

碳中和导向下中国生物质能消费分析

李峰¹, 张舒涵², 邵天铭^{3,4*}, 庞军⁵

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东省 广州市 510700;

2. 南方电网能源发展研究院, 广东省 广州市 510700;

3. 北京大学长沙计算与数字经济研究院, 湖南省 长沙市 410000;

4. 北京大学工学院, 北京市 海淀区 100871;

5. 中国人民大学生态环境学院, 北京市 海淀区 100872)

Analysis of China's Bioenergy Consumption Under Carbon Neutrality Orientation

LI Feng¹, ZHANG Shuhan², SHAO Tianming^{3,4*}, PANG Jun⁵

(1. Power Grid Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510700, Guangdong Province, China;

2. Energy Development Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510700, Guangdong Province, China;

3. PKU-Changsha Institute for Computing and Digital Economy, Changsha 410000, Hunan Province, China;

4. College of Engineering, Peking University, Haidian District, Beijing 100871, China;

5. School of Ecology & Environment, Renmin University of China, Haidian District, Beijing 100872, China)

Abstract: Bioenergy substitution for fossil fuels is an effective way to reduce carbon emissions, and bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) is a key supporting technology to achieve carbon neutrality. In this study, the Global Change Analysis Model (GCAM), which is localized to be adapted to China's energy system, is used to simulate and analyze the future bioenergy consumption in China under the carbon neutrality orientation by considering the application of bioenergy in various energy sectors in China in detail. The scenario results show that (1) traditional biomass, such as fuel wood, is almost completely phased out after 2030, and modern bioenergy will start to develop rapidly after 2030. In 2060, bioenergy will account for 15% of China's total primary energy consumption; (2) in the future, China's bioenergy will diversify, with power generation and liquid fuel refining as the dominant sectors. In 2060, power generation and refining will represent nearly 80% of China's bioenergy consumption, biopower accounts for 6% of China's total power generation, and biofuel will account for 42% of total liquid fuel production; (3) China's bioenergy needs to be substantially equipped with CCS technology. In 2060, 86% of bioenergy will be equipped with CCS, and BECCS will capture 1.5 Gt CO₂ annually.

Keywords: bioenergy; carbon neutrality; integrated assessment

基金项目: 南方电网公司科技项目 (GDKJXM20222448)。

Science and Technology Foundation of China Southern Power Grid (GDKJXM20222448).

model; BECCS

摘要: 生物质能替代化石燃料是减少碳排放的有效途径, 而生物质能配备碳捕集与封存 (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) 技术更是实现碳中和的关键支撑技术。利用本土化改进中国能源系统的全球变化分析模型 (Global Change Analysis Model, GCAM), 详细考虑生物质能在中国各能源部门的应用, 模拟分析碳中和导向下未来中国生物质能消费。情景结果表明: ①柴等传统生物质在2030年后基本完全退出使用, 现代生物质能在2030年后开始迅速发展, 到2060年, 生物质能占中国一次能源消费15%; ②未来, 中国生物质能呈现发电和炼油为主导的多元化发展趋势, 到2060年, 发电和炼油共占中国生物质能消费近80%, 生物质发电占全国总发电量6%, 生物燃油占全国液体燃料总产量42%; ③中国生物质能需要大幅配备碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术, 到2060年, 86%的生物质在应用过程中配备CCS, BECCS年捕集量达15亿t CO₂。

关键词: 生物质能; 碳中和; 综合评估模型; BECCS

0 引言

《巴黎协定》提出将21世纪末全球平均温升控制在相对工业化前水平2 °C以内, 并争取努力控制在1.5 °C以内^[1]。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (AR6) 指出^[2], 在过去一个多世纪,

化石燃料消费已经导致全球气温相比工业化前水平升高了1.1 °C, 全球需要加快碳减排以应对愈发加剧的全球变暖和极端天气事件^[3]。中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”, 这不仅是对国际社会应对气候变化的庄重承诺, 也是对国内能源碳中和转型的动员令。

生物质能是国际公认的零碳可再生能源, 可通过发电、炼油、制气、制氢、供热或在工业、建筑等终端部门直接燃烧等方式广泛应用。生物质能结合碳捕集与封存(bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)技术可产生负碳排放, 是目前看来唯一的负碳能源技术, 可有效抵消钢铁、重卡、航空等难减排领域的剩余碳排放。IPCC AR6情景数据库显示, 生物质能及BECCS对实现《巴黎协定》气候目标必不可少, 到2050年, 2 °C情景下生物质能占全球一次能源消费10%~31%, 1.5 °C情景下占12%~37%, 21世纪全球通过BECCS分别累计捕集2400亿~4000亿t和2800亿~5900亿t CO₂^[2]。国际能源署(IEA)的2050净零排放情景预计, 2050年生物质能可在全球工业、交通、建筑部门分别提供17%、11%、9%的用能^[4]。文献[5]利用IMAGE(Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect)模型预测, 在2 °C情景下, 2050年生物质能将提供欧洲一次能源消费总量的27%, 形成10亿t CO₂减排量, 为欧洲当年减排贡献40%。生物质能也能为中国低碳转型作出重要贡献。例如, 文献[6]预计通过替代化石能源和部署BECCS, 生物质能2030年具备超过9亿t的CO₂年减排潜力, 到2060年进一步提升至20亿t; 文献[7]基于生命周期评价和情景分析预测, 2050年中国生物质能的减排潜力为16.5亿~58.6亿t CO₂, 对全球碳减排的贡献达6%~21%。近年来, 国家出台的多项政策都涉及到支持生物质行业发展, 如《“十四五”可再生能源发展规划》《“十四五”现代能源体系规划》《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》等。

