



中国区域二氧化碳地质封存 经济可行性研究

——中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2024)

决策者摘要

自“十三五”以来，国家和各省出台了大量关于二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）的政策文件，可以明显看出，CCUS 技术需求和应用场景更加多样化，其与区域发展规划和工业空间布局的耦合备受关注。各地区推动 CCUS 产业化、规模化发展布局时，基于地区的发展需求和工业空间规划布局，分析区域二氧化碳地质封存的可行性，尤其是经济可行性，做到有的放矢、科学决策，提前布局 CCUS 发展规划，是当前面临的重要挑战之一。

2023 年 11 月 15 日，中美共同发表《关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明》，明确提出“两国争取到 2030 年各自推进至少 5 个工业和能源等领域碳捕集利用和封存（CCUS）大规模合作项目”，CCUS 封存场址优选研究是落实这项声明中所提出目标的重要科学支撑。

本研究基于国家和地方相关政策要求，充分考虑未来碳价格和二氧化碳地质封存的环境约束，以实现最小成本（包括捕集、输送、封存等成本）为目标，评估 2035-2060 年 CCUS 低速（CCUS 技术低速发展，碳价稳定增长）和强化（CCUS 技术高速发展，碳价高速增长）发展两种情景下，中国每个 10×10 公里网格二氧化碳地质封存的经济可行性（<https://ccus.cityghg.com/>）。重点解决中国每个网格在给定约束条件下，是否可以利用二氧化碳地质封存实现本网格的大幅碳减排。网格地质封存经济可行性与网格本身是否有排放源以及排放源大小无关。若网格具有地质封存经济可行性，且其内没有排放源，则该网格可以作为未来二氧化碳工业源的备选规划场址。

研究结果表明，低速情景下，2035 年全国具有封存经济适宜网格数为

零；2060年具有封存经济可行性的网格数量超过2.5万个，其中高适宜网格数达到近8000个，主要集中在西北（近3000个），其次是华北（2100个）、华中（1000个）、东北（1000个）、南方（400个）、华东（200个）。强化情景下，2035年具有封存经济可行性的网格数量达1万个，其中高适宜网格数达到近3400个，主要集中在西北（1500个），其次是华北（860个）、东北（600个）、华中（350个）、南方（70个）、华东（60个）；2060年具有封存经济可行性网格数量增加至2.6万个，其中高适宜网格数达到近8000个，主要集中在西北（3000个），其次是华北（2100个）、华中（1000个）、东北（1000个）、南方（400个）、华东（200个）。

评审专家

杜祥琬	中国工程院	中国工程院院士
丁一汇	国家气候中心	中国工程院院士
李 阳	中国石油化工股份有限公司	中国工程院院士
谢玉洪	中国海洋石油集团有限公司	中国工程院院士
王金南	生态环境部环境规划院	中国工程院院士
邹才能	中国石油深圳新能源研究院有限公司	中国科学院院士
姜培学	清华大学	中国科学院院士
潘家华	中国社会科学院	中国社会科学院学部委员
魏一鸣	北京理工大学	教授
雷涯邻	中国地质大学（北京）	教授
李 政	清华大学	教授
张希良	清华大学	教授
严 刚	生态环境部环境规划院	研究员
张 昕	国家应对气候变化战略研究和国际合作中心	研究员
王香增	陕西延长石油（集团）有限责任公司	首席科学家
吕学都	亚洲开发银行	首席气候变化专家

作者

蔡博峰	生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
李琦	中国科学院武汉岩土力学研究所
张贤	中国 21 世纪议程管理中心
许晓艺	中国科学院武汉岩土力学研究所
郭静	生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
庞凌云	生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
刘桂臻	中国科学院武汉岩土力学研究所
谭永胜	中国科学院武汉岩土力学研究所
李霞颖	中国科学院武汉岩土力学研究所
徐亮	中国科学院武汉岩土力学研究所
严妍	华南理工大学
吴赞龙	首都经济贸易大学
于雷	生态环境部环境规划院战略规划研究所
牛韧	生态环境部环境规划院战略规划研究所
周云峰	生态环境部环境规划院生物多样性与自然保护地研究中心
阮建辉	中国科学院大学
伍鹏程	清华大学万科公共卫生与健康学院
马乔	山东大学

目录CATALOG

01 /	背景	01/07
02 /	技术路线	08/10
03 /	封存场址评估	11/13
04 /	情景设置	14/16
05 /	地质封存经济可行性评估	17/22
06 /	典型区域分析-以山西省为例	23/25
	参考文献	26/31
	附录	32/75
	附件1 二氧化碳地质封存经济可行性评估方法	
	附件2 “双碳”目标下中国各省份CCUS相关政策和规划	
	附件3 中国CCUS示范项目一览表	



An aerial photograph of an industrial plant, likely a refinery or chemical processing facility, set against a backdrop of green agricultural fields and a clear sky. The facility features several large, cylindrical storage tanks in the foreground, a complex network of pipes and distillation columns in the middle ground, and various industrial buildings. The overall scene is well-lit, suggesting a bright day.

1. 背景

1. 背景

“ 二氧化碳 (CO₂) 捕集利用与封存 (CCUS) 是指将 CO₂ 从工业过程、能源利用或大气中分离出来, 通过工程手段实现其减排并 / 或获得附带效益的过程。CCUS 是目前实现化石能源低碳化利用的唯一技术选择, 是目前实现大规模温室气体减排的重要技术手段, 是钢铁、水泥、有色、化工等难减排行业深度脱碳的可行技术方案, 是实现碳中和目标技术组合的重要构成部分。 ”

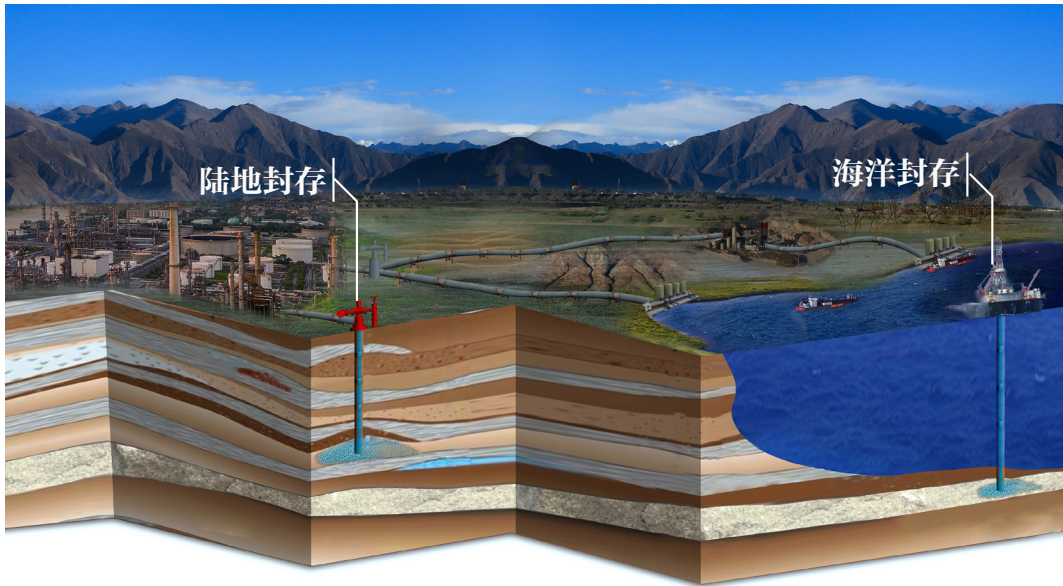


图 1 CCUS 技术及陆海封存示意图

CO₂ 捕集是指将 CO₂ 从工业生产、能源利用或大气中分离出来的过程，主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链燃烧。

CO₂ 输送是指将捕集的 CO₂ 运送到可利用或封存场地的过程。根据运输方式的不同，分为罐车运输、船舶运输、管道运输和火车运输。管道运输优点在于大规模、长距离。

CO₂ 利用是指通过工程技术手段将捕集的 CO₂ 实现资源化利用的过程。根据工程技术手段的不同，分为地质利用、化工利用和生物利用，其中地质利用是将 CO₂ 注入地下，生产或强化能源、资源开采的过程，主要用于提高石油、地热、卤水、铀矿等资源采收率。

CO₂ 地质封存是指通过工程技术手段将捕集的 CO₂ 储存于深部地质构造中，实现与大气长期隔绝的过程。根据地质封存体的不同，分为陆上咸水层封存、海底咸水层封存、枯竭油气田封存等。在所有封存类型中，深部咸水层封存占据主导位置，其封存容量占比约 98%，且分布广泛，是较为理想的 CO₂ 封存场所；油气藏由于存在早期完整的构造、详细的地质勘探基础等条件，是适合 CO₂ 封存的地质场所。根据《中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究》，全球陆地 CO₂ 理论封存容量为 6~42 万亿吨，海底理论封存容量为 2~13 万亿吨，中国 CO₂ 理论地质封存容量为 1~4 万亿吨。



图2 CCUS 技术环节

CCUS 地质封存潜力评估对于提高项目可行性和经济性至关重要，已有 CCUS 项目地质封存潜力评估研究综合考虑排放源和封存汇的空间位置以及经济性，建立最优输送路径，实现 CO₂ 源汇之间封存量、经济性等方面的动态最优化匹配。海陆统筹规划，单阶段静态评估到多阶段动态优化，是 CCUS 亟需解决的关键科学问题。

国内外以地理信息系统(GIS)目标优化方法和混合整数优化(MILP)方法开展了多项 CCUS 封存潜力评估工作，经历了单阶段静态评估到多阶段动态优化的演化过程，呈现出局部区域优化部署转入 CCUS 规模化、集群化方向发展

的新趋势。已有研究应用最小成本路径分析(LCPA)方法寻求以成本效益最优的方式实现碳减排，满足无国家骨干管网(针对 CCUS 运输)和无 CCUS 集群、无规模化或商业化早期应用的需求。

欧美针对 CCUS 源汇匹配以

及集群运输管网数学模型开展了深入研究。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 2009 年提出 SimCCS 模型，采用预优化思想规划 CCUS 基础设施建设，允许管道合并与分支，实现了多源多汇的高效匹配；2012 年，在 SimCCS 模型基础上开发了 SimCCS TIME 模型，该模型能够在空间和时间上优化 CO₂ 管网，解决了 CO₂ 捕集地点、捕集量以及捕集时间的匹配问题；2020 年 SimCCS 2.0 模型集成了多个新功能，包括精细化的优化模型、新的候选网络生成技术，以及与高性能计算平台的集成。欧盟委员会联合研究中心 2011 年开发了 InfraCCS 模型，将源汇匹配问题简化为混合整数问题，实现了单级静态规划和多级动态规划功能，并结合 GIS 和能源系统平台（MARKAL），开发了 MARKAL-NI-UU 模型，用于规划荷兰 CCUS 基础设施建设。

中国科学院武汉岩土力学研究

所自主研发了全流程 CCUS 系统评价方法（ITEAM-CCUS），由源汇匹配（包括技术经济评价）、CO₂ 排放评估和封存场地适宜性评价 3 大模块组成，涉及全国、行业和企业三种尺度，源汇匹配采用 GIS 空间分析技术以及成本矩阵获取平准化成本最低的源汇组合序列清单。清华大学通过贪婪算法中的气泡排序生成运输封存成本曲线，建立 ChinaCCUS DSS 模型，ChinaCCUS DSS 2.0 版本中使用 MILP，考虑了排放源连接到多个汇以及运输路线中多个源共用管道的情景。

在 CO₂ 运输路径寻优方面，管道运输成本取决于地理条件，例如地形、环境生态等级、土地利用类型等，若给定某个地区的运输成本组成，则可以应用 LCPA 方法计算从起点到终点经济成本最小的运输路线。Middleton 等（2020）采用最小成本路径分析法实现 12 个

