋、装机规划目标以及各类发电机组与储能设施的经济技术特性, 以电力系统总成本最小化为目标, 优化形成符合地区实际的电力部门低碳转型路径。3) 在清洁低碳技术方面, 将碳移除、工业过程碳捕集利用与封存 (Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)、化石能源清洁高效利用等技术与能源政策有机结合, 并在现有自然碳汇核算模型基础上, 纳入海洋碳汇 (蓝碳) 核算方法, 为沿海城市利用海洋碳汇实现碳中和提供可行路径。

1 研究方法

1.1 模型框架

省域中长期能源电力转型模型的具体流程如图1所示。首先, 基于输入的基础假设和参数, 模型在不同情景下对终端部门和加工转换部门进行自下而上的精细刻画。其次, 在电力部门中引入NEMO优化工具, 以规划期内电力系统总成本最小化为目标进行电源装机规划。最后, 讨论在不同情景下终端部门和电力部门的转型路径, 分析供需双侧减排政策分别在终端部门、电力部门和净碳排放三者间的减排机理和效果。综合来看, 本文在能源需求侧, 通过细分产业子行业, 建立更精细化的能源消费体系, 实现对地区能源电力消费的更精准预测; 在能源供给侧, 考虑地区发电和储能技术, 优化形成符合地

区实际的电力部门转型路径; 在碳汇核算方面, 考虑海洋固碳能力, 补充了海洋碳汇核算方法; 在此基础上, 综合省域能源供需双侧燃料燃烧排放、工业过程排放、BECCS负排放以及自然碳汇的碳移除, 得到各情景下的省域净碳排放路径。

1.2 省域中长期能源电力转型模型

1.2.1 LEAP 能源供需模块

(1) 终端部门

终端部门按照最终用途划分为居民用户、第一产业、第二产业和第三产业。具体而言, 居民用户细化至城镇与农村居民的生活家居层面; 第一产业涵盖农、林、牧、渔四大行业; 第二产业包括工业和建筑业, 工业按照《2030年前碳达峰行动方案》细分为钢铁、建材、化工、有色金属及其他工业, 其中有色金属行业可进一步分为铜冶炼与电解铝, 建材行业可分为水泥与平板玻璃; 第三产业包括公共建筑与交通运输业, 交通运输业按功能分为客运与货运, 依据运输方式可进一步细分为铁路、公路、水路与航空4类。终端部门能源消费计算如式(1)所示:

$$FE_y = \sum_m \sum_n (AL_{m,n,y} \times EI_{m,n,y}) \quad (1)$$

式中: FE为终端能源消费量; m 为终端部门; n 为燃料类型; y 为预测期内年份; AL为活动水平, 表示各终端部门能源服务需求规模或经济社会活动规模; EI为能源强度, 表示单位活动水平所对应的能源消耗量。

(2) 加工转换部门

加工转换部门反映一次能源向二次能源的加工转换过程。参照《中国能源统计年鉴》地区能源平衡表, 本文将能源加工转换部门划分为炼油、炼焦、供热和供电4类, 其中供电部门涵盖发电和输配电两个环节。

$$TL_y = \sum_l \sum_n [ED_{l,n,y} \times (1 - \eta_{l,n,y}^T) / \eta_{l,n,y}^T] \quad (2)$$

$$CL_y = \sum_l \sum_n [(ED_{l,n,y} + TL_{l,n,y}) \times (1 - \eta_{l,n,y}^c) / \eta_{l,n,y}^c] \quad (3)$$

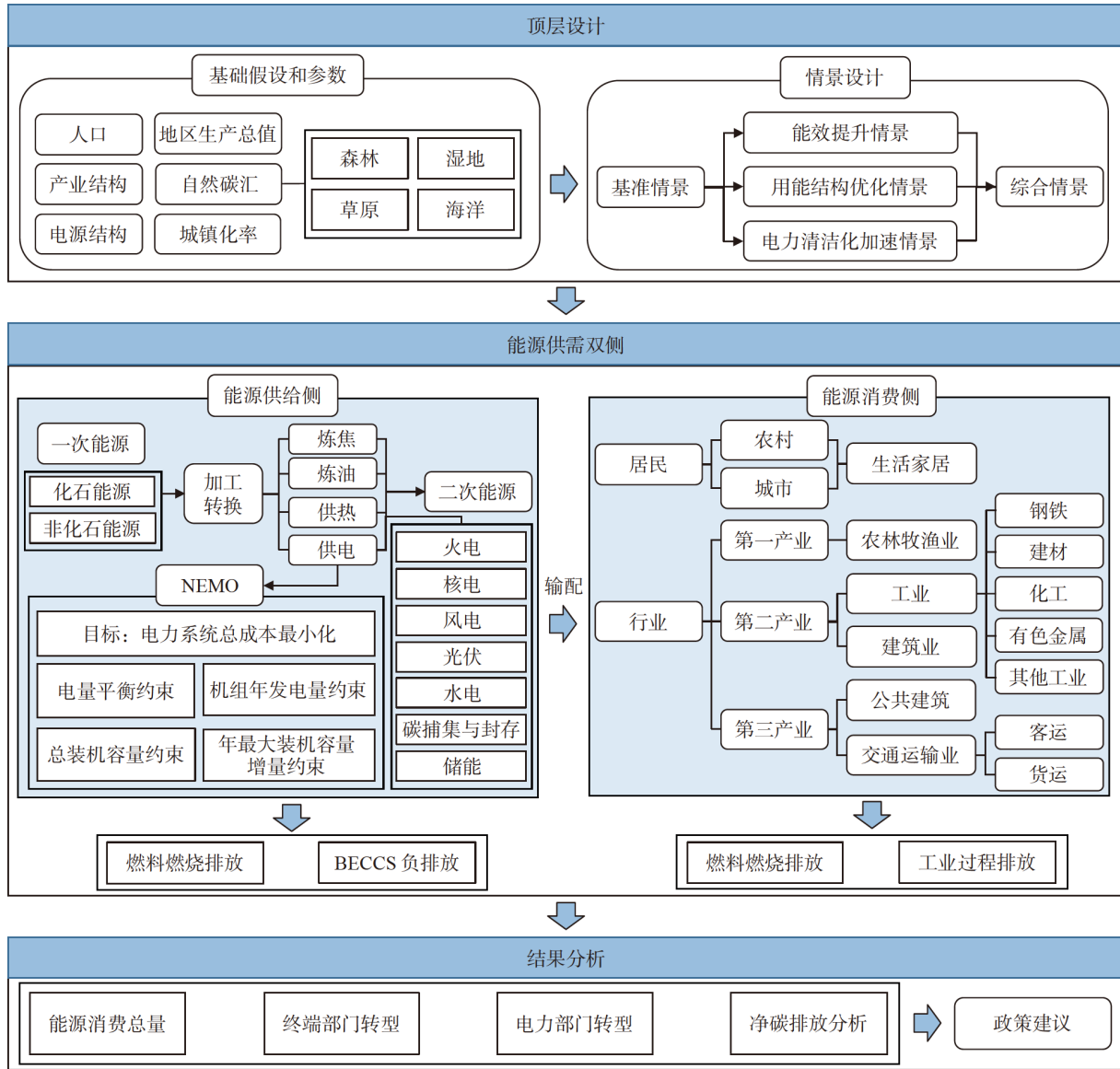


图1 模型框架
Fig.1 Model framework

$$E_y = FE_y + TL_y + CL_y \quad (4)$$

式中: TL_y 为第 y 年能源输配过程中的总损失量; l 为加工转换部门; $ED_{l,n,y}$ 为经过第 y 年第 l 个加工转换部门后得到的第 n 种终端能源量; η^T 为输配效率; CL_y 为第 y 年能源加工转换过程中的损失量; $TL_{l,n,y}$ 为第 y 年第 l 个加工转换部门的第 n 种终端能源在能源输配过程中的损失量; η^c 为加工转换效率; E_y 为第 y 年能源消费总量。

1.2.2 NEMO 电源优化模块

(1) 目标函数

模型的目标函数为规划期内累计的电力系统总成本最小。电力系统总成本包括各发电机组的投资成本、固定成本、可变运维成本以及火电和核电机组的燃料成本。

$$C = \min \sum_k \sum_y [(B_{k,y} + F_{k,y} + V_{k,y} + U_{k,y}) / (1 + \lambda)^{y-y_0}] \quad (5)$$

式中: C 为规划期内电力系统的累计总系统成本; k

为发电技术类型； B 为投资成本； F 为固定运维成本； V 为可变运维成本； U 为燃料成本； λ 为折现率； y_0 为基准年。

(2) 约束条件

本文设置的主要约束条件如下。

电量平衡约束：电力系统的各机组发电量之和，扣除输电损失后应不小于每年电力需求总量。

$$E_y \leq (1 - \eta_g^T) \times \sum_k \sum_y (Q_{k,y} \times A_{k,y}) \quad (6)$$

式中： η_g^T 为输电损失率； Q 为装机容量； A 为年利用小时数。

机组年发电量约束：考虑到各类机组受运行特性及设备检修、故障等因素影响，其存在机组年运行时间上限，应限制各类机组年度发电量不超过其最高可发电水平。

$$G_{k,y} \leq Q_{k,y} \times \bar{A}_k \quad (7)$$

式中： G 为年发电量； $\bar{A}$ 为最大年利用小时数。

总装机容量约束：考虑到地区资源禀赋、技术发展、建设条件及地方政策中的电力系统规划目标等因素对各机组装机规模的限制，引入最大、最小总装机容量约束。

$$\underline{Q}_{k,y} \leq Q_{k,y} \leq \bar{Q}_{k,y} \quad (8)$$

式中： $\underline{Q}$ 和 $\bar{Q}$ 分别表示最小和最大年总装机容量。

年最大装机容量增量约束：考虑到电源项目建设周期、投资能力、设备供应及并网消纳条件等因素对装机扩张速度的限制，应控制各类机组各年度新增装机容量不超过其允许的最大增量。

$$q_{k,y} \leq \bar{QC}_{k,y} \quad (9)$$

式中： q 为新增装机容量； $\bar{QC}$ 为年最大新增容量限制。

1.2.3 蓝绿碳汇模块

本文从蓝绿自然生态系统和海水养殖系统两个方面全面核算地区自然碳汇能力。

(1) 蓝绿自然生态系统

$$CS_{h,y}^{\text{la}} = \text{CSF}_{h,y} \times S_{h,y} \quad (10)$$

式中： h 为蓝绿自然生态系统土地类型，包括森林、草地、湿地、红树林和滨海盐沼等； $CS_{h,y}^{\text{la}}$ 为第 y 年

第 h 种土地类型的碳汇量； CSF 为固碳因子； S 为土地面积。

(2) 海水养殖系统

大型藻类植物碳汇：

$$CS_y^{\text{ma}} = \sum_i (P_{i,y}^{\text{ma}} \times K_i^{\text{ma}} \times \text{CF}_i^{\text{ma}}) \quad (11)$$

