**碳中和目标下碳捕集与封存技术的经济和减排影响分析——基于动态CGE模型**

# 1 选题背景及意义

* 1. 研究背景

1. **中国实现碳中和目标面对较大挑战**

气候变化危机下全球在加快减排速度，到2022年底共有140多个国家提出净零排放目标。

中国提出碳中和目标，加快中国经济社会转型发展，对于中国经济转型和全球气候治理都具有重要意义。

但是中国要实现碳中和目标具有较大挑战性。一方面，当前能源消费结构仍是以化石能源为主，要实现清洁化转型需要大幅调整能源与产业结构，存在困难。

另一方面，时间紧任务重。因此，需要付出较大努力。

**（2）CCS等负排放技术将成本实现碳中和不可或缺的技术选择**

依靠目前常规的减排措施和减排技术，难以实现减排目标，迫切需要新技术的发展。具体而言，对于钢铁、水泥、化工等难以减排的行业，由于生产工艺约束，生产的过程必然伴随排放。对于电力行业，风光发电可以有效降低行业排放，但是风光的间歇性和波动性以及电网运输、储能等配套技术的不成熟，仍对可再生能源规模化发展带来不确定性。因此，碳捕集与封存技术、森林碳汇等负排放技术的发展将成本实现净零排放目标不可或缺的重要技术选择。（常规技术不足以实现减排目标）

CCS技术作为一项非常具有发展前景的减排技术，得到了现有研究的广泛关注。CCS技术实现负碳排放的原理在于。1）在现有综合评估模型研究中，对于CCS技术的减排潜力进行了应用。从全球减排潜力来看，IPCC提到，在1.5度温升目标情景中，CCS技术的年平均二氧化碳捕集量将达到亿吨。从中国减排潜力来看XX。2）此外，CCS的作用机理是。研究发现，发展CCS项目具有XX好处，环境的、能源的（保持燃煤电厂延缓退出，）、经济的（减少或避免资产搁浅风险）。

当前CCS技术由于技术原因、存在较为高昂的技术应用成本，但3）在双碳目标的中后期阶段，随着减排的深入推进必然伴随着产业减排成本的快速上升，CCS技术的成本优势将逐渐凸显，有助于降低难以减排行业高昂的减排成本代价，以最优成本实现碳中和目标。（CCS技术在未来具有较大的减排潜力，全球的和中国的，减排成本也将出现下降，并且在保障能源安全等多个方面都具备好处）

**（3）CCS技术在中国的发展现状**

**中国的CCS技术总体处于中试和示范阶段。目前建设的项目分布、年捕集量水平、覆盖的各环节技术、覆盖的行业。**总体来说，虽然当前我国CCS技术相较全球发展水平而言，还有较大发展空间，但是在近些年内的发展速度得到了较快的提升。目前制约CCS技术发展的主要是成本和技术成熟度。（当前CCS技术的减排潜力、减排成本和技术发展程度）

从国家碳减排战略来看，自双碳目标提出后，政府发布了一系列文件促进各领域低碳转型，CCS技术也被列入国家战略新兴产业目录，从而加快推动CCS技术的发展。整体而言，当前政策的重点在于加快行业应用、加快区域试点、加快技术研发和标准制定。（**当前国家政策支持**）

CCS技术未来的发展主要受到技术和成本因素的制约。具体而言，当前技术难以实现大规模运输和封存；当前成本大概在XX之间，具体成本因项目情况和技术类型差异而存在较大差别。但研究也认为，在未来中国CCS技术将具有较大下降空间，随着二代、三代技术的应用，成本大概会下降至XX。（当前主要的问题，技术上的，成本上的）

完善的政策制定、有效的激励措施将加快CCS技术发展。当前我国没有明确具体的政策规划，对于CCS技术未来发展，主要是科技部发布的《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图》，提出在2050年前以五年为单位进行目标设置。到2050年，CCS技术在全国得到广泛部署。而更为具体的激励措施和手段有限。（说明国家政策激励的重要性，以及当前政策缺失，需要进一步完善）

1. **CCS技术发展对实现双碳目标不同阶段的潜在贡献和成本收益亟待研究**

目前尚缺乏对CCS技术大规模部署可能产生的能源环境和社会经济方面的潜在影响的深入评估。目前研究对CCS的减排潜力和环境影响进行了测算，但对于实现碳中和下的经济成本代价的节约没有定论，并且这与可再生能源等竞争性技术的发展具有较大关联关系。

或者是：

此外，现有研究大多聚焦于从工程视角对CCS捕集与封存潜力进行预测，并对影响CCS技术发展的供需因素展开分析。而对于具体CCS的能源、环境与经济影响较少评估（CCS本身的影响）。

并且对于CCS技术与其他减排措施之间的相互竞争影响关系缺乏关注（CCS和其他减排措施的相互影响）。

并且对于CCS技术激励政策的研究目前仍主要以定性分析为主，缺乏对双碳目标下CCS政策影响的量化模拟。研究发现，XX政策可以通过XX促进CCS项目加快示范，引导企业加装CCS装置。现有研究难以支撑CCS政策方案制定（CCS激励措施的影响）。

* 1. **研究问题**

CCS技术相比工业节能减排具有成本优势，是助推我国双碳目标实现、应对气候变化和实现经济社会可持续发展的重要手段，但较少研究从全行业尺度量化测算CCS技术使用的成本代价、以及带来的经济收益，全面评估CCS技术发展的影响，也将对我国经济带来影响实施对我国经济增长和产业结构演变造成的影响。其次，碳中和目标的实现需要多种减排措施和减排技术的共同实施，CCS技术作为化石能源行业和重工业减排的保底技术，该技术的实施不仅将改变未来有效的减排技术选择方案，也将对未来实现碳中和目标下的产业结构和能源结构演变带来影响，煤基能源行业将得到保留。可以在保留一定化石能源的基础上实现减排目标。为实现碳中和目标提供新的选择路径。最后，未来激励政策的实施将改变CCS技术发展的成本、刺激企业研发投入积极性，从而助推新技术的突破，提升CCS技术的减排潜力，而这将进一步增加未来实现双碳目标下我国经济结构和能源结构发展的不确定性。