CO₂ 源和两个深海玄武岩储层的优化部署。Chen 等（2010）使用 GIS 软件基于成本最低目标的源汇匹配模型，考虑管道的基本建设成本和因地形条件而产生的额外成本，估算中国河北省 88 个排放点源到 25 个封存汇成本最小的管道运输路径。

国家和各省出台的相关政策文件充分表明，CCUS 技术需求和应用场景更加多样化，除了考虑已有工业源外，未来新建工业源 CCUS 配套备受关注，CCUS 与区域发展规划和工业空间优化的耦合成为决策重点。借鉴已有 CCUS 地质封存潜力评估方法，同时面向已有工业源改造和未来工业源布局，评估中国区域二氧化碳地质封存经济可行性，是当前 CCUS 管理决策的重点科技需求。

“十四五”时期，CCUS 作为碳中和兜底技术作用凸显，国家顶层设计和地方性规划和政策，对 CCUS 的战略部署和重点任务要求与“十二五”“十三五”时期相比均发生明显转变（见附件 2）。

一是发展目标和重点任务更加明确。由纲领性要求逐渐转变为更具体、更明确甚至分阶段的技术发展目标 and 任务要求，强调 CCUS 项目的集成化、规模化发展。《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》提出“推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用，加快建设全流程、集成化、规模化二氧化碳捕集利用与封存示范项目”；《工业领域碳达峰实施方案》提出，钢铁行业 CCUS 等技术取得突破应用，建材行业实现窑炉 CCUS 技术产业化示范，石化化工行业要加快部署大规模

CCUS 产业化示范项目。

二是 CCUS 技术需求和应用场景更加多样化。CCUS 技术部署更加注重领域化、专业化要求，同时强调与工业减排或负碳技术的耦合。地方结合自身的优势、CCUS 技术及产业发展、高排放工业行业布局等因素，对 CCUS 技术规划的应用场景更加丰富。除 CO₂ 驱油技术外，各地方加大对钢铁、水泥等行业推广应用力度。在国家和地方的规划中还提到探索开展 CO₂ 海洋封存技术示范，体现了中国 CCUS 部署由陆地向海洋领域的拓展。

三是强调 CCUS 技术本身的能效提升和成本降低。CCUS 技术在应用过程中需要额外的能源消耗，对其提出全生命周期能效提升和成本降低要求，真正体现了利用 CCUS 技术减排、推动行业企业绿色低碳转型初衷，同时也意味着作为重要减排技术，对 CCUS 的利用

从“粗放”式向“精细”化的科学转变。

中国对 CCUS 的规划部署要求体现了由开展试点示范到推动集成化、规模化发展的决策转变。中国 CCUS 项目（见附件 3）特点由对单一领域、技术的发展向提出多领域、多技术的耦合转变，由注重技术本身带来的减排效果到同时注重 CCUS 技术全生命周期的能源消耗转变。既体现了中国当下 CCUS 产业和技术整体发展的现状，也契合了“双碳”目标下 CCUS 技术向精细化、多样化和绿色低碳化过渡，以及大规模商业应用的迫切需求。基于地区的发展需求和工业空间规划布局，分析评估中国区域 CO₂ 地质封存经济可行性，做到有的放矢、科学决策，提前布局 CCUS 发展规划，是支撑当前 CCUS 管理决策的重点科技需求。



2. 技术路线

2. 技术路线

“ 基于未来碳价格和环境、地质约束，以实现最小成本（包括捕集、输送、封存等成本）为目标，评估 2035-2060 年 CCUS 低速和强化发展两种情景下，中国每个 10×10 公里网格二氧化碳地质封存经济可行性。重点解决中国每个网格在给定约束条件下，是否可以利用二氧化碳地质封存，实现该网格的大幅碳减排。 ”

基于成本的中国 CO₂ 地质封存经济可行性评估共分为五个部分：

（1）评估封存场址的适宜性，即确定 CO₂ 汇的适宜性。（2）以网格为单元，分析 CO₂ 源的捕集、封存等环节的成本。（3）针对管道运输方式，通过构建网格成本阻抗评价模型，寻优最小管道运输成本路径。从自然环境、社会经济等角度选取生态红线、土地利用类型、地表坡度、环境地质等级和人口密度等评价指标，构建网格成本阻抗评价模型，确定网格成本阻抗系数，并采用 Dijkstra 算法计算最小

成本路径上的管道输送成本系数。

（4）CO₂ 地质封存经济可行性评估。基于最小成本路径方法对中国全域网格进行源汇匹配，在不同情景下评估每个网格在 2035-2060 年期间 CO₂ 地质封存的经济可行性。

（5）典型区域 CO₂ 地质封存的经济可行性评估。

CO₂ 封存成本主要包括运行成本、固定成本和环境成本。运行成本指地质封存技术实际操作过程中，各个环节所需要的成本投入；固定成本是地质封存技术的前期投资，如设备安装、占地投资等；环

境约束主要由地质封存技术可能产生的环境影响和环境风险所致。本研究以运行成本为研究重点，定义 CO₂ 地质封存运行总成本（TC），包括捕集成本（CC）、管道输送成本（PC）、封存成本（SC）三部分组成。技术路线如图 3 所示（详细评估方法见附件 1）。

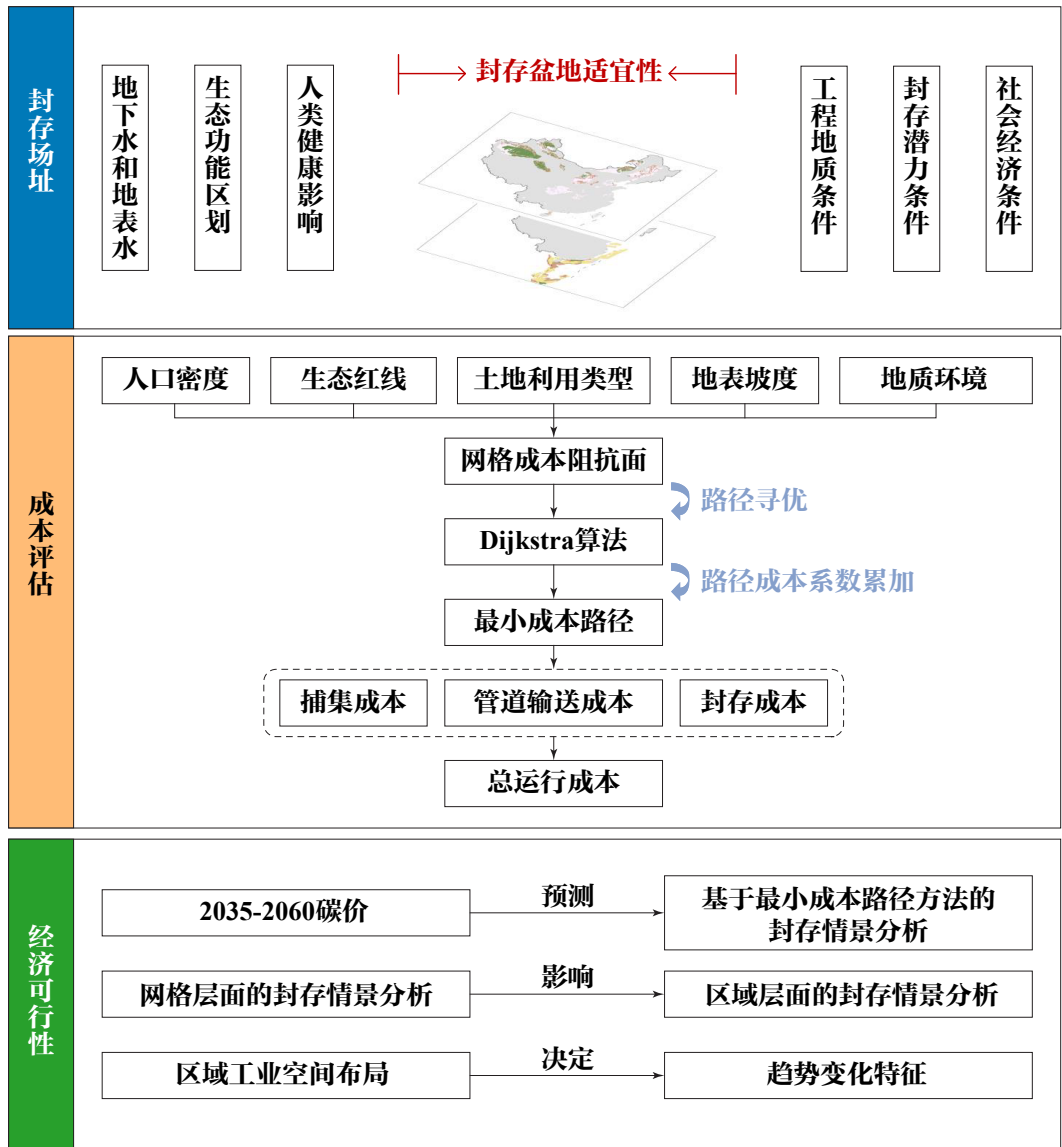


图 3 技术路线图

The background image shows a large industrial complex with numerous tall smokestacks emitting thick white plumes of smoke. In the foreground, there is a fenced-in area with a curved path and some vegetation. The overall scene is somewhat hazy, suggesting an industrial or environmental context.