式中： CS^{ma} 为大型藻类植物碳汇量； i 为大型藻类植物类型； P^{ma} 为藻类植物湿重； K^{ma} 为藻类植物湿重与干重转换系数； CF^{ma} 为藻类植物干质量下的含碳比率。

贝类碳汇：

$$CS_y^{\text{sh}} = \sum_j \text{CB}_{j,y}^{\text{sh}} + \text{CZ}_{j,y}^{\text{sh}} \quad (12)$$

$$\text{CB}_{j,y}^{\text{sh}} = P_{j,y}^{\text{sh}} \times K_j^{\text{sh}} \times R_j^{\text{sh1}} \times \text{CF}_j^{\text{sh1}} \quad (13)$$

$$\text{CZ}_{j,y}^{\text{sh}} = P_{j,y}^{\text{sh}} \times K_j^{\text{sh}} \times R_j^{\text{sh2}} \times \text{CF}_j^{\text{sh2}} \quad (14)$$

式中： CS^{sh} 为贝类碳汇量； j 为贝类类型； CB^{sh} 为贝类贝壳固碳量； CZ^{sh} 为贝类软体组织固碳量； P^{sh} 为贝类的湿重； K^{sh} 为贝类湿重与干重转换系数； R^{sh1} 和 R^{sh2} 分别为贝类干重状态下贝壳和软体组织干质量占比； CF^{sh1} 和 CF^{sh2} 分别为贝类贝壳和软体组织干质量下的含碳比率。

(3) 自然碳汇总量

$$CS_y^{\text{T}} = \sum_h \text{CS}_{h,y}^{\text{la}} + \text{CS}_y^{\text{ma}} + \text{CS}_y^{\text{sh}} \quad (15)$$

式中： CS_y^{T} 为自然碳汇总量。

1.2.4 净碳排放模块

(1) 终端部门碳排放

终端部门碳排放包含燃料燃烧排放和工业过程排放两部分。其中，用于能源目的的生物质或生物质基产品的碳排放量，不计入能源部门总排放量^[28]。水泥生产作为碳排放极为密集的工业部门之一，其过程相关碳排放量相当于全球化石燃料碳排放量的4%^[29]，同时水泥生产过程碳排放量占中国工业过程碳排放量的70%以上，是中国工业过程碳排放的最主要来源^[30]。因此，本文在核算工业过程碳排放量时，纳入水泥生产的工业过程碳排放量。

$$\text{CE}_y^{\text{IF}} = \sum_m \sum_n \text{AL}_{m,n,y} \times \text{EI}_{m,n,y} \times \text{EF}_{m,n,y} \quad (16)$$

$$\text{CE}_y^{\text{IP}} = \sum_m \sum_n \text{AL}_{m,n,y}^{\text{c}} \times \text{EF}_{m,n,y}^{\text{c}} \quad (17)$$

$$CE_y^I = CE_y^{IF} + CE_y^{IP} \quad (18)$$

式中： CE_y^{IF} 为燃料燃烧造成的碳排放量； EF 为燃料对应的排放因子，参照政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）发布的《IPCC国家温室气体排放清单指南》设定； CE_y^{IP} 为工业过程中的碳排放量； AL^c 为水泥年产量； EF^c 为水泥工业过程排放因子，根据多尺度排放清单模型的中国碳排放数据库^[31-33]设定； CE^I 为终端部门碳排放量。

（2）电力部门净碳排放

电力部门净碳排放包含燃料燃烧排放和BECCS负排放两部分。

$$CE_y^G = \sum_k CE_{k,y}^G \quad (19)$$

$$CE_{k,y}^G = \left[G_{k,y} \times EF_{n_k,y} \times (1 - \eta_{k,y}^{ccs}) \right] / \eta_{g,n_k,y}^c \quad (20)$$

式中： CE_y^G 为第 y 年电力部门净碳排放量； $CE_{k,y}^G$ 为第 y 年第 k 类发电技术类型机组的碳排放量； n_k 为第 k 类机组对应的燃料类型； $EF_{n_k,y}$ 为第 y 年第 n_k 类燃料对应的排放因子； η^{ccs} 为碳捕集率； $\eta_{g,n_k,y}^c$ 为第 n_k 类燃料在电力部门的转换效率。

（3）地区净碳排放

地区净碳排放 NCE_y 包含终端部门碳排放、电力部门净碳排放和自然碳汇的碳移除3个部分。

$$NCE_y = CE_y^I + CE_y^G + CS_y^T \quad (21)$$

当地区净碳排放量为0时，表明该地区达成碳中和目标。

$$NCE_y = 0 \quad (22)$$

2 情景设计与结果分析

福建省地处中国东南沿海，是中国最早实行改革开放政策的地区之一，也是海峡西岸经济区的核心^[34]。当前，福建省高能耗、高碳行业占比偏高，制造业内生增长及石化产业发展加快，能源消费呈刚性增长趋势。要实现碳达峰目标，福建省面临严峻挑战^[35]。福建省能源消费增长与外来能源依赖并存，具备海上风电与核电等清洁能源禀赋，具有构

建新型能源系统的良好基础与迫切需求。从能源供需双侧看，福建省供需双侧协同转型路径特征突出，具有良好的代表性。此外，福建省拥有3 752 km海岸线，海域面积达13.6万平方千米，海洋养殖产量居全国前列，大型藻类和贝类养殖基础较好，为开展蓝碳核算及评估海洋碳汇增汇潜力提供了重要支撑。因此，本文选取福建省作为省域中长期能源电力转型模型的验证对象，以全面检验模型在驱动机制、技术路径与政策响应等方面的适应性与有效性。

2.1 情景设计与关键参数

2.1.1 情景设计

能源消费的预测受诸多因素的影响。为考察福建省未来的能源消费和碳排放变化情况，本文设置1个基准情景和4个政策情景，其中政策情景包括用能结构优化情景、能效提升情景、电力清洁化加速情景和综合情景，系统评估供需双侧转型策略对各行业能源消费演变和碳减排效果的影响，为福建省中长期能源电力低碳转型提供决策依据。各情景的具体描述及设定依据如表1所示。

相对于基准情景，以下3个单一政策情景分别仅改变对应的政策变量。对于用能结构优化政策，以需求侧分部门电气化率下限为政策目标约束并考虑工业部门的CCUS技术进步；对于能效提升政策，提升需求侧各部门单位活动水平能耗强度下降比例；对于电力清洁化加速政策，供给侧火电机组将提前10年退役并加速火电机组的超低碳排放改造。

2.1.2 数据来源及设置

本文以2020年为基期，以2021—2060年为预测期，覆盖福建省终端能源消费、输送以及相应的能源加工转换部门，形成一个闭合和平衡的能源系统。基础假设和参数主要包括宏观社会经济参数、电源侧参数、情景参数和蓝绿碳汇参数。本文假设各情景下的宏观社会经济参数均保持同一增速。

（1）宏观社会经济参数

宏观参数包括人口、地区生产总值（Gross Domestic Product, GDP）增长率、城镇化率。人口和GDP数据参考《福建省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《福建省

表1 情景设置
Table 1 Scenario setting

情景分类	情景定位	减排措施	政策依据
基准情景	延续2020年以前福建省的政策措施与力度，能源需求侧与供给侧均正常转型	(1) 需求侧加快发展先进制造业、推动服务业比重稳步上升，带动单位GDP能源消耗持续降低，助力2060年终端电气化率提升至50%以上 ^[9] (2) 供给侧2030年后禁止煤电新增装机，除预留的火电机组外，其余机组在2040—2060年分阶段退役，2045年起对预留火电机组进行碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)改造	《福建省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》
用能结构优化情景	在基准情景基础上，实施需求侧能源替代强化政策	(1) 加速用能结构优化：重点控制化石能源消费，提高非化石能源消费占比；拓宽电能替代领域，推进终端用能以电代煤、以电代油、以电代气等新型用能方式；保证2060年终端电气化率在70%以上 ^[6,36] (2) 重点碳排放行业部署CCUS技术：到2030年，钢铁、水泥行业的CCUS技术取得突破应用 ^[15-16] (3) 其余政策力度同基准情景	《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《福建省工业领域碳达峰实施方案》
能效提升情景	在基准情景基础上，实施需求侧节能降耗强化政策	(1) 促进能源利用效率提升：将节能贯穿经济社会发展全过程和各领域，并以钢铁、有色金属、建材、石化化工等行业为重点，组织实施节能降碳改造升级行动 (2) 其余政策力度同基准情景	《福建省工业领域碳达峰实施方案》《福建省钢铁行业碳达峰实施方案》《福建省有色金属行业碳达峰实施方案》《福建省建材行业碳达峰实施方案》《福建省石化化工行业碳达峰实施方案》
电力清洁化加速情景	在基准情景基础上，实施供给侧电力低碳加速政策	(1) 火电机组提前退役：2030年后禁止煤电新增装机，除预留的火电机组外，其余机组在2030—2050年分阶段退役 ^[9] (2) 加速火电机组超低排放改造：2035年对预留火电机组进行CCS改造 ^[6] (3) 其余政策力度同基准情景	《“十四五”现代能源体系规划》《福建省“十四五”能源发展专项规划》
综合情景	统筹实施终端能源清洁化、重点部门能效提升和电力供给清洁化加速等减排政策，考虑能源需求侧和供给侧政策协同降碳潜力		综合考虑以上政策

“双碳”目标与行动路线图》^[35]。城镇化率参考《福建省新型城镇化规划（2021—2035年）》和文献^[7]，设置2025年为71.5%，2035年为78.0%，2060年为85.0%。

(2) 电源侧参数

电源侧基准年各电源技术装机容量与发电量数据来源于《电力工业统计资料汇编2020》，各电源经济技术参数及资源禀赋数据来源于文献^[20,24,37-38]、《中国可再生能源发展报告2020》、国家发展改革委价格监测中心与卓创资讯联合发布的中国电煤价格

指数^②。福建省电网负荷曲线根据国家发展改革委和国家能源局发布的各省级电网典型电力负荷曲线^③进行整合，风光出力曲线来源于文献^[19]。基准年电源技术特征参数如附表1^④所示。