因此，本研究将基于成本收益视角，在双碳目标背景下，分析CCS技术引入对我国未来经济、社会、能源和碳排放的影响，并进一步分析不同激励措施对于助推CCS技术发展，从而对经济结构和能源结构的影响。具体研究问题为：

1. 在单一减排政策中，CCS技术引入的潜在经济影响如何？（CCS本身的影响）
2. 政府激励政策、CCS技术进步对规模化采用和CCS发展路径的影响机理如何？（不同激励措施对CCS发展的影响）CCS技术不同发展程度对未来产业结构、经济演变路径的影响如何？（不同CCS发展对未来经济演变的差异）
3. 碳中和目标约束下，在组合政策情景中CCS技术的引入对于有效政策组合的权衡选择的影响？（CCS对碳中和实现的影响 可选政策域、实现代价、能源与产业结构）
   1. **研究意义**
4. **理论意义**

首先，本研究从经济成本、社会成本、能源安全和环境收益四个维度对CCS技术开展多维评估，深入剖析CCS技术的作用机理，揭示了CCS技术的有效性；

其次，构建了较为系统的CCS技术未来不同发展路径的影响分析框架，在不同支持政策与技术进步对CCS技术的影响机理及其作用路径方面完善已有理论体系；

最后，基于成本收益视角分析不同CCS技术发展路径对经济结构、能源结构和碳排放的影响异质性，解析了CCS技术在不同阶段的异质性，能够为选择成本收益动态最优的CCS技术发展路径提供科学依据。

1. **现实意义**

本研究将为我国选择成本收益最优的减排政策提供科学依据，在支撑我国碳达峰碳中和政策制定和完善方面提供支撑

2 国内外研究现状述评

* 1. **CCS技术路线及发展规模研究**

**（1）**CCS技术在全球的应用与发展

全球CCS示范项目稳步发展，CCS主要应用在燃煤电厂和天然气加工领域，封存方式以EOR为主。截至2020年，全球大型CCS设施的数量达到51个(GCCSI, 2021; IEA, 2020)，其中13个项目的CO2排放源来自燃煤电厂，11个项目的CO2排放源来自天然气加工，其余CO2排放源还涉及化肥生产、酒精生产、氢气制备、煤化工和钢铁生产及水泥生产（GCCSI, 2022）。运行中的项目大多用于EOR和咸水层封存。全球CCS产业集群CO2封存利用类型以EOR为主，CO2运输类型以管道运输为主。CCS产业集群具有封存成本低、商业风险低等优点，成为CCS发展新方向和应对气候变化新手段（GCCSI, 2022），其中CO2封存利用类型包括EOR、枯竭油气田封存、咸水层封存、及混合类型；CO2运输方式包括管道运输、船运和车载运输。我国现有CCS示范项目主要分布在东北、华北和华东地区，大部分项目建设规模较小。

**（2）中国**CCS示范项目的发展

**国外CCS成本约为90~270美元/tCO2当量，在温室气体减排技术中处于中高水平(IEA, 2020a)**。**捕集成本占全流程CCS成本的70%以上(IPCC, 2005)**，全球碳捕集与封存研究院GCCSI对全球典型示范项目的CO2捕集成本进行了分析，已建的设施中，捕集成本最高约为700元/t（108USD/t），最低约为390元/t（60 USD/t），拟建项目的捕集成本范围为227～293元/t（35～45 USD/t）(GCCSI, 2017)。生物质燃烧耦合 CCS 技术的 CO2避免成本（或净减排成本）总体最高，约 88~288 美元/t；生物质制乙醇耦合 CCS 技术的CO2避免成本亦较高，约 20~175 美元/t(GCCSI, 2020)。IEA估计，不同情景到2060年工业捕集成本下降30～40%，电力捕集成本下降约27～32%(IEA, 2020a)。

根据CCS路线图、2021评估报告与年度报告，当前我国CO2捕集成本为70~400元/吨CO2，预计2060年可下降至40~185元/吨CO2 (科学技术部社会发展科技司, 2019)。国内CO2输送主要采用罐车运输，成本约为0.9~1.4元/吨·km，吉林油田采用管道输送，输送距离约为20km，成本为0.3元/吨·km。受到运输规模、地质条件以及管道材质等诸多因素的影响，CO2管道运输成本可能高达1～4元/t.km (Wei et al., 2016)。到 2030年，建成具有单管200万t/a 输送能力的陆地长输管道，运输成本约为0.7元/t.km；至2060年，管道输送成本可降至0.4元/吨·km(科学技术部社会发展科技司, 2019)。到2060年CCS成本下降66～80%(科学技术部社会发展科技司, 2019) (蔡博峰, 2021 , ADB, 2015)。