虽然生物质能及BECCS对实现碳中和的重要意义得到了普遍认同, 但目前关于中国能源碳中和转型的学术研究, 主要聚焦煤炭退出^[8-10]或光伏、风电倍增^[11-13], 较少对生物质能进行专门评估分析。文献[14]在CGE(Computable General Equilibrium)模型框架中刻画生物质发电和炼油, 模拟分析了中国2060年实现碳中和的减排路径, 结果显示, BECCS在2030年左右开始发展, 到2060年为中国提供约79%的负

碳排放, 届时生物质发电占中国发电总量的份额甚至达到26.5%~28.8%。文献[15]在C-GEM(China in Global Energy Model)模型中刻画BECCS在中国电力部门的应用, 并探究其在中国经济深度脱碳中的作用, 指出在2 °C和1.5 °C情景下, 2050年中国通过部署BECCS将捕集5.9亿t和9.5亿t CO₂。文献[16]利用GCAM(Global Change Analysis Model)模型(3.0版)评估中国能源作物的未来发展潜力, 提出在2 °C情景下, 2050年生物质能约占中国一次能源消费13%。文献[17]基于GCAM模型(4.0版)框架, 探讨了生物质能在中国实现《巴黎协定》气候目标中可能起到的作用, 提出在2 °C情景下, 2060年生物质能约占中国一次能源消费4%~11%, 1.5 °C情景占13%~16%, 长期来看, 所有生物质能应用均要配备碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)。

以上文献主要以全球气候目标为研究情景或主要关注生物质能在电力等特定部门的应用。针对最新碳中和导向下, 中国生物质能及其在发电、炼油、制气等多场景综合应用的细致研究仍显不足, 支撑生物质能科学融入碳中和战略的文献依据有待进一步加强。在此背景下, 本研究利用本土化改进的GCAM(基于最新版7.0, 该版进行了更新模型基年、纳入最新的能源技术发展趋势和技术类型等重要更新), 以“双碳”目标为情景, 研究中国生物质能消费。相比已有文献的边际贡献在于: 本研究在同一模型框架内综合刻画生物质能及BECCS在中国各能源部门的应用场景和技术, 系统模拟中国生物质能的消费趋势、分部门发展及BECCS部署轨迹, 研究结果可服务中国决策者科学制定与碳中和目标相匹配的生物质能及BECCS发展目标、路径与措施。

1 研究方法

GCAM是由美国西北太平洋国家实验室牵头开发的全球知名的综合评估模型(<http://jgcri.github.io/gcam-doc/index.html>)。该模型在同一框架中全面集成了能源、经济、农业、土地、水、气候等系统, 已经被广泛应用于全球和区域的能源转型、土地利用和气候变化等情景研究, 是IPCC系列报告的主要参考模型之一。GCAM是全球模型, 将全球所有国家划分为32个地理区域, 中国是其中的一个独立区域, 与其他31个区域通过商品贸易(如一次能源、农产品等)相连接。GCAM以5 a为模拟步长, 支持

长期模拟至2060年甚至2100年。该模型基于局部均衡理论以动态递归作为求解机理，在各期求解各级市场的出清价格，实现全球和区域的能源、农业及其他市场的供需平衡。

1.1 模型工具

在GCAM中，能源系统是核心模块，刻画能源的供应和需求。总体上，能源供应端包括一次能源（煤炭、石油、天然气、核能、地热、水力、太阳能、风能、生物质）开采和生产、经加工转换（发电、炼油、制气、制氢、供热）形成最终能源载体（煤炭、液体燃料、燃气、电力、热力、氢能、生物质、传统生物质）的完整链条及相关技术；能源需求端则包括最终能源载体在工业、建筑和交通三大终端需求部门的应用及相关技术，从而满足消费者的各类能源服务需求。

本研究利用对中国能源系统进行本土化改进的GCAM（基于最新版7.0）开展研究，框架如图1所示。在能源供应端，改进的GCAM着重对发电部门的技术经济参数进行了中国本土化更新，主要参考的数据来源为文献[18]；在能源需求端，则着重对中国工业、交通、建筑部门进行了更细颗粒的刻画，主要参考的数据来源包括IEA能源平衡表、中国统计年鉴、中国能源统计年鉴、中国工业统计年鉴、中国交通运输统计年鉴、中国建筑能耗研究报告等，以及相关文献资料。其中，工业部门被细分为12个子部门（钢铁、水泥、化工、有色金属、建造、农业、采矿、机械制造、纺织、食品加工、造纸、其他制造业），涵盖炼钢技术（高炉转炉炼钢、电弧炉炼钢、直接还原铁炼钢等）、水泥生产技术（水泥窑加热、水泥电力搅拌）、化工技术（燃料加热、化工原料加工）、有色金属冶炼技术（氧化铝精炼、铝冶炼）、其他工业技术（共计超过40种具体技术）以及CCS和氢能在这些技术中的应用。交通部门被细分为4个货运子部门（国内货运、农村运输、国际航海货运、国际航空货运）和5个客运子部门（城际客运、城市客运、农村客运、商业客运、国际航空客运），涵盖私家车、高铁、火车、公交车、摩托车、卡车、船、飞机、步行、自行车、地铁等20种具体交通模式。建筑部门被细分为4个气候区（严寒、寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖）、3个建筑类型（城市居民建筑、农村居民建筑、商业建筑），共计12个建筑子部门，每个建筑子部门涵盖供暖、制冷、炊事热水、照明、家用电器（居民建筑）/公共设备（商业建筑）5类能源服务。关于细化