(3) 情景参数

情景参数包括活动水平、能耗强度和能源结构。其中，活动水平利用增长率法对历史数据进行计算得到，历史数据来源于《福建统计年鉴》（2015—2024年），本文针对福建省钢铁、有色金属、建材、化工等重点高耗能行业设置活动水平的需求峰值年

② 资料来源：<https://www.sci99.com/bigdata/coal>。

③ 资料来源：《关于做好2021年电力中长期合同签订工作的通知》，https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202012t20201202_1252095.html?code=&state=123。

④ 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录。

份。参考文献[6,39]和重点行业工作方案^⑤，本文设置福建省钢铁行业的钢材需求和有色金属行业中的电解铝行业产量在2025年达峰；铜冶炼行业则继续保持增速并逐步放缓；建材行业中的水泥和平板玻璃需求量已过快速增长期，当前基本达峰并处于震荡期；化工行业产量设置在2050年达峰；能耗强度和能源结构历史数据来源于《中国能源统计年鉴》、中国碳核算数据库^[30,40-43]以及《工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023年版）》，并参考绿色创新发展研究院报告^[44]，将福建省能源平衡表调整为具有国际可比性的能源平衡表。家用电器平均功率和年利用小时数据来源于《2023能源数据》。政策情景关键技术参数设置如附表2^⑥所示。

（4）蓝绿碳汇参数

森林面积数据依据《福建省国土绿化规划（2022—2030年）》和《福建省国土空间规划（2021—2035年）》确定；草地和湿地面积数据参考《福建省第三次国土调查主要数据公报》《中国林业和草原统计年鉴2020》《福建省湿地保护规划（2024—2030年）》确定。

蓝碳核算可分为自然生态系统和海水养殖系统两类。其中，自然生态系统主要包括红树林、滨海盐沼和海草床，海水养殖系统主要包括大型藻类和贝类。福建省是中国红树林天然生长的北缘，省内分布有大面积的互花米草盐沼，是红树林和盐沼湿地最典型的交错区^[45]。同时，文献[23]表明福建省几乎不具有海草床生态系统。因此，本文依据《海洋碳汇核算方法》（HY/T 0349—2022）和《中国蓝碳蓝皮书2025》核算福建省的红树林、滨海盐沼、大型藻类和贝类的年碳汇量。红树林和滨海盐沼面积数据来源于《福建省第三次国土调查主要数据公报》《福建省湿地保护规划（2024—2030年）》和文献[46]。大型藻类和贝类的海洋养殖产量数据来源于《中国渔业统计年鉴2021》。大型藻类和贝类碳汇能力核算相关系数参考《海洋碳汇核算方法》（HY/T 0349—2022）中附录A。

森林面积按照福建省国土绿化规划和国土空间规划目标趋势进行参数设置。草地、湿地、红树林和滨海盐沼面积变化趋势和固碳系数参考文献[24,47]，其在2020—2060年以0.5%年均增长率实现增长。大型藻类和贝类的碳汇量变化趋势参考《中国蓝碳蓝皮书2025》^[48]。碳汇参数设置如附表3^⑥所示。

2.2 不同情景下能源消费对比分析

2.2.1 能源消费总量对比分析

基于省域中长期能源电力转型模型，计算得到预测期内福建省能源消费总量及行业结构变化趋势，分别如图2、图3所示。福建省能源消费总量在各情景下均呈阶段性增长趋势，但不同政策对能源消费总量和能源结构的影响存在显著差异。在基准情景下，2060年能源消费总量将达到2.96亿吨标准煤，年均增速为1.8%，其中，非化石能源占比为70.25%。在能效提升情景和电力清洁化加速情景下，因终端能源结构与基准情景相同，2060年非化石能源占比都在70.00%左右。其中，能效提升政策在中期阶段对能源消费的抑制作用最为显著，但随着基准情景能源强度逐步接近能效标杆水平，二者差距逐步缩小。在电力清洁化加速情景下，火电机组因提前配置CCS技术而存在效率损失，其自2035年起能源消费

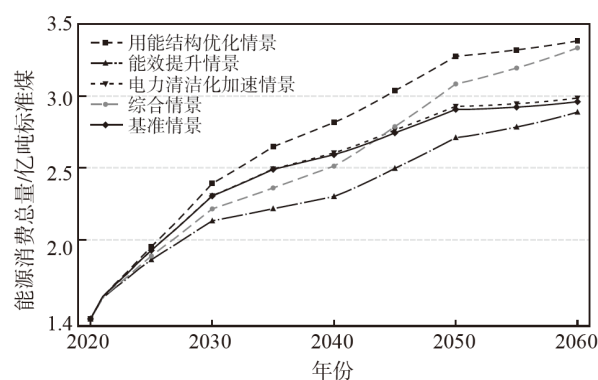


图2 能源消费总量

Fig.2 Total energy consumption

⑤ 资料来源：《有色金属行业稳增长工作方案（2025—2026年）》，<https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202509/P020250928687316920090.pdf>；《建材行业稳增长工作方案（2025—2026年）》，https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202509/content_7042112.htm。

⑥ 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录。

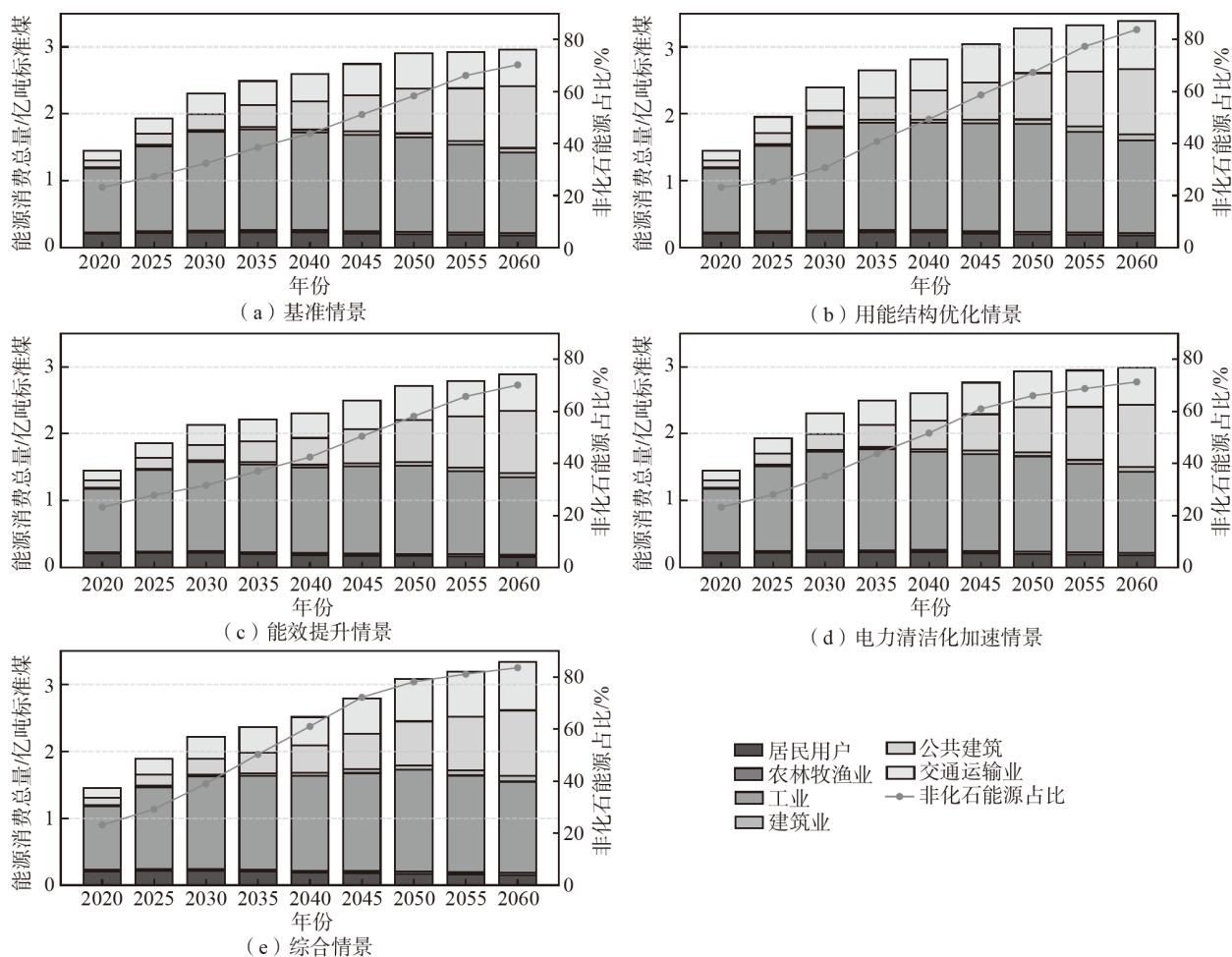


图3 各情景分行业能源消费总量

Fig.3 Total energy consumption by sector under each scenario

总量略高于基准情景。

因用能结构优化情景与综合情景施行更强力度的清洁能源替代政策，2060年非化石能源占比提升至80.00%以上，满足福建省碳中和能源结构目标。随着终端电气化占比提高，发电环节存在转换损失，用能结构优化政策的实施将提高能源消费总量，用能结构优化情景下的能源消费总量为5种情景的最高水平。在综合情景下，2060年能源消费总量将达到3.33亿吨标准煤，其能源消费因多政策协同的叠加调控作用，在2043年后超过基准情景并与能效提升情景趋势类似，逐渐接近用能结构优化情景。因此，能源转型不应仅以能源消费总量下降为目标，随着能源消费与经济增长逐步“脱钩”，更应关注非化石能源占比提升、终端电气化推进及部门用能结构优化。

从行业结构看（图3），工业部门在各情景中始终是能源消费的主体，其占比呈下降趋势但仍居于首位。公共建筑和交通运输业的能源消费总量在中后期逐步上升，各情景2060年第三产业能源消费占比达50.00%，能源消费重心逐步由第二产业向第三产业转移，这表明未来服务业扩张和交通需求增长将成为影响福建省能源消费总量演变的重要因素。

2.2.2 终端部门能源消费对比分析

（1）终端部门能源消费

图4为预测期内福建省终端部门能源消费量及能源结构。福建省终端部门能源消费量在预测期内呈现前期快速增长、中后期趋于平稳的演化特征（见图4（a）），这表明终端用能增长具有长期惯性。在基准情景、用能结构优化情景和电力清洁化加速情