* 1. **CCS技术未来减排潜力、发展路径与减排成本研究**

1. **CCS技术未来减排潜力与发展路径预测研究**

**在全球层面，目前已有较多研究对BECCS技术的未来发展路径和规模进行了探讨。当前研究普遍认为，BECCS技术将于2030-2040年间开始大规模发展，且将成为未来全球负碳排放的重要来源，然而不同研究所得到的发展路径与规模存在较大差异。**Azar等[62]从能否短暂超过温升目标（即Overshoot）的角度探讨了全球2℃和1.5℃目标下BECCS技术的发展，发现在保持温升不高于2℃和允许短暂超过1.5℃的两个情景中，BECCS将于2040年左右开始被大规模应用。“1.5℃特别报告”中提出了实现全球1.5℃目标的四种减排模式，在资源能源消耗最高、碳排放量最高的模式下，大约从2030年就需要大规模发展BECCS技术[63]。Kriegler等[64]的研究讨论了不同碳预算下以BECCS为代表的负排放技术的部署规模差异。通过模型模拟发现，如果2016-2100年的全球二氧化碳排放预算在5500-6500亿吨范围内，实现1.5℃目标无法离开NET的部署；如果碳预算低于5500亿吨，则NET贡献的负排放量必须在2040年、2050年依次超过40亿吨和100亿吨。此外，近年来也涌现出一些文献比较和模型比较研究。例如，Minx等[14]通过文献综述总结了当前研究中预估的未来全球BECCS技术发展规模的范围：2050年的二氧化碳捕集量为24-110亿吨，2100年的捕集量为110-697亿吨，2100年前的累积负排放量为1000-11700亿吨。斯坦福大学能源建模论坛的EMF-33项目对11个IAM模拟的全球2℃目标下BECCS的发展路径及规模进行了汇总（图2.1），发现大部分模型中BECCS技术开始部署的时间在2030-2050年间，2060年的二氧化碳捕集量范围为50-160亿吨，2100年时将达到80-260亿吨[65]。此外，不同IAM模型所得到的模拟结果差异很大，且差距随着模拟时间的延长而扩大。除模型结构本身的差异外，导致不同研究间模拟结果差异大的原因主要是BECCS技术未来的发展路径和规模会受到多方面不确定因素的影响。例如，减排量的设定、常规低碳技术的发展、生物质资源的供应量、水和土地资源的充足性，以及碳捕集与封存能力等。对这些因素的不同判断会影响建模者们对各自模型中相关假设和参数的设定。**总体而言，全球层面，2050年CCS的减排贡献为28-76亿吨/年**。**IRENA（2020a，2020b）深度脱碳情景下，2050年CCUS将贡献约6%年减排量，**即27.9亿吨/年。蔡博峰等（2021b）研究发现，2050年CCUS不同情景中的全球减排量为27.9-76亿吨/年。IPCC（2018）报告中指出，2050年不同路径CCUS的总减排量为30-68亿吨/年。IEA（2021）全球能源系统净零排放情景预测2050年全球CO2捕集量约为76亿吨/年。

随着中国双碳目标的提出，CCS技术对于深度脱碳以及实现净零排放的重要性逐渐凸显，有关中国CCS技术发展潜力的研究日益增多。现有研究基于不同减排目标（碳预算量）、竞争性减排技术发展、重点减排行业减排需求等因素变动进行情景设定，对未来中国CCS减排规模进行预测和评价。中国碳中和目标年份为2060年，研究显示2060年中国CCS技术的减排潜力约为8-20亿吨，其中以化石能源CCS减排为主，BECCS和DACCS为辅。He等（2022）研究发现在1.5℃净零情景下，2050年配备CCS的燃煤电厂年均捕获6亿吨二氧化碳，而BECCS捕获量为2.8亿吨。Chen等（2022）研究发现全球CCUS部署的“黄金时代”为2040-2060年，而中国部署时期为2030-2050年，2050年中国碳捕获和储存能力将达到18.3亿吨/年。蔡博峰等（2021a）依照现在的技术发展预测，2060年需要通过CCUS技术实现的减排量为10-18亿吨，其中BECCS和DACCS分别需要实现减排3-6亿吨和2-3亿吨二氧化碳。Ausfelder和Baltac（2020）认为中国的CCUS产能将快速增长，到2070年CO2捕获量将超过20亿吨，并且BECCS和DAC越来越重要，2070年占捕获CO2的三分之一。

**从全国碳中和目标实现的排放路径分析：**目前研究对于未来总体减排路径的变化还存在较大不确定性，有的研究认为考虑能源安全问题要晚一点进入快速减排更可行。因此对于煤机能源产业的保留与退出比例也存在不确定性。那么在不同的考量下，采取的减排政策组合存在差异，CCS技术的发展路径和减排规模的预测也就有差异。现有研究大多关注了全国层面减碳和中和路径，在达峰时间、减排速率、剩余排放等方面存在较大分歧。研究基本认为将经历“达峰-过渡-快速减排-中和”四个阶段，但对于何时进入快速减排阶段存在不同观点（Duan等，2021；蔡博峰等，2021a）。例如，部分学者认为中国应在2020-2025年间进入快速减排期（Zhang和Chen，2022a）；部分学者则认为是2030-2035年间开始快速减排更为可行（He等，2022；张希良等，2022）。这些研究表明，现有研究对面向2060年的我国碳排放路径仍存在较大分歧。

从行业角度分析，**CCS在能源和工业部门的碳减排潜力最大，其中，电力行业2050年**CCS捕集规模为1.45~8.45亿吨/年，工业部门为2.5~6.5亿吨/年（IEA，2020b；Yu等，2019；Viebahn等，2015）**。**IEA（2020b）可持续发展情景下，中国电力行业CCS捕集规模将达到2030年约1.9亿吨/年，2050年7.7亿吨/年，2070年超过12亿吨/年。Yu等（2019）研究发现我国电力行业CCS捕集贡献可达到2030年0.10~0.25亿吨/年，2050年1.45~8.45亿吨/年。Viebahn等（2015）发现电力行业可捕集与封存的二氧化碳总量在34至221亿吨之间，2050年将达到0.9~5.7亿吨/年。我国工业部门CCS二氧化碳捕集贡献将达到2030年2亿吨/年，2050年6.5亿吨/年，2070年6.8亿吨/年（IEA，2020b）。Yu等（2019）预计2030年我国工业部门CCS捕集量将达到0.8~1.1亿吨/年；2050年将达到2.5~2.8亿吨/年。