3. 封存场址评估

3. 封存场址评估

科学合理的场地适宜性评价和选址工作是实现 CO₂ 地质封存的前提条件。目前中国已开展多项适宜性评价工作，本研究中国沉积

盆地适宜性评价结果来源于 Cai 等（2017）研究将中国沉积盆地适宜性分为 I、II、III、IV 四级，由低到高分别转换为低适宜（I）、一

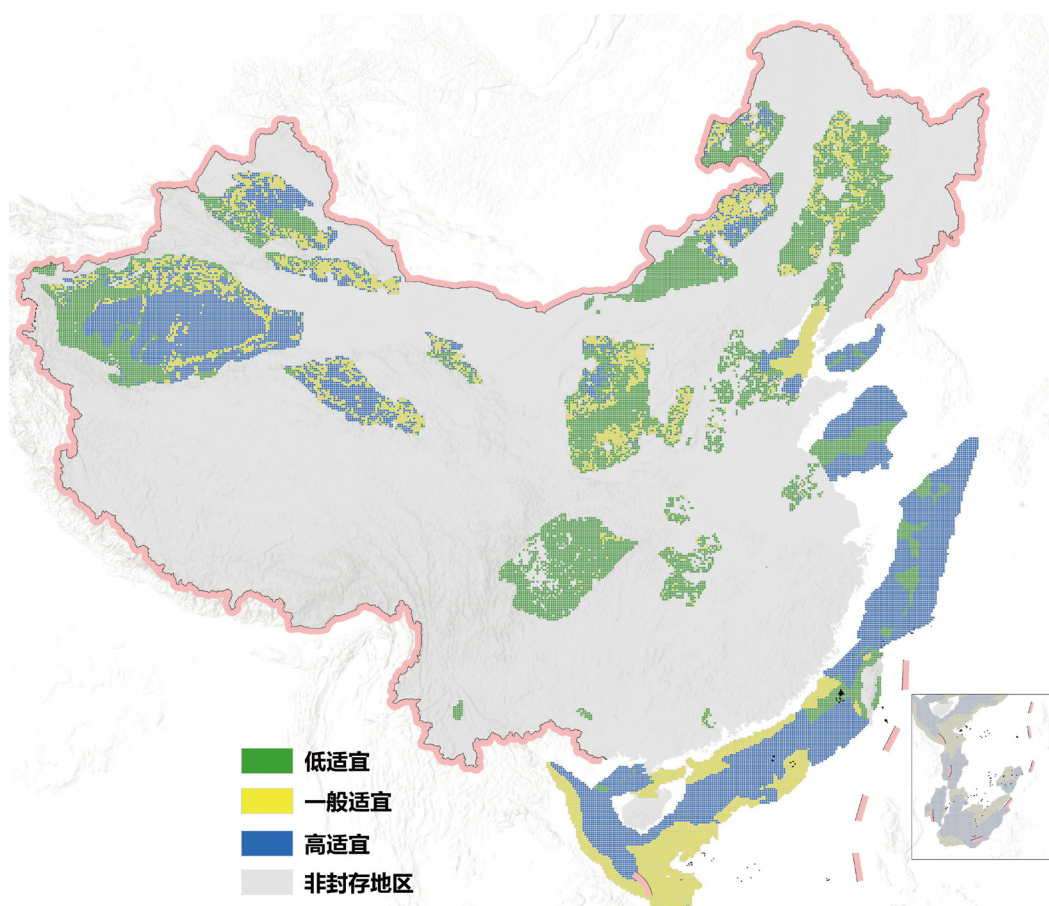


图 4 中国沉积盆地 CO₂ 封存适宜性

般适宜（II、III）、高适宜（IV）三类。中国海域沉积盆地适宜性数据来自于中国地质调查局水文地质环境地质调查中心发布的《中国及毗邻海域主要沉积盆地二氧化碳地质储存适宜性评价图（1:500万）》，将中国海域盆地分为不适宜（A）、较不适宜（B）、一般适宜（C）、较适宜（D）和适宜（E）五级，由低到高分别转换为低适宜（A、B）、一般适宜（C、D）、高适宜（E）三类。Cai 等（2017）考虑了地质适宜性和环境适宜性，设立了杀手指标排除不适宜区域，然后采用四分法进行综合评价，中国地质调查局水文地质环境地质调查中心的评估主要考虑地质适宜性，将地质安全性、储存规模、社会环境风险和经济适宜等指标分为 5 个等级，其中不适宜类似于杀手指标。在经济性评价中并未使用适宜性条件，不影响经济评价结果。中国海陆沉积盆地适宜性整合结果如图 4 所示。

The background image shows two tall, white and blue industrial smokestacks with thick plumes of grey smoke rising into a cloudy sky. In the center, there is a complex of industrial structures, including a large metal framework. The foreground is a lush green landscape with a body of water at the bottom. The overall scene is semi-transparent, allowing the text to be clearly visible.

4. 情景设置

4. 情景评估

根据《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）——中国 CCUS 路径研究》对 2035-2060 年 CCUS 各环节技术成本（捕集成本、封存成本、运输成本）的预测¹，综合已有研究、领域权威专家对未来中国碳市场价格的预测，分别建立低速情景、强化情景评估未来中国 CO₂ 地质封存经济可行性。两种情景考虑因素如下：

低速情景：中国 CCUS 工程项目以较低速度发展，主要考虑 CCUS 捕集成本较高且未能快速下降，同时碳市场 CO₂ 价格保持较为稳定的增长速度。

强化情景：CCUS 不断实现技术突破，CCUS 成本持续显著下降，且碳市场 CO₂ 价格保持较快增长趋势。

为评估两种情景下封存总成本计算结果的不确定性范围，本研究分别构造捕集成本、封存成本、运输成本参数正态分布函数，依据其函数分布，采用蒙特卡洛模拟方法基于网格单元从 2035-2060 年每 5 年分别随机抽取 10000 次捕集成本、封存成本、运输成本的模拟结果，并计算每个网格 10000 次封存总成本的 95% 置信区间，作为网格封存总成本的不确定性范围。低速情景、强化情景下 2035-2060 年 CO₂ 地质封存总成本的 95% 置信区间范围分别为 $\pm 1.05\%$ ， $\pm 1.32\%$ 。

¹ 重点考虑捕集成本、运输成本、封存成本，未考虑管道建设等固定资产投资成本。

表 1 情景参数

情景	年份	捕集 (元 / 吨)	封存 (元 / 吨)	运输 (元 / (吨·千米))	碳价格 (元 / 吨)
低速情景	2035	70~400	35~40	0.4~0.6	200
	2040	60~310	30~35	0.35~0.5	300
	2050	50~200	25~30	0.3~0.45	600
	2060	30~150	20~25	0.25~0.4	800
强化情景	2035	60~350	30~35	0.3~0.5	300
	2040	50~250	20~30	0.25~0.45	400
	2050	30~150	15~25	0.2~0.3	800
	2060	20~100	10~20	0.15~0.2	1000

注：数据基于全国碳市场成交数据、国际能源署（IEA）、世界银行（World Bank）、《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）——中国 CCUS 路径研究》以及高水平学术期刊文章公开资料等信息，并咨询领域权威专家综合评估得到。对于各情景参数取值的预测，本报告未考虑宏观经济环境与能源市场变化、全国碳市场行业扩围、产业结构转变、关键技术突破以及排放主体心理预期调整等因素对各情景参数的影响，因此预测结果可能会带来一定的不确定性。



5. 地质封存经济可行性评估

5. 地质封存经济可行性评估

基于情景模拟过程，评估低速情景、强化情景下 2035-2060 年中国 CO₂ 地质封存经济可行性。网格地质封存经济可行性与网格本身是否有排放源以及排放源大小无关，网格具有地质封存经济可行性，如果其内没有排放源，则该网格可以作为未来工业源的规划场址备选。

将 2035-2060 年每个网格封存总成本低于对应年份所预测碳价格的网格定义为地质封存经济可行性网格。以网格为评价单元，按照 2035-2060 年全国封存经济可行性可以从高到低分类，即高适宜（前 30%）、一般适宜（30%~70%）、低适宜（后 30%）²。为进一步方便分析，本研究重点讨论和分析低速情景、强化情景下 2035 年和 2060 年网格封存经济可行性的分

布特征及其封存潜力。

低速情景下，2035 年全国无封存经济适宜网格。随着未来碳价格缓慢增长，CO₂ 捕集成本较高但未能快速下降，2060 年全国封存经济可行性网格数量超过 2.5 万个（图 5），其中高适宜网格数达到近 8000 个，主要集中在西北（近 3000 个），其次是华北（2100 个）、华中（1000 个）、东北（1000 个）、南方（400 个）、华东（200 个）。

² 研究团队基于大数据、云计算以及在线 GIS 等技术，开发了中国 10km*10km 网格分辨率的地质封存经济可行性平台（<https://ccus.cityghg.com/>），旨在掌握中国每个网格在给定约束条件下的封存经济适宜性。后续随着研究的深入，将会持续更新该平台。

强化情景下，未来碳价格快速增长，封存技术成本大幅降低，2035 年具有封存经济可行性的网格数量超过 1 万个（图 6），其中高适宜网格数达到近 3400 个，主要集中在西北（1500 个），其次是华北（860 个）、东北（600

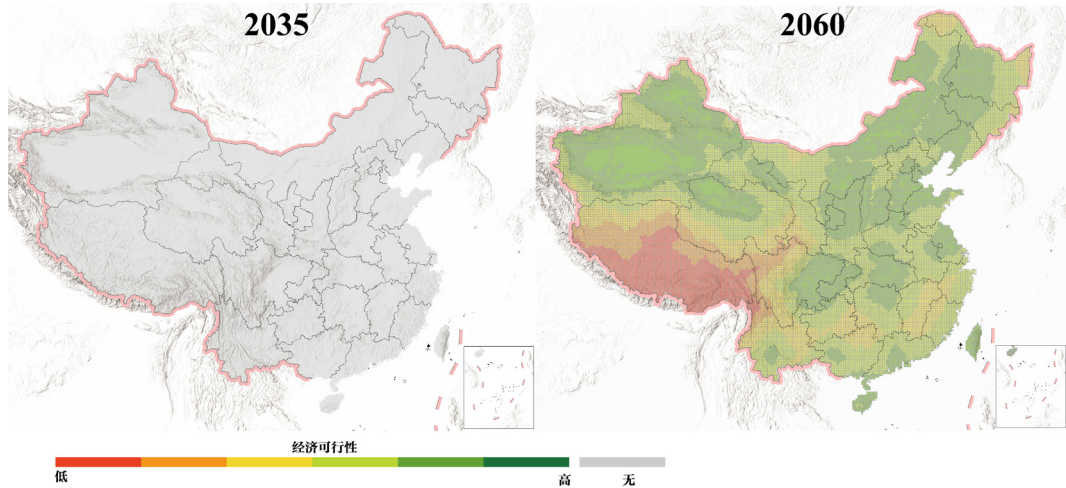


图 5 低速情景下 2035 和 2060 年中国 CO₂ 地质封存经济可行性

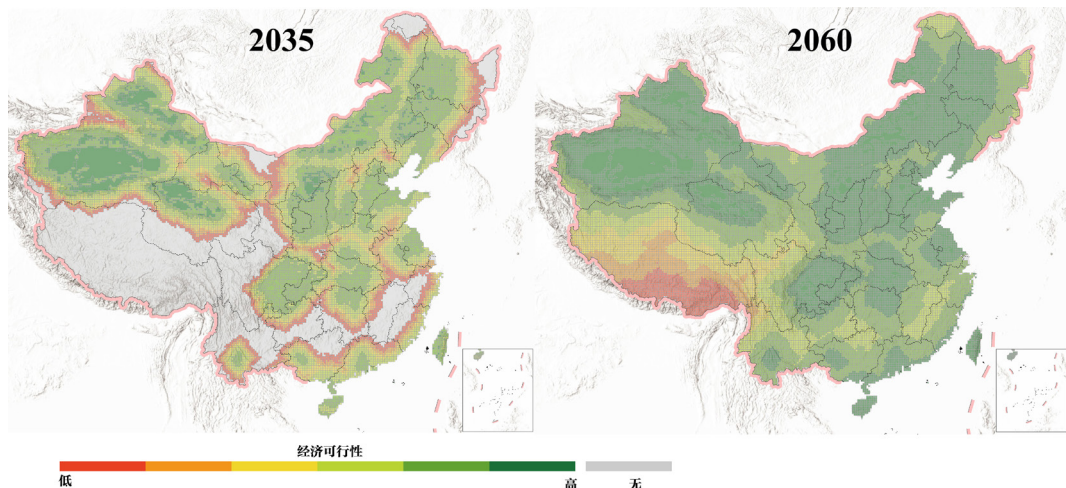


图 6 强化情景下 2035 和 2060 年中国 CO₂ 地质封存经济可行性

注：针对具有封存经济可行性的网格，按照其封存总成本从小到大排序划分三类，即高适宜（前 30%）、一般适宜（30%（含）~70%）、低适宜（后 30%）。

个)、华中(350个)、南方(70个)、华东(60个)。2060年可封存网格数量增加至2.6万个(图6),其中高适宜网格数达到近8000个,主要集中在西北(3000个),其次是华北(2100个)、华中(1000个)、东北(1000个)、南方(400个)、华东(200个)。

在省份层面上,低速情景下2060年高适宜网格主要分布在新疆中部(2000个)、内蒙古中部(1400个)、青海西北部(350个)、山西北部(300个)、陕西北部(300个)、四川东部(300个)、辽宁西部(240个)、重庆西部(170个)、江苏东部(150个)等多个区域,高适宜网格累计数量占到全国70%以上。重庆、山西、陕西、新疆、辽宁、青海、内蒙古、江苏等地区约50%以上的网格均被评价为具有较高的封存经济可行性。

强化情景下,2035年高适宜

网格主要分布在新疆大部分地区(1000个)、内蒙古中部(620个)、黑龙江西部(350个)、吉林西北部(170个)、青海西北部(150个)、陕西北部(150个)、四川东部(130个)等多个区域,高适宜网格累计数量占到全国75%以上。新疆、陕西、吉林、黑龙江等地区约30%左右的网格被评价为具有较高的封存经济可行性。