景下，终端部门能源消费量预测趋势相同，呈现“倒U型”增长模式，且均在2049年达到峰值。在能效提升情景和综合情景下，终端部门能源消费量则在2049年后进入平稳期。由于经济增长与能源消费之间存在高度的协整关系^[49]，福建省终端部门的能源消费量在2050年之前呈现快速增长，其增加趋势在短期内无法改变。

从能源结构看，电能正逐步成为终端部门主导能源，但其转型速度取决于政策力度。在强政策的驱动下，福建省可在2060年实现以电能为主的清洁终端能源结构。在基准情景（能效提升情景和电力清洁化加速情景结构趋势同基准情景）下，电能占

比从2020年的30.21%上升至2060年的56.21%；在综合情景（用能结构优化情景结构趋势同综合情景）下，电能占比提升至75.06%，较基准情景提升了18.85个百分点，化石能源占比仅为16.71%。当终端部门需求达峰后，能源结构演化路径仍出现显著分化，因此终端部门制定转型政策时应兼顾总量控制与结构优化，从而实现深度低碳转型。

（2）终端重点部门能源消费

图5为预测期内福建省工业和交通运输部门能源消费量。交通运输部门的能源消费量在各情景下均在2030年后增速放缓，并于2050年进入平台期。工业部门在非能效提升政策情景下，能源消费量在

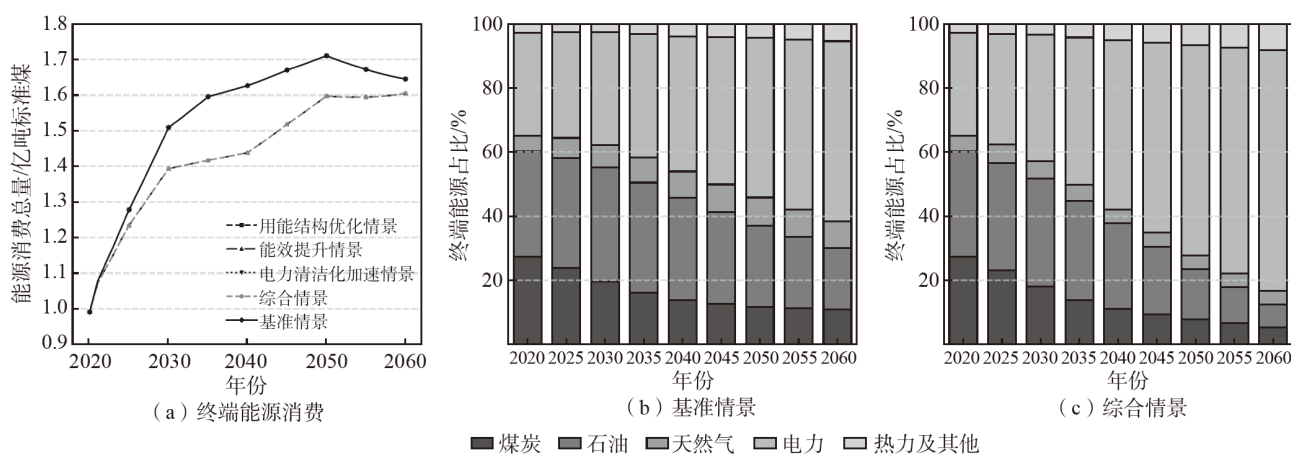


图4 终端部门能源消费量及能源结构

Fig.4 Final sector energy consumption and energy structure

注：因本文只有能效提升政策会降低能源消费总量，综合情景统筹实施了三类减排政策，所以只有能效提升情景和综合情景的能源消费总量会一起降低从而使得图片中线条重合。图5同。

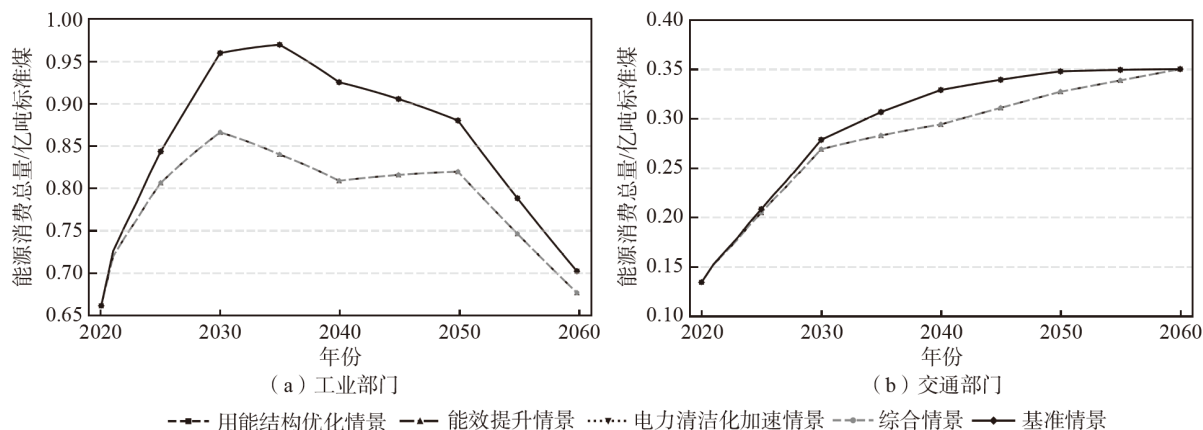


图5 工业和交通运输部门能源消费量

Fig.5 Energy consumption of the industry and transportation sectors

2035年达峰,然后持续下降;在能效提升政策下,工业部门聚焦钢铁、有色金属、建材、石化化工等重点行业,对标能效标杆水平,促进行业整体能效水平提升,其能源消费量在2030年达峰后降至2060年的0.67亿吨标准煤。交通运输部门优化交通运输结构,大力推进大宗货物及集装箱中长距离运输“公转水”“公转铁”以及多式联运高质量发展,2060年交通运输部门能源消费量为0.34亿吨标准煤,随着后期基准情景能源强度逐步接近能效标杆水平,二者差距逐步缩小。

图6为预测期内福建省工业和交通运输部门能源结构。在基准情景下,工业部门在2030年、2060年电能占终端能源消费的比例分别为40.71%、50.61%;交通运输部门在2030年、2060年电能占终端能源消费的比例分别为5.78%、39.63%。在综合情景下,工

业部门以低碳、无碳、负碳技术为重点,促进关键耗能设备绿色升级和电能替代,2030年和2060年电能占比分别上升至46.68%和70.62%,较基准情景分别增加5.97个百分点和20.01个百分点。交通运输部门提升车站、机场、港口码头设施绿色化、智能化水平,大力推广汽车和公共服务车辆电动替代,航运、航空领域低碳清洁能源装备研发,其2030年和2060年电能占比分别上升至13.98%和73.52%,较基准情景分别增加8.20个百分点和33.89个百分点。

2.3 不同情景下电源结构及发电量对比分析

图7、图8分别为预测期内电源装机容量和发电量。各情景下,装机容量与发电量均随电力负荷增长而持续攀升,但电源结构因政策导向不同而呈现显著差异。在基准情景、用能结构优化情景和能效