早期CCS减排机会主要发生在高碳能源行业。高浓度排放源（如煤化工行业）的CO2捕集能耗与成本显著低于中低浓度排放源（如火电、钢铁、化工和水泥），因此高浓度排放源（主要为工业过程分离）为CCS的早期示范提供了低成本机会。CO2强化石油开采和咸水层封存技术与高浓度CO2排放源耦合是中国早期CCS示范项目的主要类型（科学技术部社会发展科技司，2019）。利用现代煤化工厂高浓度CO2开展咸水层封存项目，CO2减排量可达每年数亿吨，同时可以生产地下咸水数亿吨（Li等，2019）。

1. **CCS技术减排成本预测研究**

目前CCS技术路径优化研究大多聚焦在全国层面，少数研究考虑了不同区域、不同行业的应用路径，减排潜力和工程成本是路径优化的主要指标（Morris等，2019a；Wang等，2020）。Hu和Wu（2022）对比了6种CCS技术路径的平均减排成本，结果表明选择高CCS渗透率与低碳价策略的平均减排成本最低。Fan等（2018）探讨了中国燃煤电厂CCS改造路径，考虑了成本投入、技术锁定风险和减排需求，认为2035年是中国CCS商业化应用的合适时机，应率先在陕西、河北和内蒙古推动CCS商业化。

当前CCS技术的工程成本仍然较高，未来随着技术进步，CCS技术工程成本将逐渐降低。当前CCS技术的成本约为15-600美元/吨CO2当量，在不同温室气体减排技术的成本中处于中高水平，其中，捕集成本占全流程总成本的75%左右（IEA，2020；Fuss等，2018）。IEA估计2060年工业捕集成本将下降30-40%，电力捕集成本下降约27-32%（IEA，2020）。我国CO2捕集成本为70-400元/吨CO2（10-57美元/吨），预计2060年可下降至40-185元/吨CO2（6-26美元/吨）（科学技术部社会发展科技司，2019）。CO2管道运输成本可能高达1-4元/吨公里（Wei等，2016），至2060年管道输送成本可降至0.4元/吨公里（科学技术部社会发展科技司，2019）。不同CCS技术的工程成本差异较大，化石能源CCS技术成本低于DACCS和BECCS技术（Hu和Zhai，2017；Dods等，2021）。根据测算，2050年化石能源CCS减排成本约24-120美元/吨CO2；BECCS减排成本为100-200美元/吨CO2；DACCS减排成本最高，为30-1000美元/吨CO2（Fuss等，2018）。

同时，有研究指出不同CCS技术的减排潜力差异较大，并且各类技术减排的主要影响因素也存在差异。相较于DACCS和BECCS而言，化石能源CCS的减排成本更低，在电力行业和工业脱碳中发挥主要作用。根据现有研究测算发现，到2050年化石能源CCS年均减排潜力约为85亿吨，减排成本约24-120美元/tCO2（Dods, 2021; Budinis et al., 2018; Rubin, 2015; Surinder et al., 2018; 胡和翟, 2017）。化石能源CCS的减排成本主要受燃料特性、捕获方法、电厂类型和储存地点等因素的影响（Budinis, 2018）。对于不同捕获技术而言，Paltsev（2021）研究发现使用燃煤PCC、天然气PCC和CCC后，2100年工业部门产量分别是2010年的3.7倍、3.5倍和7倍，总排放分别减少14%、17%和45%，此外在水泥生产中使用燃煤PCC和天然气PCC后生产成本提升幅度较大，而CCC成本变化较小，是最具竞争力的CCS技术。对于不同燃烧发电厂而言，相较于PC和NGCC而言，煤气化联合循环IGCC采用CCS对于减少温室气体排放的影响最为显著（Odeh, 2008）。

当前研究具有的三个特点：~~1.缺乏供需匹配~~；2. 需求侧研究中对由于行业集群减排或者技术进步而带来的捕集规模扩张、成本下降的因素刻画较少，CCS发展路径的刻画较单一；3. 对于竞争减排技术发展与CCS技术发展的相互竞争替代关系的研究较少（应该有研究讨论了电力系统内部可再生+储能和CCS+化石能源的比较，但是可能主要是比较影响的，不是比较发展规模的）；4. 专门针对碳中和目标下CCS技术发展路径及影响研究的文献是不是还较少有

* 1. **CCS技术发展的经济、能源和环境影响研究**

1. **CCS技术的经济社会影响分析**

当前CCS发展的经济影响评估主要集中在对**减排成本、GDP**、物价、进出口等宏观经济指标的影响评价。

在**碳减排成本**方面，以成本优化为目标的模型研究普遍将部署一定规模的BECCS视作相同减排目标下的最优方案。例如，Azar等[81]基于一个全球能源和传输模型计算了将大气中CO2浓度稳定在350ppm（ppm表示百万分比浓度）和450ppm的减排成本。研究发现，与不使用碳捕集技术的情况相比，若CCS技术与化石燃料结合使用有望将实现350 ppm浓度目标的成本降低50%，而在允许使用BECCS的情况下，成本将降低80%。450ppm目标下，常规CCS与BECCS对减排成本的削减作用分别为40%和42%。Smith等[18]指出，以农林剩余物为原料的BECCS技术的碳捕集成本为130-375美元/吨。Fuss等[15]对IAM模型中的假设做了系统梳理，发现当前模型中BECCS技术的减排成本范围为100-200美元/吨。由于技术类型、技术进步、部署规模和地点等因素的差异，导致成本设定的范围很大。