2060年高适宜网格主要分布在新疆大部分地区(2000个)、内蒙古中西部(1400个)、黑龙江西部(500个)、青海西北部(350个)、甘肃西北部(330个)、山西中部及北部(300个)、陕西北部(300个)、四川东部(300个)等多个区域,高适宜网格累计数量占到全国70%以上。重庆、山西、陕西、新疆、辽宁、内蒙古等地区约超过55%以上的网格被评价为具有较高的封存经济可行性。

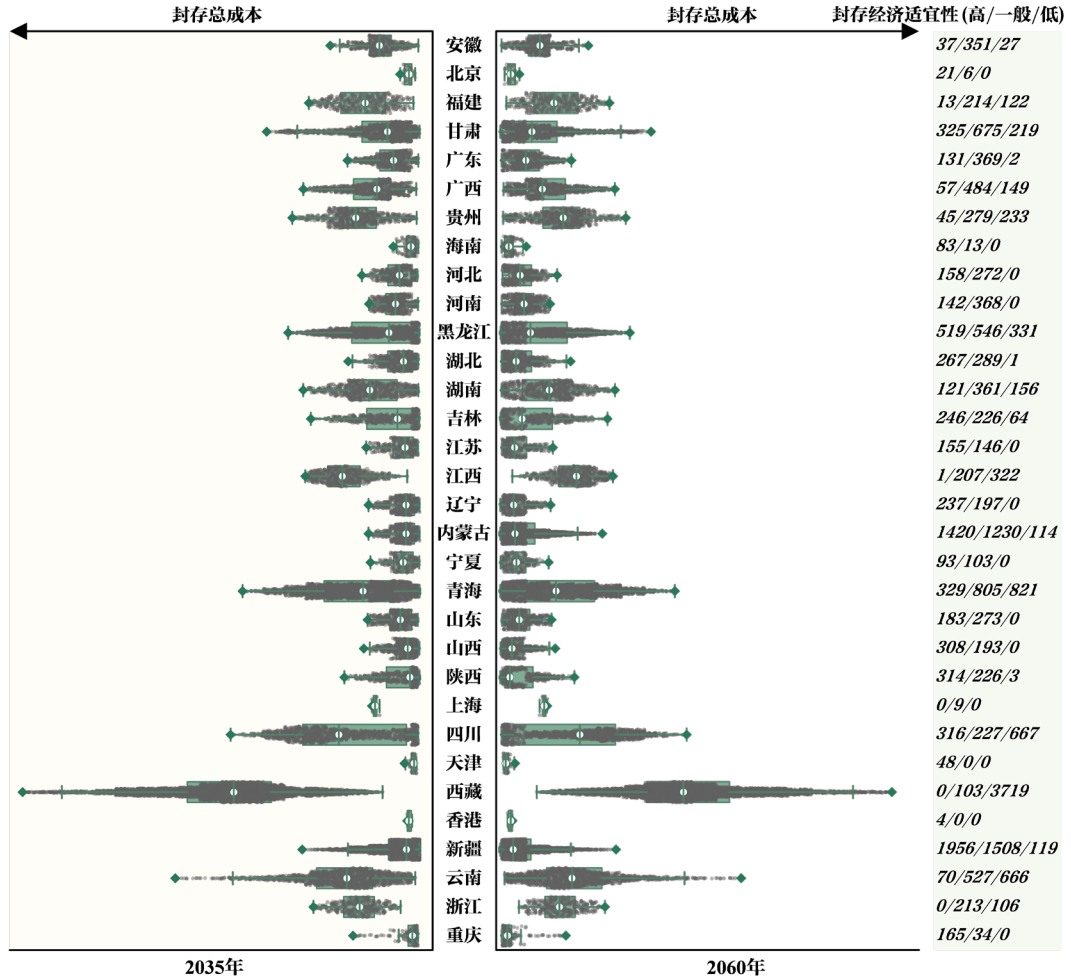


图7 低速情景下2035和2060年中国分省CO₂地质封存经济可行性评价

注：左图、右图分别代表低速情景下2035年、2060年各省基于网格单元的封存总成本，按照箭头所指的方向，封存总成本越来越高，相应的封存经济可行性越来越低。针对具有封存经济可行性的网格，按照其封存总成本从小到大排序划分三类，即高适宜（前30%）、一般适宜（30%（含）~70%）、低适宜（后30%）。图中最右侧括号中数值代表在具有封存经济可行性的前提下2060年各省高适宜、一般适宜、低适宜网格的数量。低速情景下2035年无封存经济可行性网格。

通过以上对低速情景、强化情景 2035 年和 2060 年 CO₂ 地质封存经济可行性分析，当未来全国碳市场碳价格达到每吨 800 元左右时，在不考虑固定投资成本的前提下，由碳价格上涨所带来的收益可以抵销因采用封存技术而产生的成本，除西藏外的全国大部分地区封存经济可行性网格均可达到地区最大封存网格数量。

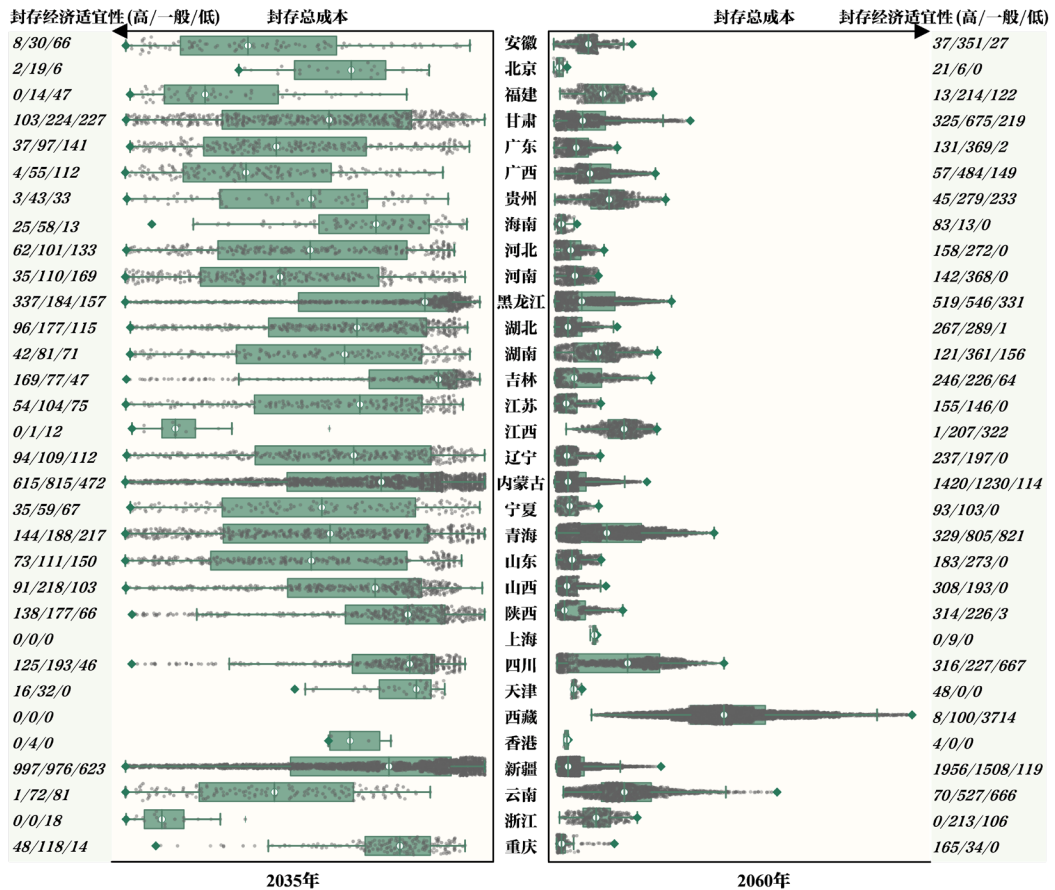


图 8 强化情景下 2035 和 2060 年中国分省 CO₂ 地质封存经济可行性评价

注：左图、右图分别代表强化情景下 2035 年、2060 年各省基于网格单元的封存总成本，按照箭头所指的方向，封存总成本越来越高，相应的封存经济可行性越来越低。针对具有封存经济可行性的网格，按照其封存总成本从小到大排序划分三类，即高适宜（前 30%）、一般适宜（30%（含）~70%）、低适宜（后 30%）。图中最右侧括号中数值代表在具有封存经济可行性的前提下 2035 年、2060 年各省高适宜、一般适宜、低适宜网格的数量。



6. 典型区域分析-以山西省为例

6. 典型区域分析 - 以山西省为例

山西省是中国重要的煤炭资源大省，也是中国重要的煤化工基地，属于典型的高碳经济省份，其碳排放总量、碳排放强度和人均碳排放均位居全国前列。在地理位置上，山西省左临鄂尔多斯盆地，地处沁水 - 临汾盆地，源汇匹配条件较为优越，封存适宜性较高，约 52% 的省内网格域被评估为“一般适宜”、“高适宜”。

山西省 CO₂ 排放的空间分布差异明显（图 9），2022 年排放量最高的网格达到 2181 万吨。由晋北、晋中到晋南呈现明显的聚集性，北部以大同为代表，中部集中于太原、吕梁等地区，南部集中于晋城、运城等地区。

晋北地区高排放网格区域集中在大同市，以煤炭开采、煤焦化、煤电、水泥等高排放行业为主；

晋中地区高排放网格区域集中在太原、吕梁、晋中等城市，以煤炭开采、煤焦化、煤电、钢铁、铸造产业、玻璃器皿等高排放行业为主；晋南地区高排放网格区域集中在运城、晋城等城市，以煤焦化、煤电、钢铁等高排放行业为主。因此，对于山西省未来碳减排，必须要处理好能源安全、经济发展与节能降碳的关系，同时也要处理好省内排放与能源外送的关系，而积极探索大规模、低成本 CO₂ 地质封存技术是山西省实现“双碳”目标的最有效手段之一。

依据强化情景封存潜力评价结果，2035-2060 年山西省具备 CO₂ 地质封存经济可行性的网格主要集中在山西中部、南部，这与其 CO₂ 排放源空间分布基本一致。例如，临汾、吕梁和运城是山西省排放最

高的三个地级市，以煤焦化、煤电、钢铁等高排放行业为主，其 2022 年排放量分别为 9327 万吨、8669 万吨和 8206 万吨，占全省总排放的 42%，位于沁水 - 临汾封存盆地周边，具有绝佳的封存地理位置优势、较大的封存经济可行性。针对山西省高碳排放源的空间分布，考虑到管道运输成本、运输距离以及源汇匹配条件，建议未来优先向省内的沁水 - 临汾盆地开展地质封存规划布局。