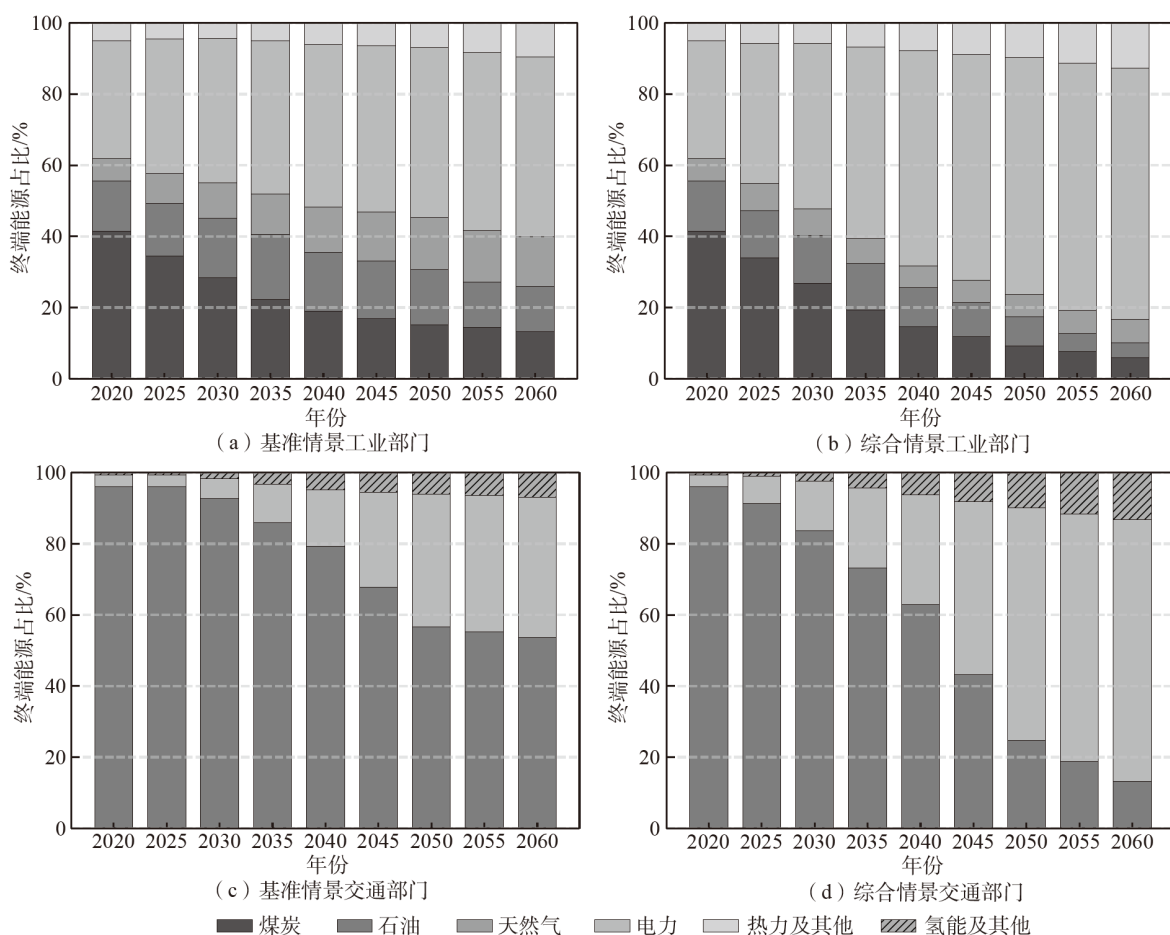


图6 工业和交通运输部门能源结构

Fig.6 Energy structure of the industry and transportation sectors

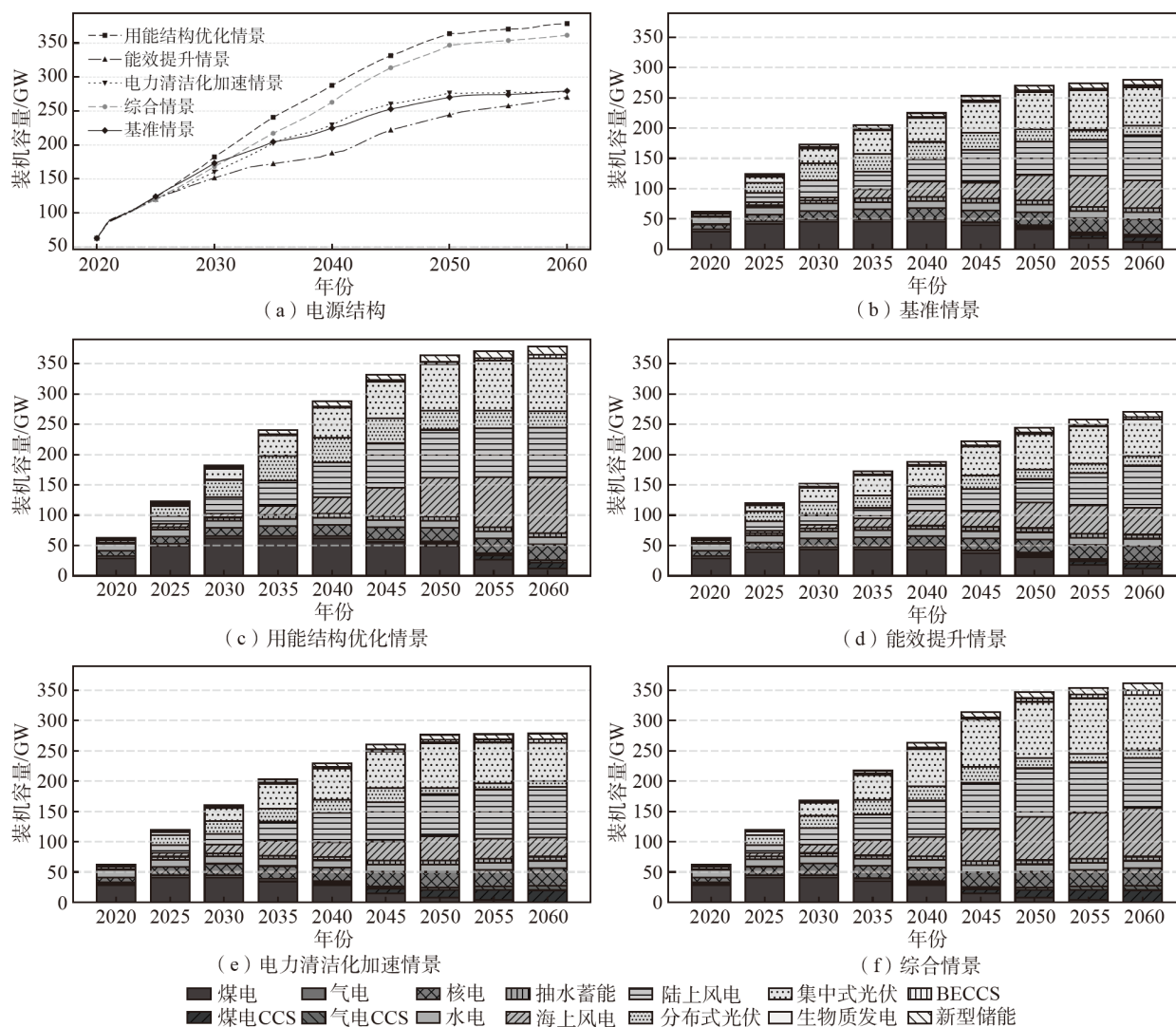


图7 电源装机容量

Fig.7 Installed capacity by source

提升情景下，电源装机容量和发电量差异主要由需求侧电力负荷变化驱动。电力系统转型前期主要依赖火电维持供需平衡，对比电力清洁化加速情景和基准情景，电力清洁化加速情景下，核电装机的提前部署有助于减轻电力系统前期转型压力，但伴随中期燃煤机组提前退役，且风光装机的年利用小时数低于火电，系统总装机容量高于基准情景。随着基准情景电源结构逐步清洁化，两者装机容量差距逐渐缩小。在综合情景下，燃煤机组发电量在2025年达峰并于2030年开始退役。为避免常规火电机组资产搁浅成本过高，综合情景设定自2035年起加速部署CCS技术，煤电、气电和生物质的CCS机组发电

量占比较基准情景分别提高2.31%、0.77%和1.15%。

依据福建省沿海的地理优势，清洁能源发电装机容量稳步上升。在基准情景下，核电装机容量从8.71 GW（2020年）增长至25.47 GW（2060年）。同时，基于省内风光资源禀赋和机组经济技术特性，风光装机容量呈现较火电和核电更为显著的规模化增长。对比图8（b）、图8（c）可知，随着终端部门电气化进入“深水区”，海上风电逐渐成为关键支撑性电源。随着技术进步，海上风电的投资和运维成本逐渐降低，其装机容量占比持续提升。在用能结构优化情景下，海上风电装机容量占比从2040年的9.40%上升至2060年的24.30%，在2060年较电气化程

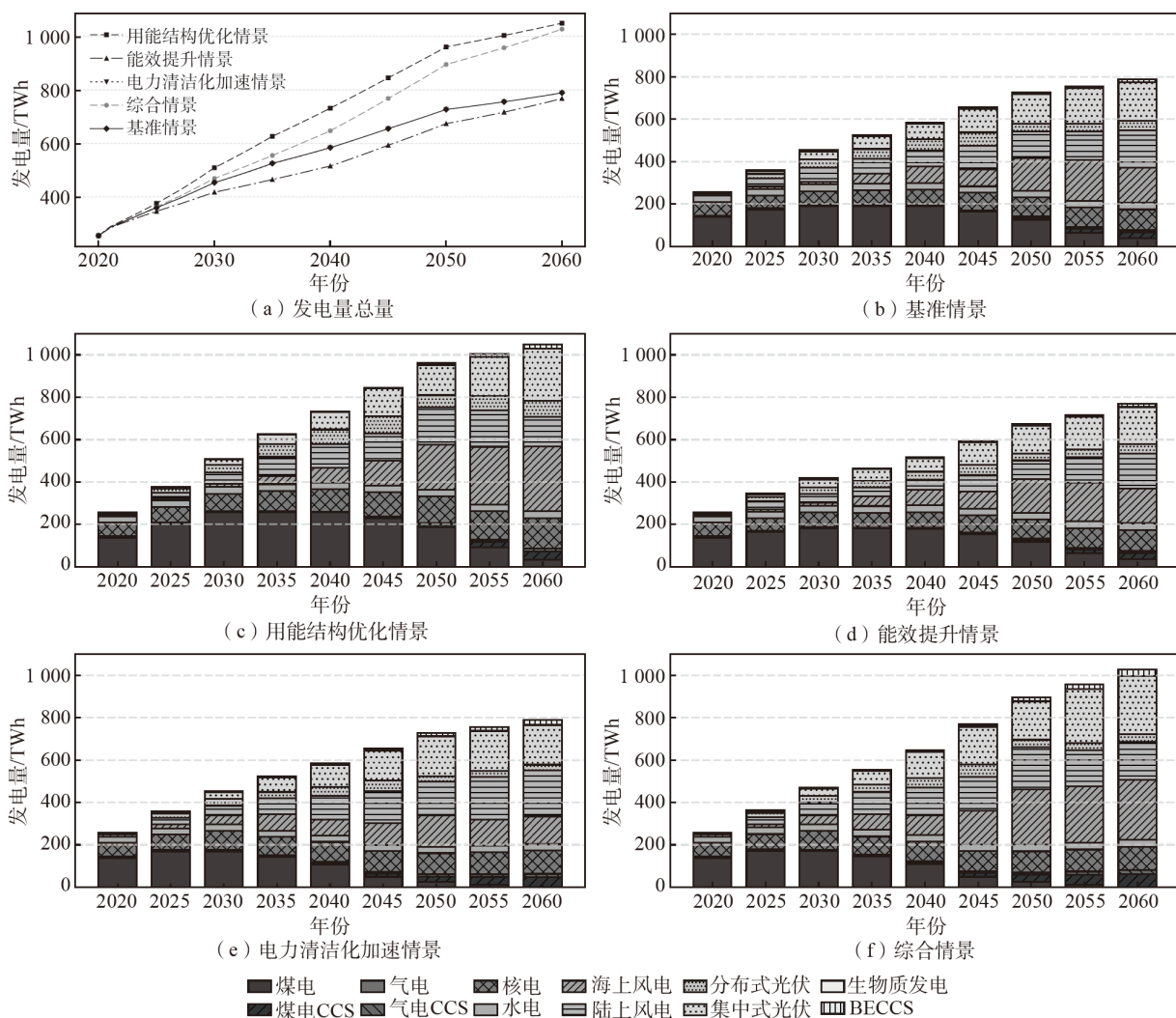


图8 电源发电量

Fig.8 Electricity by source

注：因电力清洁化加速情景为供给侧低碳转型政策，未影响终端电力需求，故发电量曲线与基准情景保持一致。

度较弱的基准情景提高了7.94个百分点，并超过集中式光伏和陆上风电装机容量占比（分别为23.06%和21.66%）。需要注意的是，当单独实施用能结构优化政策时，前中期清洁能源发电量占比低于电力清洁化加速情景甚至低于基准情景，较电力清洁化加速情景和基准情景在2030年分别降低了12.81个百分点和8.07个百分点，在2045年分别降低了16.49个百分点和2.15个百分点。

各情景下，储能装机容量的扩张趋势一致。抽水蓄能受限于资源禀赋，容量扩张有限；新型储能则在中后期迅速发展，其规模主要受电力负荷和清洁装机规模影响。2060年，各情景下的储能总装机

容量为15.66~20.45 GW。其中，综合情景装机容量为18.66 GW，新型储能占比为63.56%，主要用于满足新能源及核电建成投产后的电网调峰、调频需求，提升可再生能源消纳能力。

综上所述，用能结构优化政策在转型前中期提高总装机容量和火电装机规模，使得该情景下前中期清洁能源装机容量和发电量占比均低于电力清洁化加速情景，甚至低于基准情景；能效政策则在前中期通过抑制电力负荷增长，有效降低扩容压力；电力清洁化加速政策通过改善电源结构影响电源装机容量，在能源转型的全预测期内有效降低电力系统的碳排放强度。3种转型政策在电力部门转型过程