当前国内外研究普遍认为，实现深度脱碳目标将在一定程度上影响**GDP**的增长。例如，Muratori等[86]应用全球变化评估模型（GCAM）探讨了BECCS发展可能带来的全球和区域经济影响。研究发现，若不使用CCS技术，化石燃料出口地区的经济将受到负面影响；若使用CCS（尤其是BECCS），便可以继续保留一定量的出口量，从而缓解大幅度减排带来的经济损害。Fajardy等[87]基于全球一般均衡模型EPPA的模拟发现，BECCS技术将在碳价为240美元/吨左右时进入到市场中，其部署将使得达成减排目标的全球经济成本和碳价格大大降低。该研究同时指出，尽管BECCS部署将带来较大范围的土地利用变化，但对商品价格的影响较小，全球商品价格指数的平均增幅小于5%。

当前对于中国深度脱碳目标下BECCS技术发展的潜在经济影响的研究还较少，但已有研究开始关注BECCS应用对**GDP**的影响。一般来讲，碳减排目标的实现将对经济增长带来一定损害。虽然碳减排可能对GDP增长产生一定程度的负面影响，但碳中和目标的实现将有助于提高中国经济发展的质量.。同时有研究指出，BECCS技术的应用将可能缓解深度脱碳给中国经济带来的损害。

一方面，通过提升碳排放空间、缓解减排压力，CCS技术能够降低碳减排的经济代价。Weng等（2021）基于CGE模型，发现到2060年BECCS和森林碳汇将GDP损失由6.4%降低至4.8%。Huang等（2020）基于中国-全球能源CGE模型，发现在温升1.5℃目标下，BECCS使2050年碳价降低61%，GDP损失降低3%。

CCS技术通过提升排放空间缓解减排压力，有效降低整体减排成本。Weng et al.（2021）通过构建中国CGE模型，研究发现到2060年BECCS和森林碳汇可将GDP损失由6.4%降低至4.8%。Huang et al.（2020）基于中国-全球能源CGE模型，研究发现在温升1.5℃目标下，BECCS可使2050年碳价降低61%，GDP损失下降3%。Li et al.（2017）采用CGE模型发现CCS情景下2050年GDP仅比基准情景下降了0.33%，但2050年化石能源行业的产出下降了7.28%-8.91%。Fuhrman et al.（2021）研究发现只依靠BECCS和造林负排放，2060年边际减排成本超过800美元，而进一步加入DACCS后中国可以在2060年以每吨二氧化碳200-400美元的边际成本实现二氧化碳净零碳排放。

可能综述的点：目前关注的指标集中在GDP、物价、贸易，但对就业等社会影响指标较少讨论，同时也较少对影响机理进行深入剖析；其次，少有对部门传导链条进行揭示的，我们对中国全行业链条不同类型部门的影响及其机理进行分类和量化分析，并且讨论了不同发展情景下产业部门的变动趋势和结构；现有研究是否考虑了CCS基础设施建设投资对于整体经济的正面影响；

1. **CCS技术的能源影响分析**

CCS技术的采用是否可以有效延缓煤电退出、对于煤电在电力系统中扮演角色和定位的影响，以及对于整体能源结构的影响；有关能源安全的研究

1. **CCS技术的资源消耗、环境影响分析**

从国内外研究来看，当前学界对CCS发展的潜在环境影响的讨论主要集中于是否可以有效减排（反弹效应）、资源损耗（采用更多电力热力水等投入）、大气污染等方面。

现有研究在CCS技术的环境影响方面也存在一定分歧。Odeh和Cockerill（2008）发现，部署CCS减少火电碳排放是以增加NOx和NH3等污染物排放为代价的，导致水体富营养化和酸化程度加剧。Troy等（2016）比较了IGCC发电厂不同捕获技术对臭氧消耗的影响，发现富氧燃烧捕获系统的IGCC发电厂对臭氧消耗影响最大，其次是燃烧后和燃烧前捕获系统。

另一方面，CCS技术的部署降低了发电厂的发电效率，导致不同程度的能源损失，与成熟的可再生能源相比成本更高（Jung等，2022）。Wang等（2022）基于生命周期研究法，发现尽管CCS使火电的CO2直接排放减少近90%，但增加了上游燃料开采、加工运输和基建等环节带来的间接碳排放，使减排效果降至47%-63%。

尽管CCS可以显著减少直接二氧化碳排放，但CCS的部署降低了发电厂的发电效率，并且不同技术会导致不同程度的能源损失，与成熟的可再生能源相比电力成本更高（Jung et al., 2022）。Wang et al.,（2022）回顾了过去十年应用CCS技术燃烧发电系统的生命周期评估研究，发现尽管CCS可以使燃烧发电系统直接二氧化碳排放减少近90%，但上游燃料开采、加工运输和基建等环节带来的间接温室气体的增加将起到抵消作用，从而使整体温室气体排放减少47%-63%。此外，也有研究比较了CCS过程中不同环节的能源和效率损失。在燃料类型方面，Sathre et al.（2011）测算得到褐煤的效率损失最大（14%），其次是无烟煤（11%）和天然气（8%）。在比较不同发电厂效率损失中，Budinis et al.（2018）研究发现，PC发电厂的能源损失最高（15%-28%），其次是NGCC（15-16%）和IGCC（4.9%-20%）。在吸附剂对于CCS系统的能耗影响中，Cormos（2017）和Hu and Zhai（2017）均发现尽管基于胺溶液的化学吸收方法更加成熟，但溶剂的生产和降解将增加CCS系统的能耗和经济成本，气固吸附具有更高的能效和更低的燃料消耗。