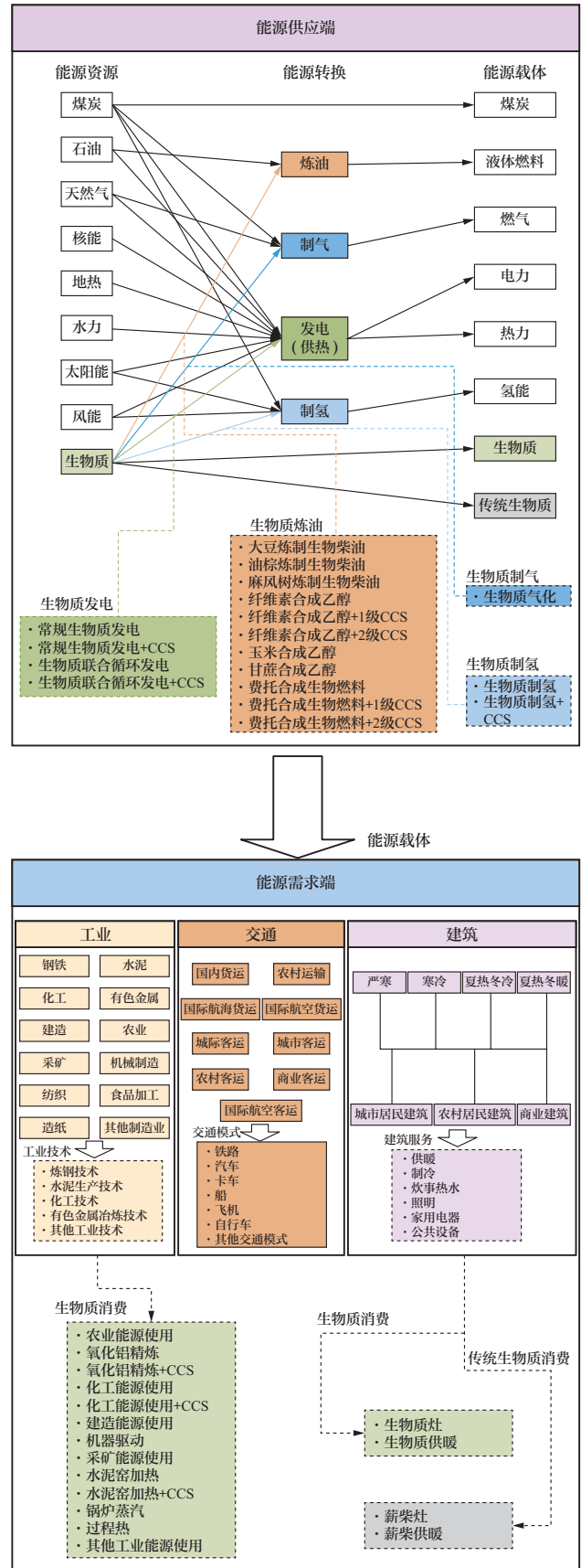


图1 GCAM中国能源系统框架
Fig. 1 China's energy system framework in GCAM

中国终端部门的详细工作介绍可见文献[19-21]。

在中国能源系统中, 生物质能的具体应用场景主要包括发电(供热)、炼油、制气、制氢以及终端工业和建筑部门(工业燃料以及居民供暖和炊事热水), 而薪柴等传统生物质用于农村居民建筑的供暖和炊事热水。在这些场景中, 发电、炼油、制氢和工业应用相对易与CCS技术结合形成BECCS^[2,22]。本研究考虑的中国生物质能应用的具体技术清单也在图1中给出, 例如, 发电技术包括常规生物质发电、常规生物质发电+CCS、生物质联合循环发电、生物质联合循环发电+CCS等4种。GCAM模拟生物质相关的燃料/技术与其他能源载体/技术共同竞争市场份额, 例如, 生物质发电与煤电、气电、油电、光伏、风电、水电、核电、地热等约20种具体发电技术(含CCS)竞争电力市场份额。各能源载体/技术的市场份额($e_{i,t}$)通过式(1)所示的logit函数确定:

$$e_{i,t} = \frac{S_{i,t} \cdot P_{i,t}^\gamma}{\sum_i S_{i,t} \cdot P_{i,t}^\gamma} \quad (1)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时期能源载体/技术 i 的平准化成本, 由能源成本(能源价格由模型内生, 有碳排放约束时将附加碳相关成本, CCS技术将附加碳处置相关成本)和非能源成本(外生设置)构成; $S_{i,t}$ 为 t 时期能源载体/技术 i 的份额权重(外生设置), 该权重可反映政策或市场偏好; γ 为价格弹性系数。基于式(1)进行市场份额竞争既立足于成本优选的基本思想, 又避免了赢者通吃市场。此外, $S_{i,t}$ 还被用于校准模型的历史模拟结果。参考文献[23]的校准方法, 通过校正份额权重、弹性系数等参数, 使模拟的能源消费和能源结构与近期统计数据相符。

在GCAM中, 生物质资源包括农林剩余物、市政垃圾、专门能源作物3类, 其未来供给量总体上根据社会经济发展水平、生物能源价格、土地利润率、土地生产率等因素由模型内生, 具体计算公式详见文献[24]。此外, 作为全球模型, GCAM还模拟生物质资源贸易, 即如果需要, 中国未来可能从全球其他31个区域进口生物质。

1.2 主要参数及情景

人口、国内生产总值(GDP)和城市化发展将决定中国未来经济活动规模, 从而影响能源服务需求和能源消费量。除了模型内生的能源价格, 生物质能在各应用场景的份额也受到非能源成本、能源效率等技术参数的影响。

本文对中国社会经济参数的假设如表1^[25-26]。按此假设, 中国人口在最近10 a达到峰值, GDP增速逐步放缓, 2060年GDP为2020年的4.2倍, 城市化率稳步提升至2060年的82.1%。