中高度协同,在综合情景下,转型政策的共同实施能在保证重点部门电气化加速转型的同时,降低前中期电力系统的扩建压力和全预测期内的碳排放强度。

2.4 不同情景下碳排放对比分析

2.4.1 终端部门碳排放量

图9为预测期内终端部门碳排放总量和行业碳排放结构。用能结构优化政策和能效提升政策对终端部门碳减排的协同作用可提前碳达峰的时间点,且用能结构优化政策的碳减排力度随转型进程持续增大。综合情景的终端部门碳排放量在所有情景中最少,其在2026年达峰,峰值为161.62 Mt,后持续降至2060年的55.02 Mt。基准情景、能效提升情景和用能结构优化情景均在2030年达峰,峰值分别为189.65 Mt、176.65 Mt和171.01 Mt,用能结构优化政策在终端部门的碳减排贡献始终高于能效提升政策,且随着转型进程的推进而增加。

各情景下,工业部门均是最大的累计碳排放源。在综合情景下,工业部门碳排放量占终端部门累计碳排放量的61.03%,其中工业过程累计碳排放量占工业部门碳排放量的29.10%;其次是交通运输部门,占比为27.69%。对比图9(b)、图9(c)可知,2040年前交通运输部门较工业部门电气化进程较为缓慢,2040年后城际客运交通和货运交通电气化开始重点发力,带动整体交通运输部门电气化水平快速增

长^[6],因此综合情景下工业部门2040—2050年碳排放贡献呈增长趋势。

2.4.2 电力部门净碳排放量

图10为预测期内电力部门净碳排放量,电力清洁化加速政策对电力部门的脱碳最为有效,火电提前退役以及火电CCS改造可以助力电力部门提前实现碳达峰并达到碳中和。由图10(a)可知,在基准情景、用能结构优化情景和能效提升情景下,电力部门净碳排放量在2030年达峰,但在BECCS负排放帮助下仍未能实现净零排放。用能结构优化政策将对电力部门的碳减排起负作用,这是因为单独实施此政策,在前中期会促使火电装机容量扩张以满足电力系统的电力电量平衡。而能效提升政策和电力清洁化加速政策可以抑制电力负荷快速增长带来的碳减排负作用问题。2030年,能效提升情景净碳排放量为用能结构优化情景净碳排放量的71.00%,电力清洁化加速情景则低至66.59%。相较于能效提升政策,电力清洁化加速政策对电力部门的碳减排起到决定性作用。在电力清洁化加速情景和综合情景下,电力部门净碳排放量在2025年达峰,并分别在2052年和2051年实现负排放;到2060年,其负排放量可达20.96 Mt和27.29 Mt。

2.4.3 福建省净碳排放量

图11为预测期内福建省净碳排放量。所有情景均满足净碳排放量在2030年左右达峰,其中综合情景在2025年达峰;但只有用能结构优化情景和综合情景能够在2060年前实现碳中和。

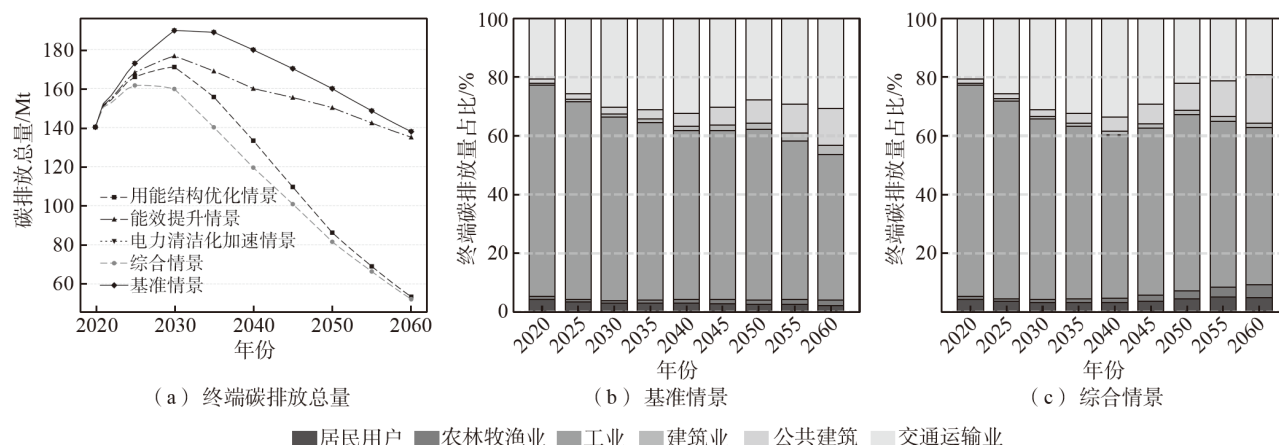


图9 终端部门碳排放总量和行业碳排放结构

Fig.9 Total carbon emissions and sectoral carbon emission structure of final sectors

注:因电力清洁化加速情景为供给侧低碳转型政策,未影响终端部门碳排放,故终端部门碳排放曲线与基准情景保持一致。

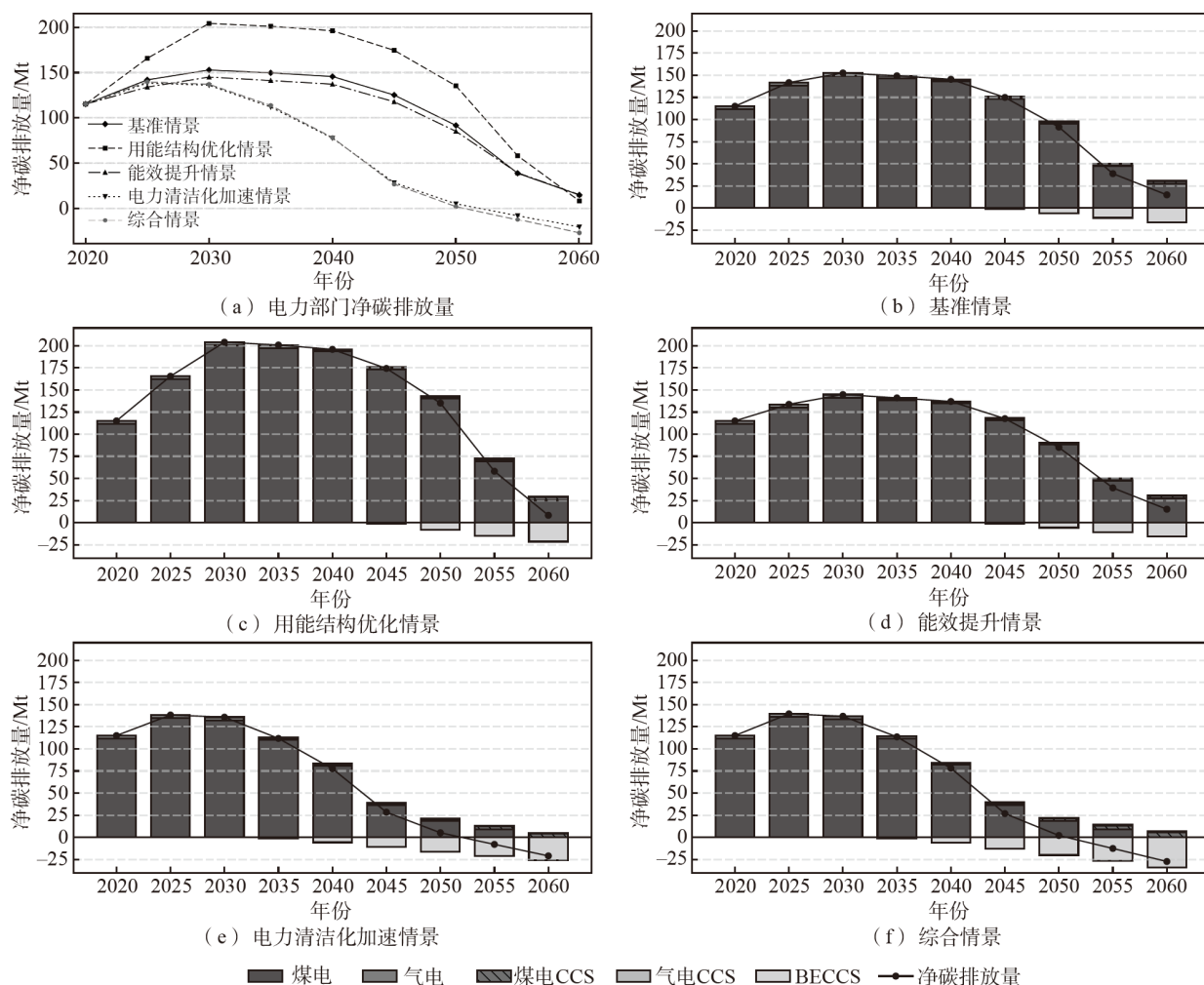


图10 电力部门净碳排放量

Fig.10 Net carbon emissions of the power sector

各政策在福建省净碳排放路径中的力度和作用时段并不相同，且实施单一的减排政策具有显著局限性。由图11(a)可知，2020—2031年，能效提升政策的碳减排贡献最高；2031—2053年，电力清洁化加速政策的碳减排贡献最高。两个情景分别因能效提升政策后期碳减排贡献乏力、终端部门碳排放量过大，未能在2060年前实现碳中和；用能结构优化政策虽能在2060年前实现碳中和，但直到2054年，即综合情景实现碳中和之后，其碳减排贡献才超过电力清洁化加速政策，且其累计净碳排放量位居剩余政策情景首位，较电力清洁化加速情景和能效提升情景分别高1 455.97 Mt和242.15 Mt，较基准情景仅降低433.07 Mt。

从累计碳排放的减排贡献来看，政策组合的综合减排效果远超各政策单独实施之和。由表2可知，电力清洁化加速情景是减排贡献最大的单项政策，能够单独实现1 889.04 Mt的减排量，占总减排量的46.30%。能效提升政策对终端部门和电力部门均有减排贡献，体现其跨部门的协同作用特征。在综合情景下，2020—2060年累计净碳排放量显著低于基准情景及各单项政策情景，其在3类单项政策减排量之和的基础上，进一步形成1 082.64 Mt的协同增效减排量，占综合情景总减排量的26.53%，较各政策单独实施之和提升了36.12%，这表明多项政策的组合实施形成了显著的协同效应。