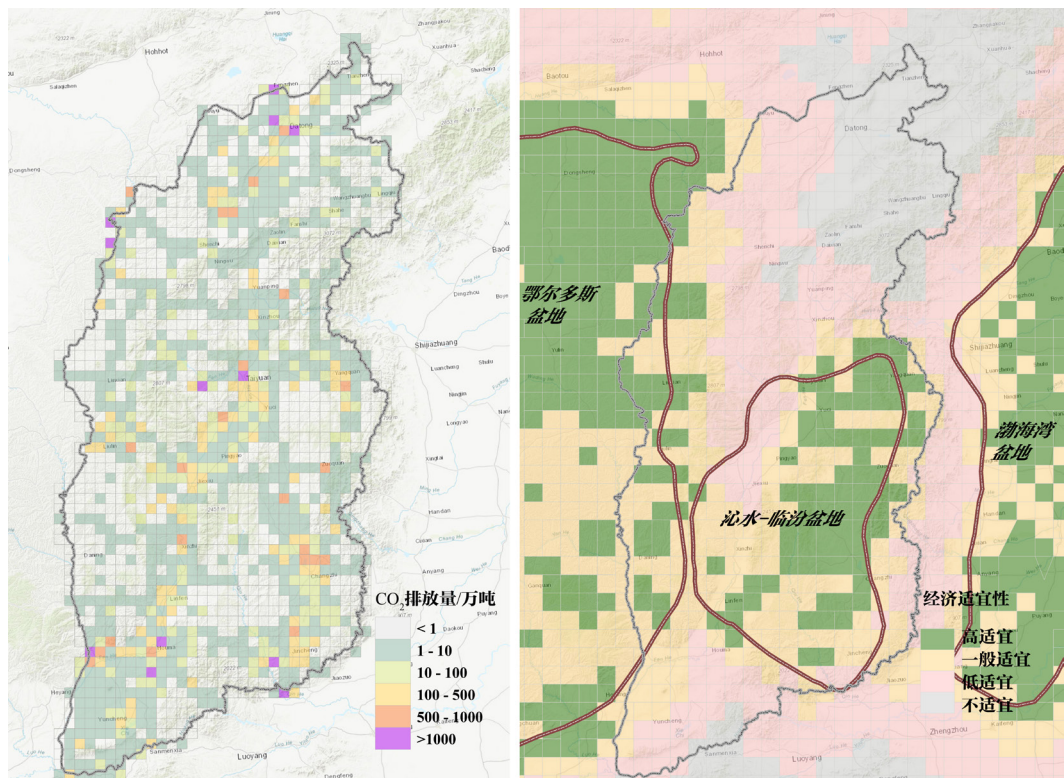


图 9 2022 年山西省 CO₂ 排放及 CCUS 地质封存经济适宜性（强化情景）

参考文献

- Al Baroudi H, Awoyomi A, Patchigolla K, et al. A review of large-scale CO₂ shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage[J]. *Applied Energy*, 2021, 287: 116510.
- Bagli S, Geneletti D, Orsi F. Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31(3): 234-239.
- Cai B, Li Q, Liu G, et al. Environmental concern-based site screening of carbon dioxide geological storage in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7598.
- Carneiro J F, Mesquita P. Definition of CCS Provinces with multi-criteria and least cost path analysis[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 2645-2654.
- Chen W, Le Nindre Y M, Xu R, et al. CCS scenarios optimization by spatial multi-criteria analysis: Application to multiple source sink matching in Hebei province[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(2): 341-350.
- Chinese Academy of Environmental Planning (CAEP), Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (IRSM-CAS), the Administrative Center for China's Agenda 21 (ACCA21). China status of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) 2021-China CCUS pathway[R]. Environmental Planning Institute, Beijing, 2021.
- Chong F K, Lawrence K K, Lim P P, et al. Planning of carbon capture storage deployment using process graph approach[J]. *Energy*, 2014, 76: 641-651.
- d'Amore F, Bezzo F. Economic optimisation of European supply chains for CO₂ capture, transport and sequestration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 65: 99-116.
- d'Amore F, Mocellin P, Vianello C, et al. Economic optimisation of European supply chains for CO₂ capture, transport and sequestration, including societal risk analysis and risk mitigation measures[J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 401-415.
- Diamante J A R, Tan R R, Foo D C Y, et al. A graphical approach for pinch-based source-sink matching and sensitivity analysis in carbon capture and storage systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52: 7211-7222.
- Durmaz A I, Ünal E Ö, Aydın C C. Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: A case study of the Mus project in Turkey[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(4): 173.
- Fan J-L, Xu M, Wei S, et al. Carbon reduction potential of China's coal-fired power plants based on a CCUS source-sink matching model[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2021, 168: 105320.
- Garg A, Shukla P R, Parihar S, et al. Cost-effective architecture of carbon capture and storage (CCS) grid in India[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 66: 129-146.

- Ghiat I, Al-Ansari T. A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF nexus[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 45: 101432.
- Gyabeng B A, Bernard A. Selection of optimum petroleum pipeline routes using A multi-criteria decision analysis and GIS least-cost path approach[J]. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2020, 10(6): 572-579.
- Hamid-Mosaku I A, Oguntade O F, Ifeanyi V I, et al. Evolving a comprehensive geomatics multi-criteria evaluation index model for optimal pipeline route selection[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(10): 1382-1396.
- Hasan M M F, Boukouvala F, First E L, et al. Nationwide, regional, and statewide CO₂ capture, utilization, and sequestration supply chain network optimization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(18): 7489-7506.
- Hasan M M F, Boukouvala F, First E L, et al. Nationwide, regional, and statewide CO₂ capture, utilization, and sequestration supply chain network optimization[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(18): 7489-7506.
- Hasan M M F, First E L, Boukouvala F, et al. A multi-scale framework for CO₂ capture, utilization, and sequestration: CCUS and CCU[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 81: 2-21.
- Hong W Y. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2022, 3: 100044.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). Review of offshore monitoring for CCS projects[R]. IEAGHG, Cheltenham, United Kingdom, 2015.
- International Energy Agency (IEA). CCUS in clean energy transitions[R]. IEA, Paris, France, 2020.
- International Energy Agency (IEA). Enhancing China's ETS for carbon neutrality: Focus on power sector[R]. IEA, Paris, France, 2022. <https://www.iea.org/reports/enhancing-chinas-ets-for-carbon-neutrality-focus-on-power-sector>
- International Energy Agency (IEA). Net zero by 2050[R]. IEA, Paris, France, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). Global landscape of renewable energy finance 2020[R]. IRENA, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2020.
- Kim C, Kim K, Kim J, et al. ractical deployment of pipelines for the CCS network in critical conditions using MINLP modelling and optimization: A case study of South Korea[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 73: 79-94.
- Lau H C, Ramakrishna S, Zhang K, et al. The role of carbon capture and storage in the energy transition[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 7364-7386.
- Li X, Wei N, Liu Y, et al. CO₂ point emission and geological storage capacity in China[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2793-2800.
- Li Y, Wang R, Zhao Q, et al. A CO₂ storage potential evaluation method for saline aquifers in a petroliferous basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 484-491.
- Li, X, Wei, N, Jiao, Z, Liu, S, Dahowski, R. Cost curve of large-scale deployment of CO₂-enhanced

- water recovery technology in modern coal chemical industries in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 81: 66-82.
- Lin B, Tan Z. How much impact will low oil price and carbon trading mechanism have on the value of carbon capture utilization and storage (CCUS) project? Analysis based on real option method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: 126768.
- Liu G, Cai B, Li Q, et al. China's pathways of CO₂ capture, utilization and storage under carbon neutrality vision 2060[J]. *Carbon Management*, 2022, 13(1): 435-449.
- Liu S, Wei N, Jiang D, et al. Emission reduction path for coal-based enterprises via carbon capture, geological utilization, and storage: China energy group[J]. *Energy*, 2023, 273: 127222.
- Llamas B, Cienfuegos P. Multicriteria decision methodology to select suitable areas for storing CO₂[J]. *Energy & Environment*, 2012, 23(2-3): 249-264.
- Mac Dowell N, Fennell P S, Shah N, et al. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 243-249.
- Massol, O; Tchong-Ming, S and Banal-Estanol, A. Capturing industrial CO₂ emissions in Spain: Infrastructures, costs and break-even prices[J]. *Energy Policy*, 2018, 115: 545-560.
- Middleton R S, Bielicki J M. A comprehensive carbon capture and storage infrastructure model[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1611-1616.
- Middleton R S, Kuby M J, Wei R, et al. A dynamic model for optimally phasing in CO₂ capture and storage infrastructure[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37: 193-205.
- Middleton R S, Yaw S P, Hoover B A, et al. SimCCS: An open-source tool for optimizing CO₂ capture, transport, and storage infrastructure[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 124: 104560.
- Mo J, Zhang W, Tu Q, et al. The role of national carbon pricing in phasing out China's coal power[J]. *IScience*, 2021, 24:102655.
- Morbee J, Serpa J, Tzimas E. Optimal planning of CO₂ transmission infrastructure: The JRC InfraCCS tool[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2772-2777.
- Morbee J, Serpa J, Tzimas E. Optimised deployment of a European CO₂ transport network[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 7: 48-61.
- Qi S, Cheng S, Tan X, et al. Predicting China's carbon price based on a multi-scale integrated model[J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119784.
- Schoots K, Rivera-Tinoco R, Verbong G, et al. Historical variation in the capital costs of natural gas, carbon dioxide and hydrogen pipelines and implications for future infrastructure[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(6): 1614-1623.
- Sun L, Chen W. Development and application of a multi-stage CCUS source-sink matching model[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1424-1432.
- Sun L, Chen W. The improved ChinaCCS decision support system: A case study for Beijing-Tianjin-Hebei Region of China[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 793-799.
- Tan Raymond R, Aviso Kathleen B, Bandyopadhyay Santanu, et al. Continuous-Time Optimization Model for Source-Sink Matching in Carbon Capture and Storage Systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(30): 10015-10020.

- Tang H T, et al. Assessing Representative CCUS Layouts for China's Power Sector toward Carbon Neutrality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55: 11225-11235.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global warming of 1.5°C[R]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2018.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Mitigation of Climate Change[R]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2022.
- The International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). CCUS projects in Europe[R]. IOGP, London, United Kingdom, 2022.
- Thengane S K, Tan R R, Foo D C Y, et al. A pinch-based approach for targeting carbon capture, utilization, and storage systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(8): 3188-3198.
- van den Broek M, Brederode E, Ramírez A, et al. Designing a cost-effective CO₂ storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(12): 1754-1768.
- Van Den Broek M, Mesquita P, Carneiro J, et al. Region specific challenges of a CO₂ pipeline infrastructure in the west Mediterranean area model results versus stakeholder views[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 3137-3146.
- Wang Y, Wang J, Gao M, et al. Cost-based siting and sizing of energy stations and pipeline networks in integrated energy system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 235: 113958.
- Wei N, Jiao Z, Ellett K, et al. Decarbonizing the coal-fired power sector in China via carbon capture, geological utilization, and storage technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 13164-13173.
- Wei N, Li X, Fang Z, et al. Regional resource distribution of onshore carbon geological utilization in China[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2015, 11: 20-30.
- Wei N, Li X, Liu S, et al. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103420.
- Wei N, Li X, Wang Y, et al. A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 12: 231-246.
- Wei Y M, Kang J N, Liu L C, et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2°C climate target[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(2): 112-118.
- Wei Y M, Li X Y, Liu L C, et al. A cost-effective and reliable pipelines layout of carbon capture and storage for achieving China's carbon neutrality target[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134651.
- World Bank. State and trends of carbon pricing 2022[R]. World Bank, Washington DC, USA, 2022.
- Wu Q, Lin Q, Yang Q, et al. An optimization-based CCUS source-sink matching model for dynamic planning of CCUS clusters[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2022,

- 12(4): 433-453.
- Yan Y, Borhani T N, Subraveti S G, et al. Harnessing the power of machine learning for carbon capture, utilisation, and storage (CCUS)-a state-of-the-art review[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(12): 6122-6157.
- Yildirim V, Yomralioglu T, Nisanci R, et al. A spatial multicriteria decision-making method for natural gas transmission pipeline routing[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, 13(5): 567-580.
- Zhang J, Wang Z, Kang J, et al. Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 17.
- Zhang X, Li K, Wei N, et al. Advances, challenges, and perspectives for CCUS source-sink matching models under carbon neutrality target[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 12.
- 蔡博峰,李琦,张贤,等.中国21世纪议程管理中心.中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究[R].生态环境部环境规划院,北京,2021.
- 蔡博峰,李琦.中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)[R].生态环境部环境规划院,北京,2020.
- 曹珂,吴林强,王建强,等.我国海洋地质碳封存研究进展与展望[J].*中国地质调查*, 2023,10(2):72-76.
- 刁玉杰,刘廷,魏宁,等.咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路[J].*中国地质*, 2023, 50(3): 943-951.
- 葛美玲,封志明.中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J].*地理学报*,2009,64(2): 202-210.
- 郭建强,金晓琳,贾小丰,等.中国及毗邻海成主要沉积盆地叙化碳地质储存适宜性评价图[M].地质出版社,北京,2017.
- 郭建强,文冬光,张森琦,等.中国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程[J].*中国地质调查*,2015,2(4):36-46.
- 霍传林.我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D].大连海事大学,大连市,2014.
- 焦念志,刘纪化,石拓,等.实施海洋负排放 践行碳中和战略[J].*中国科学:地球科学*, 2021, 51(4): 632-643.
- 李琦,刘桂臻,蔡博峰,等.二氧化碳地质封存环境风险评估的空间范围确定方法研究[J].*环境工程*, 2018, 36 (2): 27-32.
- 李琦,刘桂臻,李小春,等.多维度视角下CO₂捕集利用与封存技术的代际演变与预设[J].*工程科学与技术*,2022,54(1):157-166.
- 李琦,魏亚妮,刘桂臻.中国沉积盆地深部CO₂地质封存联合咸水开采容量评估[J].*南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 93-96.
- 李小春,刘延锋,白冰,等.中国深部咸水含水层CO₂储存优先区域选择[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(5):963-963.
- 李小春,张九天,李琦,等.中国碳捕集、利用与封存技术路线图(2011版)实施情况评估分析[J].*科技导报*,2018, 36(4): 85-95.