表1 中国社会经济参数假设

年份	2020	2030	2040	2050	2060
人口	14.1亿	14.2亿	13.8亿	13.2亿	12.5亿
GDP/万亿美元	14.6	23.2	33.5	45.5	61.2
城市化率/%	63.9	71.9	76.9	79.9	82.1

图2给出了本文对生物质能及BECCS相关技术参数的假设。其中, GCAM中发电的非能源成本由投资成本、固定运维成本和可变运维成本构成, 主要参考文献[18]如图2(a)一(c)设置; 参考文献[17,19,21,27-28]等, 炼油、制气、制氢、建筑和工业部门的非能源成本如图2(d)设置, 能源效率如图2(e)设置; 而CCS捕集率则参考文献[17-19]如图2(f)设置。本研究假设, BECCS从现在起进入能源系统, 可通过logit函数竞争被选择使用。

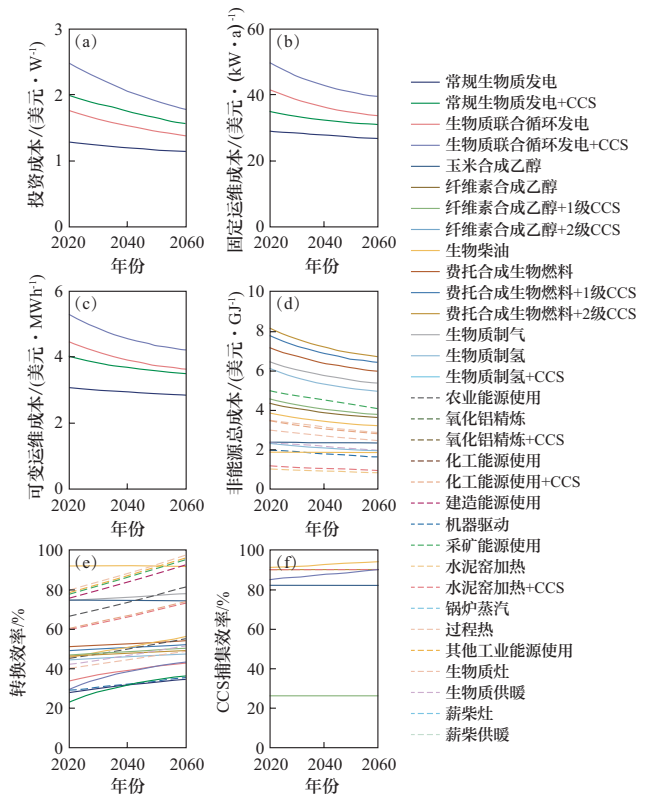


图2 生物质能相关的技术参数假设

Fig. 2 Assumptions of technology parameters related to biomass

为模拟碳中和导向下的中国生物质能消费及BECCS部署,本研究参考文献[21]设置中国能源系统实现“双碳”目标的默认情景:假设在2030年前按照国家自主贡献实现碳达峰以后,中国能源系统的碳排放到2060年最终下降至零。该路径被输入GCAM设置为未来中国能源系统的碳排放约束。GCAM将动态递归地求解碳价,使中国能源系统的碳排放刚好满足约束。碳价将改变包括生物质能在内的各能源载体/技术的相对竞争力,从而驱动能源和技术选择。此外,由于GCAM是全球模型,为尽量避免区域间碳泄露,本研究将全球1.5 °C碳排放路径^[29]与中国碳排放路径的“差值路径”设置为全球其他31个区域总碳排放的约束。

2 结果分析

2.1 生物质能消费总量

图3为本文模拟“双碳”情景得出的中国生物质能消费及其在一次能源消费中的占比。随着中国经济发展、居民收入水平提高和城市化持续推进,农村供暖和炊事热水的薪柴等传统生物质的使用快速减少,2030年后基本完全退出(占比小于1%直至零),与IEA预测的全球传统生物质退出相一致^[4]。由于当前应用成本相对较高,2030年前中国生物质能消费量的增长并不显著,实现碳达峰主要还是依赖于控煤以及加快发展风电和光伏^[18]。2030年以后,随着碳排放进入快速下降阶段,中国生物质能实现跨越式发展。到

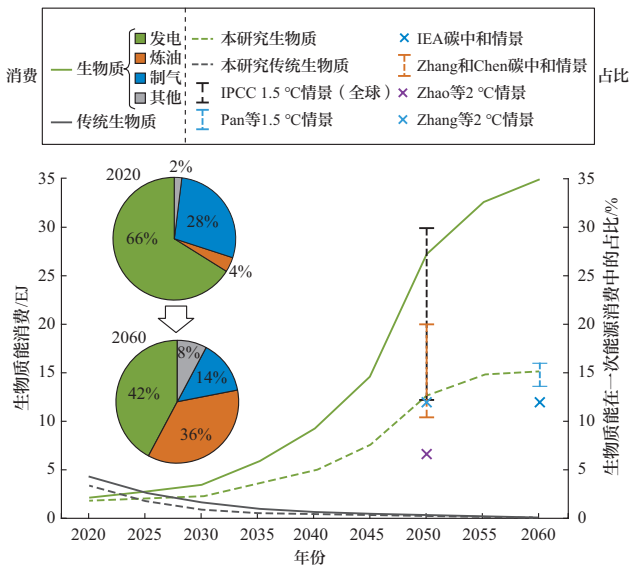


图3 中国生物质能消费
Fig. 3 China's bioenergy consumption

2060年,中国生物质能消费量达到35 EJ/a,占一次能源消费总量15.2%。相比已有研究^[2,16-17,30-32],本文模拟出的中国生物质能占比在文献[17]和文献[32]的结果区间内,但位于IPCC 1.5 °C情景生物质能占全球一次能源消费比例(四分位区间)的下限,这主要是由于较全球平均水平,中国风能、太阳能、水能等其他非化石能源丰富且具成本优势。