此外，还有部分研究对不同CCS技术带来的环境和健康影响差异进行了评估。Odeh and Cockerill(2008)研究了三种化石燃料发电厂应用CCS的环境影响，结果表明二氧化碳排放的减少是以增加NOx和NH3等其他排放为代价的，引入CCS虽然可以降低全球变暖可能，但是由于其他污染物浓度的增加，富营养化潜力和酸化潜力预计会增加；在三类发电厂中IGCC技术相较更清洁，污染排放相对更低。Liang et al.（2013）对应用CCS的四类燃煤发电技术的多项环境指标进行评估，发现IGCC在GWP（全球变暖潜能值）、AP（酸化潜力）和HTP（人类健康潜力）等指标中均有更好的表现，是一种更为清洁的燃煤发电技术。此外，Troy et al.（2016）进一步比较了IGCC发电厂不同捕获技术对臭氧消耗的影响，发现富氧燃烧捕获系统的IGCC发电厂对臭氧消耗影响最大（60.6%），其次是燃烧后（48.2%）和燃烧前捕获系统（45.9%）。

尽管CCS可以显著减少直接二氧化碳排放，但CCS的部署降低了发电厂的发电效率，并且不同技术会导致不同程度的能源损失，与成熟的可再生能源相比成本更高（Jung等，2022）。Wang等（2022）回顾了过去十年应用CCS技术燃烧发电系统的生命周期评估研究，发现尽管CCS可以使燃烧发电系统直接二氧化碳排放减少近90%，但上游燃料开采、加工运输和基建等环节带来的间接温室气体的增加将起到抵消作用，最终整体温室气体排放减少47%-63%。CCS过程中不同环节存在能源和效率损失。在燃料类型方面，Sathre等（2011）测算得到褐煤的效率损失最大（14%），其次是无烟煤（11%）和天然气（8%）。在比较不同发电厂效率损失中，Budinis等（2018）研究发现，PC发电厂的能源损失最高（15%-28%），其次是NGCC（15-16%）和IGCC（4.9%-20%）。在吸附剂对于CCS系统的能耗影响中，Cormos和Cormos（2017）与Hu和Zhai（2017）均发现尽管基于胺溶液的化学吸收方法更加成熟，但溶剂的生产和降解将增加CCS系统的能耗和经济成本，气固吸附具有更高的能效和更低的燃料消耗。

CCS技术的应用可能带来差异化的环境影响。Odeh和Cockerill（2008）研究了三种化石燃料发电厂应用CCS的环境影响，结果表明二氧化碳排放的减少是以增加NOx和NH3等其他排放为代价的，引入CCS虽然可以降低全球变暖可能，但是由于其他污染物浓度的增加，富营养化潜力和酸化潜力预计会增加；在三类发电厂中IGCC技术相较更清洁，污染排放相对更低。Liang等（2013）对应用CCS的四类燃煤发电技术的多项环境指标进行评估，发现IGCC在GWP（全球变暖潜能值）、AP（酸化潜力）和HTP（人类健康潜力）等指标中均有更好的表现，是一种更为清洁的燃煤发电技术。此外，Troy等（2016）进一步比较了IGCC发电厂不同捕获技术对臭氧消耗的影响，发现富氧燃烧捕获系统的IGCC发电厂对臭氧消耗影响最大（60.6%），其次是燃烧后（48.2%）和燃烧前捕获系统（45.9%）。

少数研究将CCS技术的环境影响纳入路径优化研究中，但未综合考虑不同路径的减排潜力、经济成本和社会影响。Yang等（2020）显示CCS虽然增加各地区的取水量，但考虑捕获过程中加强冷凝水回收处理、CO2增采地下水与回收，可缓解缺水问题。CCS还可能存在生态和健康影响。Pang等（2017）研究生物质发电厂应用CCS技术后的减排效益和生态效益之间的权衡，认为部署CCS生物质发电从生态角度是不可持续的。

* 1. **CCS技术经济社会影响评价方法**

**（1）主流模型工具的比较**

**（2）CGE模型在CCS技术研究中的应用**

目前比较成熟的CCS技术经济社会影响评价方法包括四类：投入产出模型、技术优化模型、综合评估模型和CGE模型。上述方法在CCS技术驱动机制、影响传导路径、技术演替关系、影响评价指标等方面存在较大差异。

第一类是投入产出模型。该类模型通常将电力部门拆分成包括CCS技术在内的多种发电技术，基于外生给定的发电结构情景，利用投入产出方法计算CCS技术的GDP、就业和产业影响（Koelbl等，2016）。

第二类是技术优化模型。该类模型以自下而上的方式详细刻画部门技术细节和技术成本，通过成本最小化或利润最大化刻画技术选择机制。Zhang和Chen（2022b）基于自下而上的能源系统优化模型TIMES，研究中国碳中和约束下的能源低碳转型路径，在碳排放约束下通过减排成本驱动技术选择，当边际减排成本达到CCS技术成本时，将部署CCS技术。

第三类是综合评估模型。该类模型刻画详细的能源技术，同时包括宏观经济和气候变化模块。研究课题负责人（段宏波和汪寿阳，2019）构建的CE3METL模型，引入基于传统技术扩散理论的政策驱动的多重能源技术扩散与竞争机制，包括7种可再生能源技术、CCS技术、BECCS和DAC技术。

第四类是CGE模型。该类模型基于一般均衡理论，既能刻画产业之间的关联关系，也能反映对经济、社会等多维度影响。基于CGE模型，模拟CCS技术的方法包括四类：1）外生技术进步法，该方法在相应方程中加入CCS技术减排效果和经济成本的参数，从而模拟CCS技术的经济社会影响（Xiao等，2022）。该方法的优点是易操作，但难以反映CCS技术的动态演进机制和与竞争性减排技术的竞争关系。2）边际减排成本曲线法，在CGE模型中引入由碳价格驱动的CCS技术选择函数，当碳价格达到CCS技术成本时，将启动CCS技术（Bollen，2015）。该方法链接了CCS技术与碳排放成本，但缺乏考虑技术的经济成本。3）构建提供CCS技术服务的部门，该方法在经济系统中构建提供CCS技术服务的生产部门，并刻画通过上下游关联在经济系统内的传导效应（Weng等，2021）。但该方法所需要的CCS技术投入产出关系不易获得。4）拆分部署CCS技术的生产部门，该方法将重点行业拆分成传统技术部门和部署CCS技术的部门，在两个部门之间建立替代关系，通过价格驱动选择不同的技术（Morris等，2019b）。