- 刘桂臻,李琦.气候变化背景下二氧化碳地质封存的盆地级选址评价方法[J].气候变化研究快报,2014,3(1): 13-19.
- 刘延锋,李小春,白冰.中国CO₂煤层储存容量初步评价[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16): 2947-2952.
- 刘延锋,李小春,方志明,等.中国天然气田CO₂储存容量初步评估[J].岩土力学,2006,27(12): 2277-2281.
- 魏一鸣,余碧莹,唐葆君,等.中国碳达峰碳中和路径优化方法[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(4): 3-12.
- 许晓艺,李琦,刘桂臻,等.基于多准则决策的CO₂地质封存场地适宜性评价方法[J].第四纪研究,2023,43(2): 551-559.
- 张力为,李琦.二氧化碳地质利用与封存的风险管理[M].中国科学出版社,北京,2020.
- 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.
- 张贤.碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景[J].可持续发展经济导刊,2020(12): 22-24.
- 中国标准出版社. 国土调查坡度分级图制作技术规定 (TD/T 1072-2022) [S]. 北京, 2022.
- 中国标准出版社. 生态保护红线监管技术规范生态功能评价 (试行) (HJ 1142-2020) [S]. 北京, 2020.
- 中国标准出版社. 石油天然气工业管道输送系统 (GB/T 24259-2009) [S].北京, 2009.
- 中国标准出版社. 土地利用现状分类 (GB/T 21010-2017) [S]. 北京, 2017.

A photograph of a nuclear power plant with three large cooling towers emitting white steam. The scene is set against a bright, hazy sky with a sun flare on the left. In the foreground, there is a field of yellow and white flowers. The word "附录" is centered in the middle of the image.

附录

附件 1 二氧化碳地质封存经济可行性 评估方法

A1.1 网格成本阻抗评价模型构建

综合自然环境因素和社会经济因素的影响选取人口密度分布、生态红线值、土地利用类型、地表坡度和环境地质等级五个指标作为管道运输成本的网格阻力因子。其中，地形因素（坡度）是管道选线基础的选线条件，对管道选线影响较大，线路应布设在坡度较缓、地势平坦等有利于管道工程施工、运营维护的区域，当坡度大于 20° 时，管道施工难度以及管道用材量随之增加，费用成本相对提升。土地利用类型对管道建设成本各不相同，

管道选线要尽量避免永久性冰川雪地，从成本方面以及安全性方面考虑，通过沙地、戈壁、耕地等此类区域优于通过城乡、工矿等居民用地。生态红线值以及环境地质等级越高的地区管道建设成本越高。人口密集区同样会加大管道建设困难。多因素管道运输选线方法通常采用 AHP 层次分析法与专家打分相结合的方法来确定各种因素的权重，以权重为基础建立多因素综合成本阻抗面，并在综合成本阻抗面上实现最优线路的计算。

AHP 方法的具体步骤如下：第一步，建立系统的递阶层次结构模型；第二步，对同一制约层次上各元素对上层次各准则的相对重要性进行两两比较，构造两两比较判断矩阵，由指标之间优越性相互对比得出的相对值，即优越性权值。依据 CO_2 地质封存管道运输成本评价指标，来设计专家打分表。对

影响因子重要性相互对比采用 Santy 标度法（表 A1），通过相互之间重要性对比，建立重要性成对比较判断矩阵。第三步，针对判断矩阵进行一致性检验：

1) 计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ ， λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值， n 为评价指标数量；

2) 查找对应的平均随机一致性指标 RI ；

表 A1 平均随机一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

3) 计算一致性比例 $CR = \frac{CI}{RI}$ ，如果 $CR < 1$ ，则可认为判断矩阵的一致性可以接受；否则需要对判断矩阵进行修正。

第四步，根据判断矩阵计算各个指标的权重。

各指标因子对管道运输成本影响的评价结果以及因子分类如表 A2 所示。

表 A2 管道运输成本影响因子

指标序号 (i)	网格成本因子	分类	成本倍增系数 (c _i)	权重 (W)
1	人口密度	< 500	1	0.0915
		500-2500	2	
		2500-5000	3	
		5000-10000	4	
		>10000	5	
2	土地利用类型	沙地、戈壁、盐碱地、裸土地	1	0.2001
		耕地	2	
		城乡、工矿、居民用地	3	
		水田、水域、沼泽、	5	
		永久性冰川雪地	10	

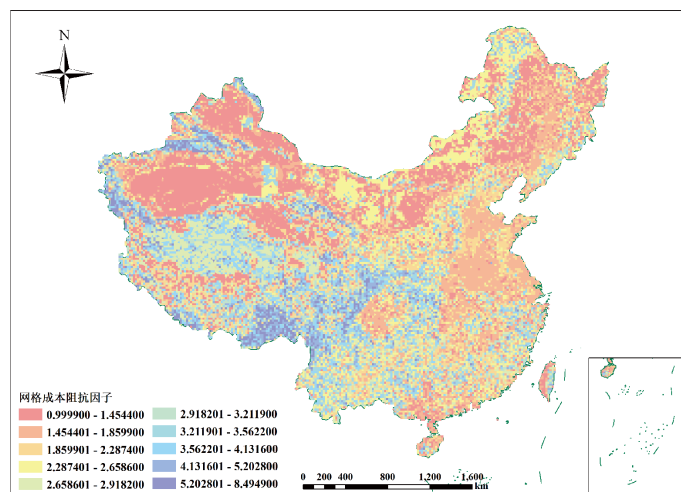
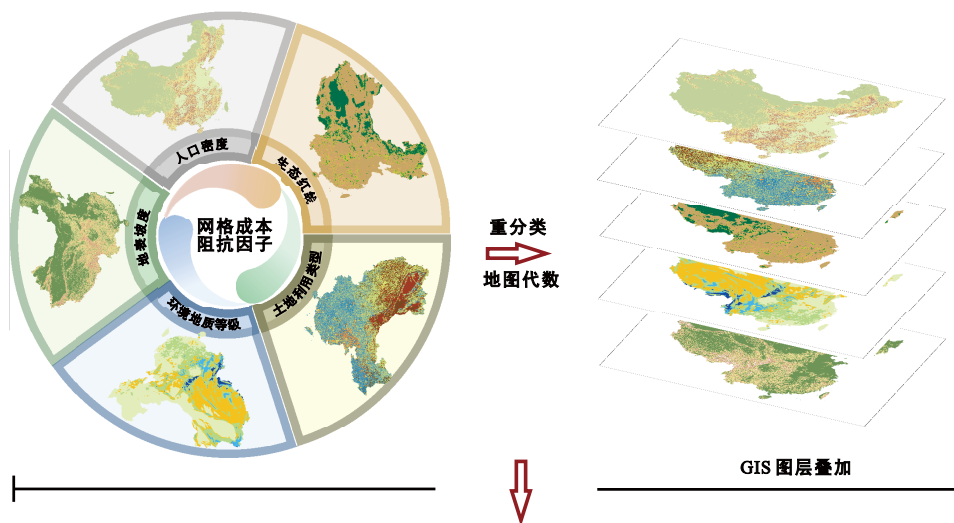
指标序号 (i)	网格成本因子	分类	成本倍增系数 (c _i)	权重 (w _i)
3	生态红线值	<10%	1	0.1783
		10%-30%	2	
		30%-50%	3	
		50%-80%	5	
		>80%	10	
4	地表坡度	< 10°	1	0.4165
		10°-20°	3	
		20°-30°	5	
		30°-40°	7	
		>40°	10	
5	环境地质等级	I	1	0.1136
		II	3	
		III	4	
		IV	5	
		V	7	

注：Hamid-Mosaku et al., 2020; Carneiro et al., 2014; Schoots et al., 2011; van den Broek et al., 2010; 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析；GB/T 24259-2009 (ISO 13623:2017)；HJ 1142-2020 中华人民共和国国家环境保护标准；GB/T 21010-2017 土地利用现状分类；TD/T 1072-2022 国土调查坡度分级图制作技术规定。

由 AHP 层次分析法权重评价结果与成本倍增系数 (c_i) 相结合建立多因素综合成本阻抗面 (CF)，计算公式如下：

$$CF = \sum_{i=1}^5 c_i \cdot w_i$$

评估流程和结果如 2-1 所示，结果显示由 AHP 方法评估网格成本阻抗的离散化以及精细化程度较高，网格属性系数值较高的网格，成本阻抗系数较大。



网格成本阻抗面

图 A1 网格成本阻抗评价模型构建

A1.2 Dijkstra 算法寻优最小成本路径

本研究中 CO₂ 地质封存源汇匹配基于最小成本路径分析 (LCPA) 思想, 应用 Dijkstra 算法寻找每个网格像元(起点)到封存盆地(终点)的最经济运输路线, 并统计路线的最小累积成本。Dijkstra 算法最早是由荷兰计算机科学家 DIJKSTRA 于 1956 年提出, 该算法是一种经典的求解最短路径的图搜索算法, 实质为一种贪心算法。Dijkstra 算法适用于路线权值为正的有向或无向图, 利用广度优先的搜索思想, 其主要特点是以起始点为中心向外层层扩展, 直到扩展至目标点为止。即在无向图 $G=\{V,E\}$ 中,

V 表示顶点集合, E 表示连结顶点的边的集合。设 $g(v)\{v|v \in V\}$ 为从起点开始, 到顶点 v 的最短路径。则有 $g(v_t)=\min(g(v_s)+e_{st})\{e_{st}|e_{st} \in E\}$ 。在本研究中, 每个栅格代表图的一个顶点 v , 每个顶点与其东、西、南、北相邻的四个点引一条边 e , 边权值为终点的网格阻抗因子, 寻找累计网格成本阻抗最小的路径。每个栅格代表图的一个顶点 v , 每个顶点与其东、西、南、北相邻的四个点引一条边 e , 边权值为终点的阻抗因子。Dijkstra 的算法流程如下 (图 A2):

(1) 创建管道输送系数表 D , 表示从起点到每个顶点 $v\{v|v \in V\}$ 的输送成本系数, 初始值设置为无穷大, 起始点的输送成本系数设置为起始点的网格阻抗因子;

(2) 创建最小堆, 最小堆的每个结点 n 包含顶点 v , 输送成本系数 d , 表示从起点到当前顶点的路径输送成本系数值; 路径 p , 表示从起点到当前

点的路径，最小堆按照每个节点的路径输送成本系数值排序；

(3) 将起始点 n 放入最小堆中， $n.v$ 为起始点， $n.d$ 为起始点的网格阻抗因子， $n.p$ 为起始点路径；

(4) 从最小堆中取出路径输送成本系数值最小的节点作为 n_s ，如果 $n_s.d > D_{v_s}$ ，说明在之后遍历时，经过 v_s 时，存在更短的路径，当前路径肯定不是最优解，重新执行步骤 4；