当前,发电是中国生物质能源化利用的主体,占生物质能消费近70%。如图3所示,在碳中和导向下,中国生物质能未来将呈现出以发电和炼油为主的多元化发展趋势。到2060年,中国42%和36%的生物质能分别应用于发电和炼油,14%应用于制气,其余8%应用于制氢、工业、建筑、供热等其他可能的场景。

2.2 生物质发电

据世界生物质能协会统计,生物质发电是目前全球继风电和光伏后的第三大可再生能源发电技术^[33]。相比北欧、德国等生物质发电处于领先水平的国家,中国生物质发电起步较晚且成本高于风电和光伏。图4给出了本研究模拟的中国生物质发电及其占发电总量的比例。与生物质能消费趋势一致,生物质发电在短期内无显著增长,2030年前在发电总量中的占比仅略高于1%。在碳达峰以后,随着大幅减排驱动碳价快速提高,以及生物质发电成本稳步下降,中国生物质发电逐渐具备成本竞争力,在2030年特别是2040年之后明显增长。到2060年,中国生物质发电量达1279.8 TWh(较2020年提升近10倍),占到中国发电总量6%(风电和光伏合计占60%以上),生物质发电装机233 GW,其中198 GW为BECCS。对比文献[4,10-12,16,18,32,34]对中国碳中和或1.5 °C情景的模拟结果,本文模拟出的生物质发电占比位于文献预测的“中间

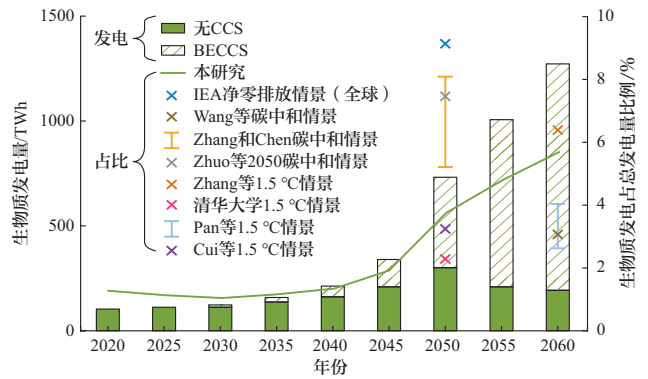


图4 中国生物质发电量
Fig. 4 China's biopower generation

位置”。相比间歇性的风电和光伏, 生物质发电更为稳定, 在高比例可再生能源并网的新型电力系统中, 可提供调频、调峰等服务来辅助电网的稳定性和安全性^[6]。此外, 生物质还可能与燃煤耦合(掺烧)发电, 协助煤电行业减排^[35]。

2.3 生物质炼油

IPCC AR6认为, 生物燃油未来具有发展前景, 特别地, 可能是交通部门实现深度减排的关键^[2]。图5给出了本文“双碳”情景下的中国生物燃油产量及其占液体燃料总产量的比例。交通部门是中国最主要的燃油消费部门。从全能源系统经济减排的视角来看, 中国的能源系统脱碳会首先发生在发电、建筑等减排技术选项更多或更易电气化的部门, 而交通部门的脱碳相比起来会稍滞后^[28,32,34]。同时, 中国正在大力推进道路电气化。因此, 在未来10~20 a, 中国液体燃料的低碳化进程可能相对并不急迫, 液体燃料炼化仍被石油垄断, 这与文献[14]的观点一致。但在2040年特别2045年之后, 为实现重卡、航空、航海等长距离载重运输的脱碳来支持国家碳中和目标, 中国液体燃料的生产结构被重塑, 生物燃油迅速发展对石油形成替代。到2060年, 中国生物燃油的产量大幅提升至6.4 EJ/a (BECCS占85%), 占到液体燃料总产量42%。

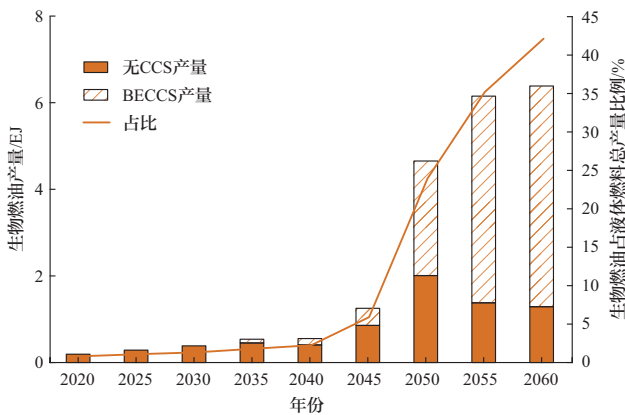


图5 中国生物燃油产量
Fig. 5 China's biofuel production

2.4 生物质制气

得益于沼气行业近几十年的发展, 中国生物质制气行业具备了较好基础。为加快生物天然气开发、建立健全产业体系, 中国近年来相继出台了《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》(以下简称《指导意见》)《“十四五”生物经济发展规划》等涉及生

物质制气的政策规划。如图6所示, 本研究情景认为, 生物天然气在中国实现“双碳”目标的进程中稳步发展, 2030年占天然气总产量的比例达6%, 实现《指导意见》提出的2030年占比5%的目标, 到2050年占比进一步达28%。天然气被一些研究视为中国实现碳中和的过渡能源, 认为中国天然气消费会在2040年前后达到峰值^[28,32,34]。在本研究情景中, 随着天然气的长期需求逐渐降低, 生物天然气产量在2050年达到峰值(4.6 EJ/a)。