从碳排放端看，相较于基准情景，综合情景中

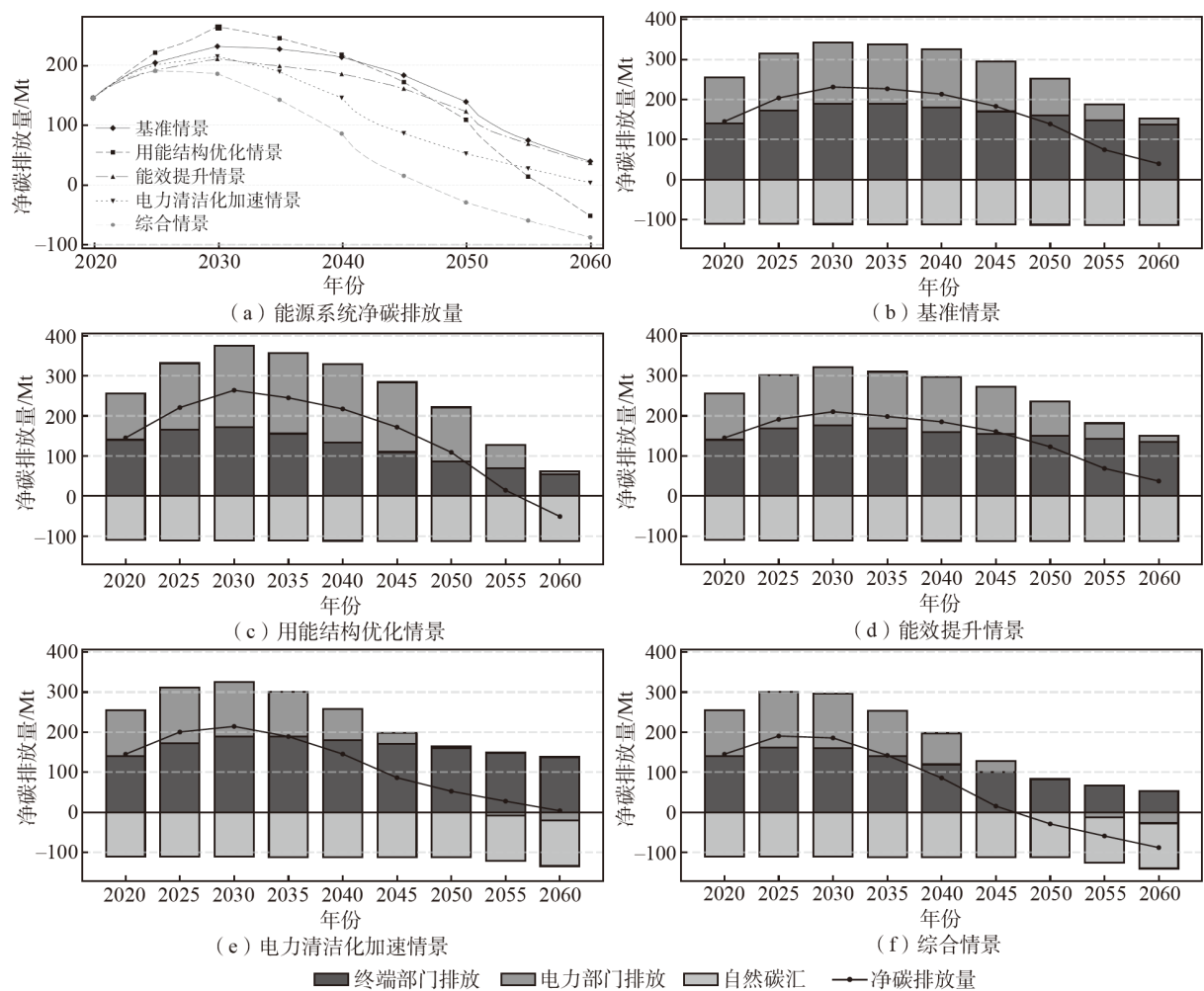


图 11 福建省净碳排放量
Fig.11 Net carbon emissions of Fujian Province

表 2 累计碳排放量 (单位: Mt)
Table 2 Cumulative carbon emissions (unit: Mt)

情景	终端部门累计碳排放量 (含工业过程排放)	电力部门累计碳排放量 (含 BECCS 负排放)	福建省累计净碳排放量 (含自然碳汇)
基准情景	6 895.18	4 590.32	6 899.10
用能结构优化情景	5 048.32	6 004.11	6 466.03
能效提升情景	6 448.37	4 361.90	6 223.88
电力清洁化加速情景	6 895.18	2 701.28	5 010.06
综合情景	4 742.53	2 663.00	2 819.13

电力部门的减排量占总减排量的47.20%，体现了电力部门在省域中长期能源转型进程中的核心地位。从碳汇端看，自然碳汇在预测期内的碳吸收量约为4 586.4 Mt，在综合情景下，自然碳汇抵消了部门累计碳排放量的61.93%，成为实现净碳排放量大幅下

降的关键支撑。其中，蓝碳的增长占总自然碳汇增长的65.56%，是福建省碳汇能力提升的主要贡献源。

2.5 敏感性分析

为检验模型结论对关键参数不确定性的稳健性，

本文以综合情景为基准，采用单因素扰动法对折现率、清洁能源与储能投资成本、蓝碳固碳系数和CCS效率损失率开展敏感性分析，如表3所示。上述参数分别对应长期能源电力系统投资决策、清洁能源与储能技术经济性、自然碳汇核算参数以及CCS机组运行效率，是影响中长期净碳排放路径的重要不确定因素。结果表明，折现率是影响累计净碳排放量的最敏感参数。当折现率由5%提高至7%时，累计净碳排放量上升23.22%，碳中和年份推迟1年；当折现率降至3%时，累计净碳排放量下降7.60%。清洁能源与储能投资成本的影响次之，成本下降20%和上升20%分别使累计净碳排放量变化-2.84%和+2.17%，这说明资金成本和清洁能源技术经济性是影响中长期转型路径的重要不确定因素。相比之下，蓝碳固碳系数和CCS效率损失率对累计净碳排放的影响较小。总体来看，在上述关键参数扰动范围内，综合情景仍能在2060年前实现碳中和，并表现出较低的累计净碳排放水平；供需双侧协同转型路径优于单一政策路径，多项政策组合实施将产生显著的协同降碳作用，这说明本文关于供需双侧协同转型路径的主要结论具有较好的稳健性。

3 结论和政策建议

本文基于LEAP-NEMO模型构建面向能源供需双侧协同转型的省域中长期能源电力转型模型，制定符合区域实际的“双碳”方案。以福建省为例，本

文设置基准情景和4种政策情景，将碳移除、CCUS、化石能源清洁高效利用等技术与能源政策有机结合，系统评估供需双侧低碳政策对能源消费、电力转型及碳排放的影响。主要结论如下：

（1）福建省各情景下终端能源消费量随经济增长而快速上升，2050年后逐步下降，能源消费总量则持续增长，增速呈阶段性放缓。在强政策驱动下，福建省2060年前能够实现以电为主的终端能源结构，非化石能源占比能够达到80.00%以上。在各情景中，工业部门占比呈下降趋势但始终是能源消费总量的主体，工业部门能源消费量预计在2030—2035年达峰；交通运输部门能源消费量则在2030年后增速放缓，并于2050年进入平台期。

（2）各低碳转型政策对电力部门的作用效果与作用时期具有显著差异。用能结构优化政策在转型前中期推高总装机容量和火电装机规模，使得该情景下前中期清洁能源装机容量和发电量占比低于电力清洁化加速情景，甚至低于基准情景；能效提升政策主要在转型前中期通过抑制电力负荷增长，降低电力系统扩容压力；电力清洁化加速情景在能源转型的全过程均能有效降低电力系统的碳排放强度。

（3）终端部门的碳减排主要得益于用能结构优化政策，其减排贡献随转型进程推进而持续增强。在各情景中，工业部门均是累计碳排放量最大的终端部门。在综合情景下，工业部门碳排放量占终端部门累计碳排放量的61.03%，其中工业过程累计碳排放量占工业部门的29.10%；其次是交通运输部门，

表 3 关键参数敏感性分析结果
Table 3 Results of key parameter sensitivity analysis

敏感性情景	参数变化/%	累计净碳排放量 变化/%	碳中和年份变化	电力部门累计 净碳排放量变化/%	政策协同增效量 变化/%
折现率（5%）	-2	-7.60	-	-8.05	+19.79
	+2	+23.22	(+1)	+24.58	-60.46
清洁能源与储能成本	-20	-2.84	-	-3.01	+7.4
	+20	+2.17	(+1)	+2.30	-5.65
蓝碳固碳系数	-20	+0.72	-	-	-1.87
	+20	-0.72	-	-	+1.87
CCS效率损失率（5%）	-2	-0.14	-	-0.14	+0.36
	+2	+0.15	-	+0.16	-0.39

注：变化率均以综合情景为基准计算。正值表示增加，负值表示下降，-表示不变，(+1)表示推迟一年。

占比为27.69%。就电力部门而言,电力清洁化加速政策可使福建省电力系统在2025年前实现碳达峰,并在2050年左右实现碳中和。用能结构优化政策对电力部门的碳减排产生负面影响,而能效提升政策和电力清洁化加速政策则能有效缓解电力负荷增长带来的碳排放压力,其中电力清洁化加速政策对电力部门的碳减排起到决定性作用。

(4)从福建省净碳排放量来看,仅用能结构优化情景和综合情景可以在2060年前实现碳中和。各政策在净碳排放路径中的力度和作用时段存在优势互补,但实施单一的减排政策具有显著局限性,其中电力清洁化加速政策是减排贡献最大的单项政策。自然碳汇是实现净碳排放量下降的关键支撑,海洋碳汇则是福建省碳汇能力提升的核心驱动。3种转型政策在能源转型过程中具有高度的协同作用,低碳转型政策的共同实施能在保证重点部门加速推进电气化的同时,降低预测期内电力系统的扩建压力和碳排放量。敏感性分析进一步表明,上述重要结论在关键参数扰动下仍具有较好的稳健性。其中,折现率和清洁能源与储能投资成本是影响累计净碳排放量及政策协同增效的重要不确定因素。

综上所述,本文提出以下政策建议:

(1)能源需求侧应实施能效提升政策和用能结构优化政策,共同推动终端部门深度降碳。一方面,应聚焦钢铁、有色、建材等高耗能行业,深入开展能效标杆对标达标与关键设备系统节能改造;另一方面,应有序实施终端电能替代,推动工业重点行业稳妥压减化石能源消费比例。福建省等沿海省份,可依托临港工业园区探索绿电直连、绿色氢氨醇一体化产业链耦合应用。同时,推进新能源汽车、电动船舶、港口岸电和充换电基础设施建设,推动运输结构优化调整。