(5) 对 $n_s.v$ 进行扩展，如果 $D_{v_t} > D_{v_s} + e_{st}, \{ \forall e_{st} | v_t \notin n_s.p, e_{st} \in E, v_s = n_s.v \}$ ，由于存在网格阻抗因子为 0 的点，因此可能会出现环路，于是 $v_t \notin n_s.p$ 保证未走过环路， $e_{st} \in E, v_s = n_s.v$ 表示以 v_s 为起点的所有边。则将 n_t 放入最小堆中， $n_t.v = v_t, D_{v_t} = D_{v_s} + e_{st}, n_t.d = D_{v_t}, n_t.p = n_s.p + v_t$ ；如果 v_t 是封存场址， $n_t.d$ 为起始点最小输送成本系数值，算法执行结束。否则继续执行步骤 5；跳转 4。

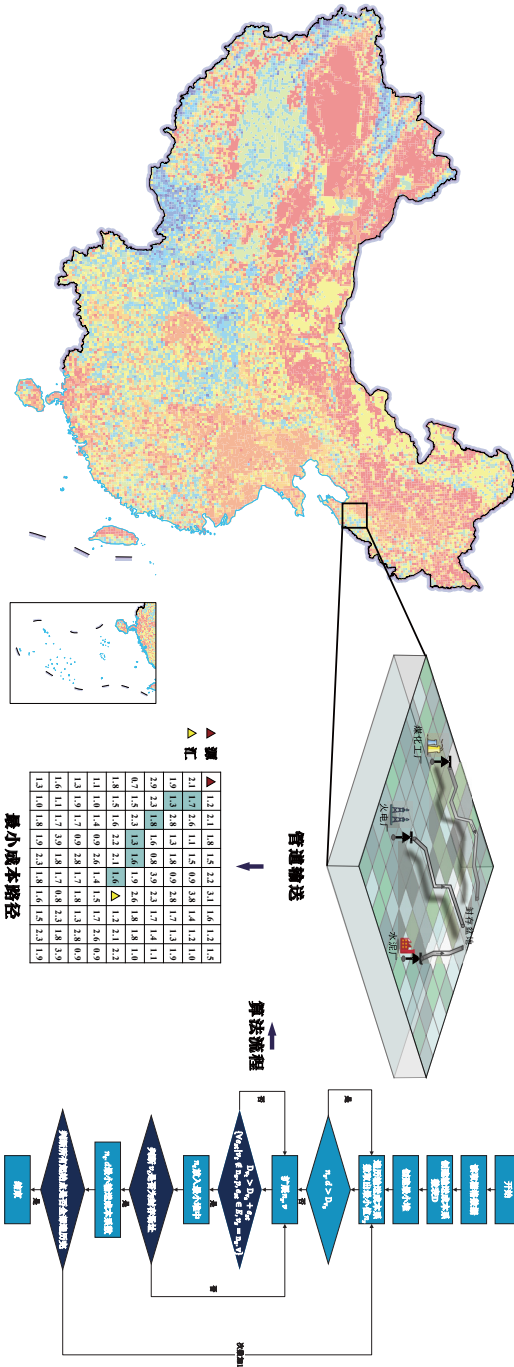


图 A2 最小成本路径与算法流程

附件 2 “双碳”目标下中国各省份 CCUS 相关政策和规划

地区	政策名称	主要内容
国家“1+N”政策 顶层设计	《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》	推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用 加快建设全流程、集成化、规模化二氧化碳捕集利用与封存示范项目。
	《2030 年前碳达峰行动方案》	5 处提到 CCUS，从工业领域碳达峰行动，科技创新、资金和国际合作等方面提出要求。建设全流程、集成化、规模化二氧化碳捕集利用与封存示范项目。
重点领域 / 行业 达峰方案	《推动能源绿色低碳 做好碳达峰工作的实施方案》	研发新一代高效、低能耗碳捕集材料、吸收剂和装置，加强大型二氧化碳增压输送技术研究，力争突破二氧化碳封存监测、泄露预警等核心技术，开展二氧化碳资源化利用技术研发。推进准噶尔盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地等油气 CCUS 产业示范基地建设。
	《工业领域碳达峰实施方案》	钢铁，碳捕集利用封存等技术取得突破应用。建材，实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化示范。石化化工，到 2025 年，加快部署大规模碳捕集利于封存产业化示范项目。
	《减污降碳协同增效实施方案》	推动碳捕集利用与封存技术在工业领域应用。
	《石化化工行业碳达峰实施方案》	围绕石化化工行业节能减排、二氧化碳捕集利用、可再生资源制氢或植被生物基材料等领域
	科技支撑碳达峰碳中和实施方案	聚焦 CCUS 技术的全生命周期能效提升和成本降低，当前以二氧化碳捕集和利用技术为重点，开展 CCUS 与工业过程的全流程深度耦合技术研发示范，着眼长远加大 CCUS 与清洁能源融合的工程技术研发，开展矿化封存、路上和海洋地质封存技术研究，力争到 2025 年实现单位二氧化碳捕集能耗比 2020 年下降 20%，到 2030 下降 30%，实现捕集成本大幅下降。

地区	政策名称	主要内容
	《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》	到 2030 年，碳捕集利用与封存及生态碳汇标准逐步健全。加快生态系统固碳和增汇、碳捕集利用与封存直接空气碳捕集等碳清除技术标准研制。
吉林省	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实施意见	规模化碳捕集利用与封存技术
成渝地区	成渝地区双城经济圈碳达峰碳中和联合行动方案	重点布局三峡生态环境、碳捕集与利用等技术创新中心和创新平台
天津市	天津市碳达峰实施方案	鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点。
天津市	天津市工业领域碳达峰实施方案	加强可再生能源、碳捕集封存等技术对钢铁、石化化工、建材等传统产业升级的支撑作用。
		发挥我市在二氧化碳提纯、二氧化碳驱油、加氢制甲醇等技术先发优势，突破二氧化碳化学利用和转化技术难题，开展 CCUS 与工业过程的全流程深度耦合技术研发与示范。
		石化化工。加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目。
天津市	天津市科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）	推进碳中和基础前沿技术储备。固碳端，以碳捕集利用与封存（CCUS）、生态系统固碳、碳汇监测等为突破重点，加快二氧化碳人工合成淀粉的持续攻关，推进负碳技术研发。
		固碳端：推动负碳技术研究，重点开展空气中直接捕集二氧化碳、二氧化碳高值转化利用、碳汇智能监测等技术研究。

地区	政策名称	主要内容
		<p>加强 CCUS 技术的全生命周期能效提升和成本降低攻关，突破二氧化碳化学利用和转化技术难题，开展矿化封存技术研究，推进 CCUS 与工业过程的全流程深度耦合技术研发与示范。</p> <p>碳捕集封存利用：开展低成本低能耗二氧化碳捕集、低成本规模化二氧化碳化工和生物利用等技术，研究 CCUS 与工业流程耦合技术、与生物质集合的负碳技术（BECCS）以及碳捕集关键材料和分离利用核心装备研发。开展 CCUS 全流程关键技术示范。</p>
河北省	河北省科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2023-2030 年）	<p>二氧化碳高效捕集及利用技术。研究基于新材料、新体系的高效低成本二氧化碳捕集技术，研究光 / 电催化、生物催化二氧化碳转化高附加值利用技术。</p>
		<p>CCUS 技术。研发高效低成本二氧化碳捕集、高值化利用技术，探索开展二氧化碳地质封存潜力评估技术研究与工程示范，集成研究钢铁、建材、化工等跨领域二氧化碳捕集及转化利用耦合技术。</p>
		<p>负碳技术示范。支持 CCUS 全链条技术集成，建设万吨级化学吸收二氧化碳捕集应用场景示范工程，探索开展二氧化碳地质封存、海洋封存技术示范。</p>
		<p>绿色低碳示范区。支持雄安新区、承德国家可持续发展议程创新示范区、河北·京南国家科技成果转移转化示范区、张家口可再生能源示范区等区域，跨领域大规模集成能源、工业、建筑、交通等领域以及碳汇和 CCUS 等绿色低碳技术，在我省农业产业化先进县综合开展光伏农业、光储直柔建筑、农林废物清洁能源转化利用、分布式能源等技术集成示范。</p> <p>低碳零碳负碳技术标准。支持企事业单位在新能源和可再生能源、绿色低碳工业、建筑、交通、CCUS、储能等领域，参与低碳零碳负碳技术国际、国家、行业标准制修订，推动与国家标准、行业标准配套的低碳零碳负碳技术地方标准研制。</p>
河北省	河北省工业领域碳达峰实施方案	<p>推动绿色低碳技术创新。突破推广一批高效储能、能源电子、氢能、碳捕集利用封存、温和条件二氧化碳资源化利用、工业低温废热能源化再生利用等关键核心技术。</p>
		<p>钢铁。到 2030 年，富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁、碳捕集利用封存等技术取得突破应用，电炉炼钢占比达到 15% 以上。</p>

地区	政策名称	主要内容
		建材。到 2030 年，在水泥、玻璃、陶瓷等行业改造建设一批减污降碳协同增效的绿色低碳生产线，实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化示范。
		石化化工。到 2025 年，加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目。
内蒙古自治区	内蒙古自治区碳达峰实施方案	鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、碳捕集利用等试点示范，推动低品位余热利用。
		探索可再生能源开发与零碳技术、负碳技术、绿氢制取技术、绿氢与二氧化碳利用转化的耦合技术研究。
内蒙古自治区	内蒙古自治区工业领域碳达峰实施方案	化工。加快重点企业、重点耗能设备、生产流程的节能改造，加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目
		推动绿色低碳技术重大突破。开展低碳前沿技术研究，实施低碳零碳工业流程再造工程，探索实施氢冶金，突破一批高效储能、氢能、碳捕集利用封存等关键核心技术。
黑龙江省	黑龙江省工业领域碳达峰实施方案	碳捕集、利用与封存。引导高耗能高碳排放企业开展碳捕集、利用与封存技术研发和工艺设备应用，加强碳捕集、利用与封存项目扶持力度，推动重点行业开展碳捕集、利用和封存试点、二氧化碳高值利用和跨行业协同应用，促进碳捕集、利用和封存的商业化和产业化发展。
		加强绿色低碳前瞻技术布局。集中优势资源发展碳捕集关键技术、二氧化碳高值化利用技术、大规模储能技术、氢能技术等前瞻技术。