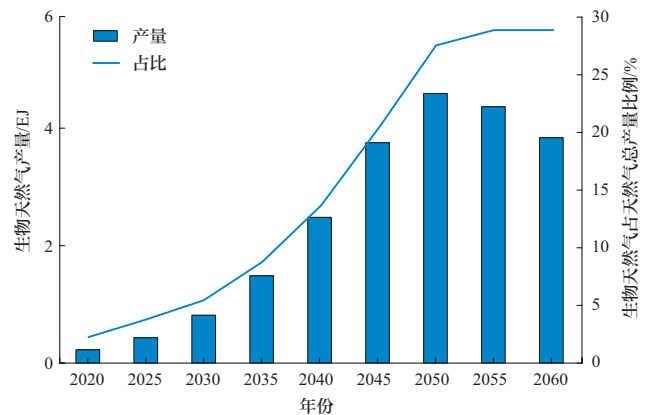


图6 中国生物天然气产量
Fig. 6 China's biogas production

2.5 BECCS

图7给出了本文模拟的“双碳”情景下中国能源系统BECCS碳捕集量, 以及BECCS在生物质能消费中的占比, 并将捕集量与文献[15,28,30,32,36]进行了对比。从2030年起, 随着中国碳减排进入下降通道, BECCS逐步加快部署。到2050年, 中国78%的生物质能在应用过程中配备CCS, 2060年持续提升至

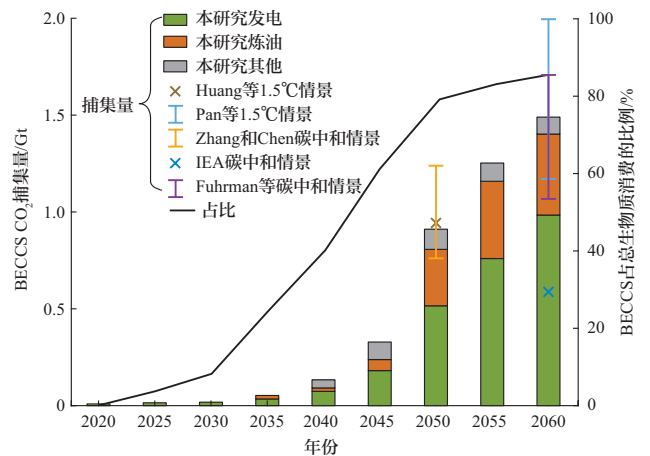


图7 中国BECCS部署轨迹
Fig. 7 China's BECCS development trajectory

86%，届时BECCS的年捕集量达到15亿t CO₂，位于文献[28]和文献[36]的预测区间内。BECCS将对钢铁、水泥、航空、航海、重卡等难减排领域的剩余碳排放形成抵消，为中国能源系统实现净零碳排放提供“兜底”保障。与分部门的生物质能消费一致，发电和炼油是BECCS的最主要部署部门，2060年通过BECCS分别捕集10亿t和4亿t CO₂。2020—2060年累计量表明，中国通过部署BECCS总共从能源系统捕集179亿t CO₂，其中发电和炼油BECCS分别累计捕集108亿t和51亿t CO₂，分别占60%和28%，工业和其他领域BECCS累计捕集20亿t CO₂。

3 不确定性讨论

需要说明的是，以上模拟在能源系统中考虑的负碳技术仅为BECCS，且中国可从其他31个区域自由进口生物质资源，而并未对生物质进口进行任何约束。在现有文献中，对中国生物质资源量的估计存在着很大的差异。文献[7]测算中国生物质资源量为32.7 EJ/a，文献[37]估计中国生物质理论资源潜力为58 EJ/a。文献[38]估算，中国农林剩余物的生物质资源量为8.74~12.64 EJ/a，能源作物的资源量为3.42~7.29 EJ/a，文献[39]计算中国农林剩余物的资源量为7.50~19.95 EJ/a。文献[40]和[41]分别预测，2050年中国生物质资源量达17.2 EJ/a和33.8 EJ/a。将2.1节生物质能消费量与GCAM同时模拟出的中国国内生物质产量相比较显示，中国2040年之后开始从国外进口生物质资源。到2060年，模拟出的中国生物质产量为25.5 EJ/a，届时中国约四分之一的生物质能消费来自于进口资源。

针对以上情况，在默认情景基础上，本研究额外设计2个情景来考虑中国生物质能消费的不确定性：①DACCS情景，假设中国未来也考虑部署直接空气碳捕集与封存（direct air carbon capture and storage, DACCS），与BECCS共同发挥负碳作用；②限制进口情景，假设中国生物质资源仅由国内生产，无法通过贸易进口获得。作为更不成熟、更为前沿的负碳技术，IPCC AR6的1.5 °C情景库中只有不超过三分之一的情景考虑了DACCS。目前，该技术在国内尚未开始示范。本研究此处参考文献[36,42]假设DACCS从2030年起进入能源系统，在2030年的投入成本（非能源成本）约为BECCS成本的3.5倍，之后逐年下降2%。除此之外，这2个情景的其他参数设置均与默认情景保持一致，且仍以1.2节“30·60”碳排放路径为碳约束。