* 1. **国内外CCS技术支持政策研究**

1. **国外典型国家CCS技术支持政策**
2. **中国CCS技术有关政策情况**

中国总体相关政策梳理，在数量、内容上的总的趋势变化

1. **CCS技术政策影响研究**

3 课题主要研究内容、研究目标、研究思路及拟解决关键科学问题

3.1 研究目标

本研究拟在碳中和目标背景下，通过梳理国内外CCS技术发展预测及其综合影响的文献，结合全球典型国家CCS技术发展的经验特征及我国CCS技术发展现状，识别中国未来CCS技术的可能发展路径及潜在影响因素，揭示关键影响因素对CCS技术发展的内在影响机制，构建内生CCS技术的中国能源-环境-经济CGE模型，定量模拟各类CCS技术发展路径的减排潜力和经济成本，以及对不同类型产业部门产出的综合影响及其影响机制，并评估CCS技术与各类减排政策之间的协同与权衡效应，评估不同减排政策组合下CCS技术的减排效率及不同时间阶段的演变特征，遴选出碳中和目标下CCS技术成本收益最优的发展路径，为国家和行业层面的CCS技术部署研究提供分析框架，为中国实现碳中和目标的减排政策方案制定提供科学依据。

以上总目标可以分解为4个子目标：

1. 厘清CCS技术与减排成本的双向耦合机理，开发内生CCS技术的能源-经济-环境CGE模型，
2. 通过梳理国内外CCS技术发展研究，分析和比较
3. 基于不同CCS技术路线的经济成本与社会影响综合模拟分析，甄别不同减碳和中和路径下典型区域与重点行业CCS技术的最优路径。