(2)能源供给侧应实施以火电提前退役和低碳改造为核心的电力清洁化加速政策。统筹能源消费总量、电气化进程与清洁电力建设,避免因电力需求超前增长导致对火电的被动依赖。在此基础上,现阶段各地区应坚持推进能源结构优化,并结合当地资源禀赋,做强自身优势清洁能源,持续推进煤电节能降碳和灵活性改造,通过稳定长期投资预期、完善清洁能源和储能支持机制,降低关键经济参数

不确定性对中长期转型路径的扰动。福建省应积极推进核电安全高质量发展,逐步推动海上风电向大型化、深远海化和基地化方向发展,以满足碳中和路径中后期高额电力需求。

(3)地区应不断增强生态系统碳汇支撑能力。福建省等沿海省份应持续夯实森林碳汇基础,积极拓展多元碳汇空间,加强草地、湿地和红树林生态系统保护修复,提升海洋、湿地固碳潜力。同时,依托红树林、滨海盐沼等当地蓝碳资源,健全海洋碳汇核算与评估体系,探索海洋碳汇交易和生态补偿机制,提升自然碳汇对碳中和目标的支撑作用。

参考文献

- [1] International Energy Agency. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [2] Miao A K, Yuan Y, Wu H, et al. Pathway for China's provincial carbon emission peak: A case study of the Jiangsu Province[J]. Energy, 2024, 298: 131417.
- [3] Li S S, Kong W L, Wang Y J, et al. Medium and long-term energy demand forecasts by sectors in China under the goal of "carbon peaking & carbon neutrality": Based on the LEAP-China model[J]. Energy, 2024, 310: 133017.
- [4] Shi C F, Qin G Y, Tan Q L, et al. Simulation of hydrogen transportation development path and carbon emission reduction path based on LEAP model: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Energy Policy, 2024, 194: 114337.
- [5] Zhou Y, Wei T, Chen S Q, et al. Pathways to a more efficient and cleaner energy system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: A system-based simulation during 2015-2035[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105835.
- [6] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 13-26.
- [7] 毛一喆, 张兴平, 张浩楠. 面向碳达峰碳中和的浙江省能源转型路径[J]. 环境科学, 2026, 47(1): 90-101.
- [8] El-Sayed A H A, Khalil A, Yehia M. Modeling alternative scenarios for Egypt 2050 energy mix based on LEAP analysis[J]. Energy, 2023, 266: 126615.
- [9] 檀勤良, 史超凡, 韩健, 等. 基于LEAP-ABM模型的中国电力行业供需双侧结构演化及碳减排路径[J]. 环境科学, 2026, 47(4): 2204-2215.
- [10] Raza M A, Khatri K L, Hussain A. Transition from fossilized to defossilized energy system in Pakistan[J]. Renewable Energy, 2022, 190: 19-29.
- [11] Ming X X, Wang Q, Luo K, et al. An integrated economic, energy, and environmental analysis to optimize evaluation of carbon reduction strategies at the regional level: A case study in Zhejiang, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119742.
- [12] Li L, Li J F, Peng L, et al. Optimal pathway to urban carbon neutrality based on scenario simulation: A case study of Shanghai,

- China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 416:137901.
- [13] Wang R F, Ren C, Liao C P, et al. Sectoral carbon emission prediction and spatial modeling framework: A local climate zone-based case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 114: 105756.
- [14] Chiriboga G, Chamba R, Garcia A, et al. Useful energy is a meaningful approach to building the decarbonization: A case of study of the Ecuadorian transport sector[J]. *Transport Policy*, 2023, 132(C): 76–87.
- [15] Gu Y Q, Pan C C, Liu W J, et al. Pathway to carbon neutrality in the iron and steel industry of China: A LEAP-China-IS model assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2025, 383: 126834.
- [16] Tan C, Yu X, Guan Y R. A technology-driven pathway to net-zero carbon emissions for China's cement industry[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119804.
- [17] Cai L Y, Duan J L, Lu X J, et al. Pathways for electric power industry to achieve carbon emissions peak and carbon neutrality based on LEAP model: A case study of state-owned power generation enterprise in China[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 170: 108334.
- [18] Wang Y, Li H L, Wang Z, et al. Exploring regional carbon emission and power sector transition pathways based on shared socioeconomic pathways: A case study in Sichuan, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 533: 146931.
- [19] 范师嘉, 许光清, 赵庆, 等. 考虑储能的电力系统优化与中国碳中和情景分析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2833–2846.
- [20] 苗若兰. 计及颠覆性能源技术的天津电力低碳转型路径研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [21] Wang X G, Lu Z M, Li T X, et al. Carbon-neutral power system transition pathways for coal-dominant and renewable resource-abundant regions: Inner Mongolia as a case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 285: 117013.
- [22] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 480–491.
- [23] Wang F M, Liu J H, Qin G M, et al. Coastal blue carbon in China as a nature-based solution toward carbon neutrality[J]. *The Innovation*, 2023, 4(5): 100481.
- [24] Zhou W D, Zhuang G Y, Liu L B. Comprehensive assessment of energy supply-side and demand-side coordination on pathways to carbon neutrality of the Yangtze River Delta in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 404: 136904.
- [25] HY/T 0349—2022 海洋碳汇核算方法[S].
- [26] 向爱, 揣小伟, 李家胜. 中国沿海省份蓝碳现状与能力评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1138–1154.
- [27] Piñeiro-Juncal N, Serrano O, de los Santos C B, et al. Blue carbon inventories of Spain and Portugal for their inclusion in national climate mitigation strategies[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2026, 228:119570.
- [28] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [29] Andrew R M. Global CO₂ emissions from cement production[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 195–217.
- [30] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016–2017[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 54.
- [31] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(19): 14095–14111.
- [32] Li M, Liu H, Geng G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: A review[J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834–866.
- [33] Xu R C, Tong D, Xiao Q Y, et al. MEIC-global-CO₂: A new global CO₂ emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(2): 450–465.
- [34] Li X J, Lin C X, Lin M C, et al. Drivers, scenario prediction and policy simulation of the carbon emission system in Fujian Province (China)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140375.
- [35] 福建省“双碳目标与行动路线图”课题组. 福建省双碳目标与行动路线图报告合辑[R]. 北京: 北京大学能源研究院, 2025.
- [36] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. *管理世界*, 2022, 38(1): 35–66.
- [37] Zhu Z H, Zhang D, Zhang X Y, et al. Integrated modeling for the transition pathway of China's power system[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(8): 3699–3717.
- [38] Zhang Y Z, Zhang X P, Lan L H. Robust optimization-based dynamic power generation mix evolution under the carbon-neutral target[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 178: 106103.
- [39] 孙海萍, 李博抒, 王文怡. “双碳”目标下中国化工行业低碳转型路径研究[J]. *现代化工*, 2025, 45(6): 1–8.
- [40] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [41] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997–2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [42] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 742–750.
- [43] Xu J H, Guan Y R, Oldfield J, et al. China carbon emission accounts 2020–2021[J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122837.
- [44] 袁雅婷, 刘莎莎, 谢运生, 等. 江西低碳转型中长期展望: 基于EPS模型构建“双碳”路径[R]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2025.
- [45] 岳亮. 基于土地利用变化的福建省滨海湿地碳汇能力与潜力评估[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [46] Hu Y K, Tian B, Yuan L, et al. Mapping coastal salt marshes in China using time series of Sentinel-1 SAR[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 122–134.
- [47] IPCC. Climate Change 2021–The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [48] 李建平. 中国蓝碳蓝皮书2025[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2025.
- [49] Wang Z H, Zhang H Z, Wang B, et al. Trade-offs between direct emission reduction and intersectoral additional emissions: Evidence from the electrification transition in China's transport sector[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(31): 11389–11400.

Energy and Power Transition Pathways Considering Blue and Green Carbon Sinks Under Supply–Demand Coordination: A Sector-Detailed Modeling Approach Based on LEAP–NEMO

TAN Qinliang^{1,2,5,*}, CHEN Feiyang¹, SHI Chaofan¹, LI Xiaofei¹,
DING Yihong³, DU Yi⁴

1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, Beijing 102206, China;
3. National Institute of Energy Development Strategy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
4. Economic and Technical Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350013, China;
5. Research Center for Beijing Energy Development, Beijing 102206, China

Abstract : Scientifically planning the medium- and long-term energy and power transformation path is crucial for achieving the carbon neutrality goal and mitigating climate change. However, existing studies on energy and power transformation lack systematic modeling of the coordinated transformation of both energy supply and demand, and the carbon sink accounting in coastal areas generally ignores the carbon sequestration capacity of the ocean, making it difficult to accurately predict the trends of regional energy consumption and carbon emissions. To address these gaps, this study uses the LEAP-NEMO model, formed by coupling the low emissions analysis platform (LEAP) and the next energy modeling system for optimization (NEMO), to construct a provincial medium- and long-term energy and power transformation model from the perspective of both energy supply and demand. Using sector-detailed projections of energy and electricity consumption, the model minimizes total power-system cost to optimize a generation expansion plan tailored to regional conditions, while extending conventional green-carbon accounting to incorporate blue-carbon accounting. In addition, it supplements the blue carbon accounting method on the basis of the conventional green carbon accounting. This study conducts a model empirical study using Fujian Province as a case, comprehensively considering the regional resource endowment, industrial structure, and policy demands, and systematically evaluating the impact of the transformation policies on energy consumption, power transformation, and carbon emissions from both the supply and demand sides. The results show that although the effects of energy efficiency improvement, energy-use structure optimization, and accelerated power sector decarbonization policies on both the supply and demand sides are different, and their contributions to carbon emission reduction for each department are also different, the regional net carbon emission path has complementary effects in terms of strength and timing, and has a significant synergistic carbon reduction effect. The cumulative reduction in the integrated scenario is 36.1% higher than the sum of the cumulative reductions achieved by each policy alone; similar to the national-level research, the key to regional energy transformation is still the power sector, and in the comprehensive scenario set in this study, the reduction amount of the power sector accounts for 47.2% of the cumulative reduction within the prediction period; natural carbon sinks are the key support for achieving a significant reduction in net emissions, and in the comprehensive scenario, they offset 61.93% of the cumulative emissions of the departments within the prediction period. Among them, blue carbon is the main contributor to the increase in carbon sinks, and its growth accounts for 65.56% of the total increase in natural carbon sinks.

Key Words : energy transition; LEAP-NEMO model; supply-demand synergy; natural carbon sinks; carbon neutrality