图8比较了不同情景的中国生物质能模拟结果。在DACCS情景中，由于有DACCS可补充承担部分负碳任务，中国对BECCS以及生物质能的需求较默认情景有所降低，到2060年，BECCS年捕集量为11.4亿t CO₂，比默认情景低24%。虽然相较BECCS，DACCS发展的不确定性更高且对陆地生态的负面影响可能更大^[43]，但从减少碳中和对单一技术依赖这一视角，中国要考虑在BECCS基础上探索发展DACCS等来丰富自身的负碳方案，这也有助于增强负碳国际竞争力。在限制进口情景中，生物质来源更为单一，由于不得不用成本更高的其他能源和技术来进行一定程度的替代，中国能源系统的碳价（边际减排成本）增加，2060年达到552 美元/t（按2020年不变价计），比默认情景高23%。从服务自身经济有效地实现碳中和的视角，中国可特别注意考虑布局生物质资源和技术领域的合作。此外，通过对限制进口情景的模拟还发现，尽管2060年中国生物质能消费较默认情景降低18%，但BECCS捕集量较默认情景仅降低9%。这进一步验证了从中长期来看，中国要考虑将宝贵的生物质资源优先用于部署BECCS，尤其是在如果其他负碳方案发展不足的情况下。最后，虽然这2种情景改变中国生物质能的具体消费量，但并不显著影响其对实现国家碳中和目标的重要性。在2种情景下，生物质能2060年仍为中国提供13%左右的一次能源。

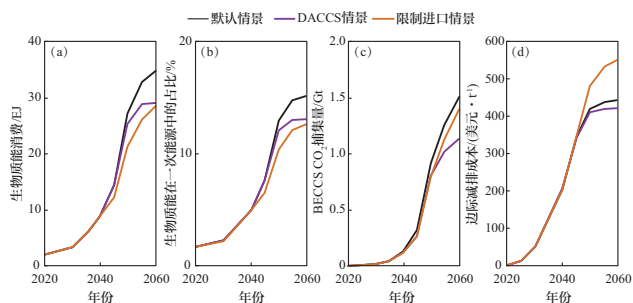


图8 不同情景下中国生物质能模拟对比

Fig. 8 Comparison of China's bioenergy modelling under different scenarios

4 结论

本研究利用本土化改进中国能源系统的GCAM，通过详细考虑生物质能在各能源部门的应用，模拟了碳中和导向下的中国生物质能消费和BECCS部署。默认情景的主要结论如下：①中国生物质能在2030年后快速发展，2060年占中国一次能源消费的比例达到15%；②未来中国生物质能多元化发展，到2060年，

42%、36%和14%的生物质能分别应用于发电、炼油和制气; ③作为关键负碳能源技术, BECCS在2030年后加快部署, 到2060年, 86%的生物质能以BECCS方式应用, 年捕集15亿t CO₂。

本研究提出如下建议供参考: ①以碳中和为引领, 加强顶层设计和部门协调, 尽快编制出台国家层面的生物质能中长期发展规划, 制定量化的生物质发电、炼油、制气等领域发展目标, 研究制定BECCS发展路线图; ②加快以BECCS为代表的负碳技术发展和负碳方案创新, 积极开展研发示范来争取率先突破技术瓶颈, 使BECCS在2030—2040年具备规模化应用条件, 力争在碳中和目标下打造形成具有中国特色的负碳核心技术国际竞争力; ③提前酝酿构建不影响生态文明和粮食安全的生物质资源供应体系, 部署生物质技术和资源领域的国际合作, 为畅通生物质能源资源的国际贸易通道做好准备。

本研究仍存在局限性。例如, 关于不确定性的讨论未来有待进一步深化, 从而更加系统地认识支持碳中和目标的中国生物质能发展路径及其不确定范围。此外, 本研究聚焦对生物质能消费侧的能源系统的本土化改进, 未来可进一步本土化校准生物质能生产侧的土地系统(本研究中国土地系统建模及参数完全为GCAM默认), 从而综合消费和生产两侧完善探讨。

参考文献

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris Agreement[R/OL]. (2015-12-12)[2023-10-15]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R/OL]. [2023-10-15]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- [3] International Energy Agency. CO₂ emissions in 2022[R/OL]. (2023-03)[2023-12-05]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [4] International Energy Agency. Net zero roadmap: a global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach[R/OL]. (2023-09)[2023-12-05]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
- [5] MANDLEY S, WICKE B, JUNGINGER H, et al. Integrated assessment of the role of bioenergy within the EU energy transition targets to 2050[J]. *GCB Bioenergy*, 2022, 14(2): 157-172.
- [6] 张大勇, 刘洪荣, 王元, 等. 30·60零碳生物质能发展潜力蓝皮书[R]. 北京: 中国产业发展促进会生物质能产业分会, 2021.
- [7] KANG Y T, YANG Q, BARTOCCI P, et al. Bioenergy in China: Evaluation of domestic biomass resources and the associated greenhouse gas mitigation potentials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109842.
- [8] HE G, LIN J, ZHANG Y, et al. Enabling a rapid and just transition away from coal in China[J]. *One Earth*, 2020, 3(2): 187-194.
- [9] MO J L, ZHANG W R, TU Q, et al. The role of national carbon pricing in phasing out China's coal power[J]. *iScience*, 2021, 24(6): 102655.
- [10] CUI R Y, HULTMAN N, CUI D Y, et al. A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1468.
- [11] WANG Y J, WANG R, TANAKA K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China[J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 761-767.
- [12] ZHUO Z Y, DU E S, ZHANG N, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3172.
- [13] ZHANG D, ZHU Z H, CHEN S, et al. Spatially resolved land and grid model of carbon neutrality in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(10): e2306517121.
- [14] WENG Y W, CAI W J, WANG C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060[J]. *Applied Energy*, 2021, 299: 117263.
- [15] HUANG X D, CHANG S Y, ZHENG D Q, et al. The role of BECCS in deep decarbonization of China's economy: a computable general equilibrium analysis[J]. *Energy Economics*, 2020, 92: 104968.
- [16] ZHANG A P, GAO J, QUAN J L, et al. The implications for energy crops under China's climate change challenges[J]. *Energy Economics*, 2021, 96: 105103.
- [17] PAN X Z, CHEN W Y, WANG L N, et al. The role of biomass in China's long-term mitigation toward the Paris climate goals[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(12): 124028.
- [18] PAN X Z, MA X Q, ZHANG Y R, et al. Implications of carbon neutrality for power sector investments and stranded coal assets in China[J]. *Energy Economics*, 2023, 121: 106682.
- [19] SHAO T M, PAN X Z, LI X, et al. China's industrial decarbonization in the context of carbon neutrality: a sub-sectoral analysis based on integrated modelling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 170: 112992.
- [20] SHAO T M, PENG T D, ZHU L J, et al. China's transportation decarbonization in the context of carbon neutrality: a segment-mode analysis using integrated modelling[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 105: 107392.
- [21] 邵天铭, 王利宁, 高鑫, 等. “双碳”目标下中国建筑部门能源转型模拟[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(6): 640-649. SHAO Tianming, WANG Lining, GAO Xin, et al. Modelling energy transition of China's building sector under the dual-carbon goal[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(6): 640-649(in Chinese).