3.2 研究内容

3.2.1 碳中和目标下中国减排措施梳理、国内外CCS技术发展现状（规模、技术成熟度、成本）、国内外主要CCS技术激励政策梳理

为模型构建与CCS未来发展情景提供数据、为CCS引入机理提供理论依据

3.2.2构建内生CCS技术的中国能源经济动态CGE模型

3.2.3 单一CCS技术对中国经济社会能源环境的影响分析

3.2.4碳中和目标约束下考量各项减排措施实施后CCS技术的综合影响分析

3.2.5 CCS技术激励政策设计及其影响研究

3.3拟解决关键问题

为完成上述研究内容，需要有以下三个关键问题需要解决：

（1）如何准确刻画CCS技术与CGE模型的双向耦合机制？

（2）如何刻画不同因素影响下CCS技术的发展路径，揭示不同CCS技术发展路径对产业部门的影响机理及行业间溢出反馈机制？

（3）如何识别CCS技术与各类减排政策间的协同与权衡效应，准确评估碳中和目标约束下不同阶段CCS技术的减排潜力（收益）与经济代价（成本）？

3.4 文章结构

1. **绪论**
   1. 研究背景
   2. 研究问题
   3. 选题意义
   4. 研究目标、内容和思路

1.4.1 研究目标

1.4.2 研究内容

1.4.3 技术路线

1. **文献综述**

2.1 CCS技术未来减排潜力、发展路径与减排成本研究

2.1.1 CCS技术未来减排潜力与发展路径研究

2.1.2 CCS技术减排成本预测研究

2.2 CCS技术发展的经济、能源和环境影响研究

2.2.1 CCS技术的经济社会影响分析

2.2.2 CCS技术的能源影响分析

2.2.3 CCS技术的环境影响

2.3 CCS技术有关研究的方法学进展

2.3.1 主流模型工具的比较

2.3.2 CGE模型在CCS技术研究中的应用

2.4 文献述评

1. **中国双碳进程及国内外CCS技术发展现状研究**

3.1 中国双碳目标进程及主要减排政策梳理

3.1.1 中国中长期减排目标

3.1.2 中国能源排放现状

3.1.3 中国主要减排政策梳理

3.2 CCS技术路线与发展现状分析

3.2.1 CCS技术在全球的应用与发展

3.2.2 中国CCS示范项目发展

3.3 国内外CCS技术支持政策梳理

3.3.1 国外典型国家CCS技术支持政策

3.3.2 中国CCS技术有关政策情况

1. **模型构建和情景设置**

4.1 CGE模型介绍

4.1.1 生产模块

4.1.2 需求模块

4.1.3 居民消费

4.1.4 出口需求

4.1.5模型闭合与动态机制

4.2 CGE模型改进

4.2.1 能源模块

4.2.2 碳税模块

4.2.3 CCS技术模块

4.3 数据库构建

4.3.1 经济和能源数据

4.3.2 CCS技术规模和成本数据

4.4 情景设置

4.4.1 基准情景构建

4.4.2 基于当前现状的CCS技术~~发展~~情景构建

4.4.3 考虑技术进步和成本下降的CCS技术~~发展~~情景构建

4.4.4 纳入CCS技术的碳中和情景构建

1. **既定XX情景下CCS技术的成本收益研究**

5.1 基于当前现状的CCS技术发展情景构建

5.2 既定情景下CCS技术的综合影响研究

5.2.1 减排潜力影响

5.2.2 宏观经济影响

5.2.3 行业产出影响

5.2.4 能源环境影响

5.3 本章小结

1. **技术进步与成本下降情景下CCS技术的成本收益研究**

6.1 考虑技术进步与成本下降的CCS技术发展情景构建

6.2 考虑技术进步与成本下降的CCS技术综合影响分析

6.2.1 减排潜力影响

6.2.2 宏观经济影响

6.2.3 行业产出影响

6.2.4 能源环境影响

6.3 本章小结

1. **CCS技术纳入双碳目标减排政策体系的影响研究**

7.1 纳入CCS技术的碳中和情景构建

7.2 CCS技术纳入减排政策体系的综合影响分析

7.2.1 纳入CCS技术对实现碳中和目标的影响

7.2.2 实现碳中和目标下纳入CCS技术的经济影响

7.2.3 实现碳中和目标下纳入CCS技术的行业产出影响

7.2.4 实现碳中和目标下纳入CCS技术的能源排放影响

7.3 本章小结

1. **结论与展望**

# 4 拟采用的研究方法、技术路线、研究方案及其可行性分析

4.1 研究思路

技术路线图

4.2 研究方法

3.2.1 文献调研和文献计量分析法（内容X）

本课题通过文献调研梳理林业碳汇供需现状和激励政策相关文献，并采用文献计量方法对林业碳汇领域研究的相关特征进行分析。文献调研法是科学研究的基础方法，针对研究目的对已有文献进行研读和深入分析，提取有用的方法和数据信息。文献计量学是借助文献各种特征的数量，采用数学与统计学的方法来描述、评价和预测科学技术现状与发展趋势的图书情报学分支学科。用数学和统计学的方法定量地分析一切知识载体的交叉科学，是集数学、统计学、文献学为一体，注重量化的综合性知识体系。与综述类的定性研究相比，知识图谱通过对已有文献进行定量分析以及可视化，可以更加直观、全面地跟踪和评估相关研究进展。利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对相关论文进行科学统计分析（赵蓉英，许丽敏，2010；李思奇等，2021）。CiteSpace 是一种信息可视化软件，着眼于分析科学论文中蕴含的潜在知识，是在科学计量学、数据和信息可视化背景下逐渐发展起来的一款多元、分时、动态的引文可视化分析软件。它可以提供引文空间的知识聚类和分布，也可以提作者、机构、国家/地区等知识单元的共现分析（陈悦等，2015）。VOSviewer 是由 Nees Jan van Eck 和 Ludo Waltman 于 2009 年开发的用以绘制科学知识图谱的文献计量分析软件，该软件具备如文献耦合、共被引、合作以及共此分析等所有常见的文献计量分析功能（高凯，2015）。综合考虑两款软件的优点，本研究综合利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对林业碳汇领域的论文进行计量分析，归纳和梳理林业碳汇相关研究进展趋势与热点问题。

3.2.2 计量和敏感性分析法（内容X）

3.2.3 可计算一般均衡模型建模方法（内容X）

（1）动态CGE模型介绍

（2）动态CGE模型结构化方程形式

（3）动态CGE模型改进

（4）数据库构建

3.2.4 情景分析法

（1）基准情景构建

（2）政策情景构建

3.2.5 产业关联分析法

3.2.6 成本-效益分析法

4.3可行性分析

4.3.1 研究方法和数据切实可行

4.3.2 研究方案设计合理可控

4.3.3 研究团队和项目支撑

4.4 可能的创新点

# 5 已有研究基础与研究条件

5.1本课题前期相关研究成果

5.2 参与主要科研项目

5.3 模型基础

5.4 经费支撑

# 6 研究工作计划与进度安排

本课题计划执行期限为三年，研究具体时间计划如下（图1）：

图1 研究计划横道图

研究各阶段具体工作安排如下：

第一阶段：模型方法学习和能源经济领域文献研究（2021.07-2022.06）。学习单国与全球尺度下CGE模型的建模方法及情景模拟分析思路，阅读国内外能源经济领域有关文献及前沿研究。

第二阶段：文献梳理及研究方案设计（2022.07-2023.06）。对中国双碳进程、CCS技术发展现状及未来发展路径、有关政府支持政策等相关文献进行系统梳理；明确研究目标和研究内容，设计研究思路和研究方案，并请教导师对本论文的研究思路、框架等进一步提出合理化的建议与修改。

第三阶段：开题及修改阶段（2023.03-2023.08）。撰写开题报告，进行开题答辩，并根据专家意见进一步修改和完善研究内容。

第四阶段：数据整理、模型构建及情景设置（2023.07-2023.09）。收集能源使用数据、CO2 排放、CCS技术部署规模与成本结构等数据，构建嵌入CCS技术模块的能源-环境-经济动态 CGE 模型，并对模型参数进行校准；构建基准情景和CCS技术发展情景。

第五阶段：情景模拟、结果分析及论文撰写（2023.09-2023.11）。模拟不同CCS技术发展情景下CCS技术减排规模及减排成本、CCS技术应用部门及产品供给部门的产出和价格的变化，通过行业关联传导效应揭示对各类行业产出的影响机理，并进一步测算对中国碳排放以及宏观经济的影响；识别CCS技术与各类减排政策之间的协同与权衡效应，评估不同减排政策组合下CCS技术的减排效率及不同时间阶段的演变特征，遴选出碳中和目标下CCS技术成本收益最优的发展路径，完成论文初稿。

第六阶段：中期检查阶段（2023.11-2024.01）。撰写中期报告，进行中期答辩，并根据专家意见进一步修改论文。

第七阶段：修订与定稿阶段（2024.01-2024.04）。在论文初稿内容的基础上，请教导师对论文进行第二稿、第三稿的指导修改和最终定稿。2024 年 4 月底前完成最终定稿及有关送审工作。

# 7 参考文献