- [22] 郑丁乾, 常世彦, 蔡闻佳, 等. 温升2 °C/1.5 °C情景下世界主要区域BECCS发展潜力评估分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 351-362.
ZHENG Dingqian, CHANG Shiyan, CAI Wenjia, et al. Assessment of global and regional BECCS development potential under the scenario of global warming of 2 °C/1.5 °C [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 351-362(in Chinese).
- [23] ZHOU S, TONG Q, PAN X Z, et al. Research on low-carbon energy transformation of China necessary to achieve the Paris Agreement goals: a global perspective[J]. Energy Economics, 2021, 95: 105137.
- [24] GREGG J S, SMITH S J. Global and regional potential for bioenergy from agricultural and forestry residue biomass[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2010, 15(3): 241-262.
- [25] United Nations. World population prospects 2023[R/OL]. [2023-10-15]. <https://www.un.org/en/about-us/un-system>.
- [26] World Bank. 2023 global economic prospects[R/OL]. [2023-10-15]. <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects>.
- [27] 王灿, 李浩, 张洪秩, 等. 全球温控目标对我国氢能发展的影响评估[J]. 技术经济, 2023, 42(2): 121-132.
WANG Can, LI Hao, ZHANG Hongzhi, et al. Impact assessment of global temperature control targets on hydrogen energy development in China[J]. Journal of Technology Economics, 2023, 42(2): 121-132(in Chinese).
- [28] PAN X Z, WANG L N, CHEN W Y, et al. Decarbonizing China's energy system to support the Paris climate goals[J]. Science Bulletin, 2022, 67(14): 1406-1409.
- [29] 王海林, 翁玉艳, 潘勛章. 碳中和背景下中美欧印2035年碳减排力度及经济代价探究[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(6): 1-8.
WANG Hailin, WENG Yuyan, PAN Xunzhang. Exploring the carbon reduction efforts and economic costs of China, the U.S., the EU, and India in 2035 in the context of carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(6): 1-8(in Chinese).
- [30] 国际能源署. 中国能源体系碳中和路线图[R/OL]. (2021-09) [2023-10-15]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh>.
- [31] ZHAO G P, YU B Y, AN R Y, et al. Energy system transformations and carbon emission mitigation for China to achieve global 2 °C climate target[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112721.
- [32] ZHANG S, CHEN W Y. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 87.
- [33] World Bioenergy Association. Global bioenergy statistics 2023[R/OL]. [2023-12-20]. <http://www.worldbioenergy.org/global-bioenergy-statistics/>.
- [34] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
- [35] FAN J L, FU J Y, ZHANG X, et al. Co-firing plants with retrofitted carbon capture and storage for power-sector emissions mitigation[J]. Nature Climate Change, 2023, 13: 807-815.
- [36] FUHRMAN J, CLARENS A F, MCJEON H, et al. The role of negative emissions in meeting China's 2060 carbon neutrality goal[J]. Oxford Open Climate Change, 2021, 1(1): kgab004.
- [37] XING X F, WANG R, BAUER N, et al. Spatially explicit analysis identifies significant potential for bioenergy with carbon capture and storage in China[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 3159.
- [38] 清华大学中国车用能源研究中心. 中国车用能源展望 2012[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [39] 常世彦, 郑丁乾, 付萌. 2 °C/1.5 °C温控目标下生物质能结合碳捕集与封存技术 (BECCS) [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 277-287.
CHANG Shiyan, ZHENG Dingqian, FU Meng. Bioenergy with carbon capture and storage(BECCS) in the pursuit of the 2 °C/1.5 °C target[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 277-287(in Chinese).
- [40] 国家可再生能源中心. 可再生能源数据手册[R]. 北京: 国家可再生能源中心, 2019: 1-115.
- [41] GAO J, ZHANG A P, LAM S K, et al. An integrated assessment of the potential of agricultural and forestry residues for energy production in China[J]. GCB Bioenergy, 2016, 8(5): 880-893.
- [42] FUHRMAN J, CLARENS A, CALVIN K, et al. The role of direct air capture and negative emissions technologies in the shared socioeconomic pathways towards +1.5 °C and +2 °C futures[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(11): 114012.
- [43] QIU Y, LAMERS P, DAI O G L O U V, et al. Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3635.

收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-06-02。



李峰

作者简介:

李峰 (1980), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划, E-mail: 157255836@qq.com。

张舒涵 (1996), 女, 硕士, 研究方向为能源经济, E-mail: shzhang2018@nsd.pku.edu.cn。

邵天铭 (1994), 男, 博士, 研究方向为能源环境经济系统分析。通信作者, E-mail: stm@pku.edu.cn。

庞军 (1971), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源与环境经济学、气候变化经济学, E-mail: pangjun2005@ruc.edu.cn。

(责任编辑 李锡)