地区	政策名称	主要内容
		<p>石化化工行业碳达峰行动。开展重点工艺环节高浓度二氧化碳捕集、利用和封存试点示范，发展二氧化碳利用联动驱油，推进跨地域跨行业高效应用。……。到2030年，短流程合成技术实现规模化应用，实现利用和封存二氧化碳规模化产业化。</p> <p>技术创新应用。加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目，推动大庆油田扩大二氧化碳驱油技术应用，创建全国最大的二氧化碳捕集利用与封存基地。</p> <p>建材行业碳达峰行动。推进碳捕集利用封存产业化示范项目。……。在水泥、玻璃等行业改造建设减污降碳协同增效的绿色低碳生产线，实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化。技术创新应用。进一步引导亚泰水泥、佳星玻璃等企业开展窑炉烟气二氧化碳捕集提纯等碳捕集封存利用技术和工艺的研发应用。</p>
上海市	上海市碳达峰实施方案	<p>深入推进产业绿色低碳转型。培育壮大新能源、新能源汽车、节能环保、循环再生利用、储能和智能电网、碳捕集及资源化利用、氢能等绿色低碳循环相关制造和服务产业。</p> <p>推动钢铁行业碳达峰。探索开展气基竖炉氢冶炼技术、碳捕集及资源化利用示范试点。</p> <p>强化基础研究和前沿技术布局。加快布局一批前瞻性、战略性的前沿科技项目，聚焦深远海风电、储能和新型电力系统、可控核聚变发电、绿氢制储、零碳炼钢、二氧化碳资源化利用、生物基高分子材料化工、生物质航空燃料、核动力船舶、碳捕集和封存、超高效光伏电池、人工光合作用等低碳零碳负碳重点领域，深化应用基础研究。</p> <p>加快先进适用技术研发和推广应用。推进建设二氧化碳捕集利用与封存示范项目，加快氢能技术研发和示范应用。</p> <p>完善经济政策。市、区政府要加大节能减排和应对气候变化专项资金投入力度，加强对节能环保、新能源、低碳交通、绿色低碳建筑、碳捕集利用等项目和产品技术的支持</p>
上海市	上海市能源电力领域碳达峰实施方案	<p>强化前沿技术研发和核心技术攻关。探索实施燃煤电厂二氧化碳捕集、利用与封存示范项目。</p>

地区	政策名称	主要内容
上海市	上海市科技支撑碳达峰碳中和实施方案	<p>负碳技术能力提升科技创新行动。聚焦 CCUS 关键技术研发和全流程示范验证，提升全生命周期能效并降低成本，支撑我市碳中和目标的高质量实现。</p>
		<p>碳捕集利用封存：针对碳捕集利用与封存（CCUS）技术的全生命周期能效提升和成本降低的重大需求，围绕低成本二氧化碳捕集技术、高值化二氧化碳利用技术，开展全流程 CCUS 技术应用研究。</p> <p>低成本二氧化碳捕集：研发低能耗二氧化碳捕集的关键吸收剂/吸附剂技术、低成本新型膜分离技术、二代增压富氧燃烧和化学链燃烧技术等。</p> <p>高值化二氧化碳利用：研发二氧化碳转化为醇类、脂类等高值化工产品关键技术、二氧化碳电化学转化技术、微藻生物固碳及下游利用关键技术、二氧化碳地质利用关键技术等。</p> <p>全流程 CCUS 集成：研发 CCUS 与火电、钢铁、化工等行业工艺流程耦合技术、船舶二氧化碳捕集封存新技术、与生物质结合的负碳技术（BECCS），建设全流程集群化 CCUS 研发平台等。</p>
		<p>前沿颠覆性技术创新行动。围绕减污降碳与培育绿色低碳新产业目标，聚焦新能源、二氧化碳捕集利用、前沿储能等重点方向基础研究最新突破，加强学科交叉融合，加快培育颠覆性技术创新路径，引领实现产业和经济发展方式的迭代升级。</p>
		<p>颠覆性研究：对标碳中和国际前瞻技术进展，加强学科交叉融合，开展碳中和变革性、颠覆性的科学自由探索，包括温和条件下的空气直接碳捕集、人工模拟光合作用化学品合成、可再生能源驱动下的燃料合成、新型能源、储能、二氧化碳捕集利用等相关科学理论和基础研究，为未来碳中和发展提供方向引领和理论指引。</p>
		<p>负碳减排：研究空气中二氧化碳直接捕集的新原理和新技术、生物质能耦合碳捕集利用关键技术、海洋生物碳汇技术等。</p>
		<p>变革性二氧化碳利用：研究二氧化碳捕集-转化一体化多功能材料和技术，研究二氧化碳和 N₂ 电化学解离再生合成氨/尿素技术、二氧化碳制备高性能碳材料技术等二氧化碳化工转化利用途经机制，研究基于生物制造的二氧化碳转化利用技术等。</p>
		<p>低碳零碳负碳技术标准：加快推动强制性能效、能耗标准制（修）订，完善新能源和可再生能源、绿色低碳工业、农业、建筑、交通、CCUS、储能等前沿低碳零碳负碳技术标准，加快构建低碳零碳负碳技术标准体系。</p>
		<p>碳中和技术发展路线图研究：围绕能源、工业、产业、CCUS、碳汇等重点领域，研究碳中和技术图谱和关键技术清单，评估主要部门碳中和技术选择及分阶段研发任务清单，并定期更新。</p>

地区	政策名称	主要内容
		碳中和科技创新国际交流：依托浦江创新论坛，围绕可再生能源、储能、氢能、低碳工业流程再造、二氧化碳捕集利用与封存等开展国际合作与交流。
上海市	上海市工业领域碳达峰实施方案	<p>打造前沿技术科技创新高地。搭建绿色低碳科技创新和产业化平台，发挥高校院所原始创新作用，围绕共性技术、前沿技术和颠覆性技术，打造“碳捕集利用封存技术研究中心”、“低碳冶金技术创新中心”等平台。</p> <p>开展低碳零碳技术应用示范。加大二氧化碳资源化利用研发力度，推进新一代相变型二氧化碳捕集技术应用，突破溶剂损耗、再生热耗等关键指标，降低捕集成本。加快二氧化碳生物、化工、材料、矿化等转化技术研究。推动碳捕集利用与封存（CCUS）应用场景向化工、钢铁等其他行业拓展，加快与储能、氢能等技术的集成发展。</p>
江苏省	省生态环境厅 2021 年推动碳达峰、碳中和工作计划	开展碳捕集和利用试点。调研华电句容电厂碳捕集利用（CCUS）技术运用情况，跟踪国电泰州电厂 CCUS 项目进度，形成专题调研报告。鼓励大型电力企业开展碳捕集试点。
江苏省	江苏省碳达峰实施方案	<p>推动重点工业行业碳达峰行动。加强对氢能冶炼、非高炉炼铁及碳捕集与利用等低碳冶炼技术的研发推广和应用。瞄准高端化工新材料加快推动产品结构调整，积极发展精馏系统综合提效降碳、碳捕集与利用等新型技术。</p> <p>加强关键核心技术攻坚。围绕可再生能源、零碳负碳排放、碳捕集利用及封存、生态系统增汇等重点领域，超前部署实施一批前沿基础研究项目。</p>
江苏省	江苏省人民代表大会常务委员会关于推进碳达峰碳中和的决定	切实加强绿色低碳科技创新。充分利用各地创新资源禀赋，加强绿色低碳关键核心技术攻坚，围绕可再生能源、零碳工业流程再造、碳捕集利用及封存、生态系统增汇等重点领域，超前部署实施一批前沿基础研究项目和关键核心技术研发项目。
江苏省	江苏省科技支撑碳达峰碳中和实施方案	<p>加强前沿基础科学研究。聚焦可再生能源、零碳/负碳排放、二氧化碳捕集利用、气候与环境协同效应、生态系统增汇等重点领域，超前部署实施前沿基础研究项目，着力在超高效光伏、新型绿色氢能、零碳高效能源转换与存储、二氧化碳高效捕集等方向取得突破，力争取得一批原创性成果。</p> <p>超前部署碳捕集利用及封存（CCUS）前沿技术。围绕碳中和愿景下对负碳技术的研发需求，着力提升负碳技术创新能力。强化以 CCUS 为核心的负碳技术研发，超前部署 CCUS 耦合制氢、生物质发电耦合 CCUS、直接空气二氧化碳捕集（DAC）、二氧化碳制绿色甲醇等技术，研发 CCUS 与工业流程耦合、新型二氧化碳捕集分离材料与技术、新型低能耗低成本碳捕集、二氧化碳高值化利用及地下封存等技术，推动实现低能耗百万吨级碳捕集利用及封存能力。</p>

地区	政策名称	主要内容
		开展零碳 / 负碳重大技术应用示范。推进二氧化碳高值化化学利用、CCUS 与工业流程耦合、低能耗低成本碳捕集等技术规模化应用，逐步开展 CCUS 全链条技术集成示范和万吨级工业应用示范。
安徽省	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实施意见	加强绿色低碳技术研究。加强煤炭清洁高效利用、高效太阳能电池组件和系统、风能高效利用、氢能安全利用、新型储能、二氧化碳捕集利用与封存、低碳与零碳工业流程再造、生态碳汇等领域关键核心技术攻关。支持开展可再生能源制氢、直接空气二氧化碳捕集、二氧化碳化学与生物转化、超导输电等基础研究。
安徽省	安徽省碳达峰实施方案	<p>加强关键核心技术攻关。聚焦煤炭清洁高效利用、火电机组掺氨燃烧、可再生能源大规模利用、新型电力系统、氢能安全利用、新型储能、低碳与零碳工业流程再造、二氧化碳捕集利用与封存等重点领域，深化应用基础研究，降低应用成本。</p> <p>加快先进适用技术推广应用。在钢铁、水泥、电力等行业开展低成本、低能耗二氧化碳捕集利用与封存技术示范，加快氢能在工业、交通、建筑等领域的规模化应用。</p>
安徽省	安徽省科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030 年）	<p>关键核心技术取得突破。面向世界科技前沿，立足我省创新优势，在煤炭清洁高效利用、可控核聚变、可再生能源、氢能、储能、碳捕集利用与封存、工业流程再造、生态碳汇、碳排放监测等领域取得 30 项左右重大科技成果。</p> <p>加强前沿原创性低碳技术研究。到 2025 年，重点在可控核聚变、新型高效光伏电池、新型绿氢、前沿储能、直接捕集空气二氧化碳、二氧化碳高值化转化利用技术等基础前沿领域取得一批原创性成果。</p> <p>开发煤炭清洁高效利用技术。立足我省资源禀赋、能源结构，加强煤炭清洁高效燃烧与碳捕集利用封存技术耦合、高效低碳工艺锅炉掺烧等关键技术、装备、工艺研究。</p> <p>加快实现低碳零碳工业流程再造。围绕我省高碳工业领域绿色低碳转型需求，重点加强低碳燃料与原料替代、煤电与新能源发电协调利用、过程智能调控、余热及余能高效循环利用、碳捕集利用与封存、二氧化碳催化转化等节能减排关键技术研发。</p> <p>推动碳捕集利用与封存技术研发。聚焦碳捕集利用与封存技术的全生命周期能效提升和成本降低，研发二氧化碳捕集、二氧化碳化学与生物转化利用、二氧化碳封存技术与装备，加强甲烷等非二氧化碳温室气体减排、替代与回收利用技术研发，部署规模化碳捕集利用与封存、工业流程耦合及固碳增值技术应用示范。到 2025 年，在碳捕集利用与封存方面取得一批重大科技成果，实现重点行业单位二氧化碳捕集成本及能耗下降；到 2030 年，推动碳捕集利用技术工业化应用。</p>

地区	政策名称	主要内容
		<p>推进低碳零碳负碳技术标准编制。到2025年，重点在新能源、可再生能源和绿色低碳工业、建筑、交通、碳捕集利用与封存、储能、碳监测与评估等方面取得一批技术标准。</p> <p>开展低碳零碳技术应用场景创新和示范。聚焦新型能源系统、工业低碳零碳流程再造、二氧化碳捕集与利用等领域需求，定期发布碳达峰碳中和重大应用场景需求清单。</p> <p>加强国内外科技合作。聚焦光伏、储能、碳捕集利用与封存等领域，加强国家和地区间的合作，共建绿色低碳国际科技合作基地、联合实验室等。</p>
福建省	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实施意见	加快先进适用技术研发和推广。大力推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用。推进风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能和氢能等可再生能源及储能技术研发，加快推动核能与核安全技术、智能电网以及建筑节能技术实现新突破，推动落实首台（套）重大技术装备示范应用。
江西省	江西省工业领域碳达峰实施方案	<p>开展重点行业低碳技术改造示范。推进大型企业集团应用碳捕集利用封存技术，并逐步在石化、钢铁、陶瓷、水泥等行业推广。</p> <p>建材。到2030年，产业燃料结构进一步优化，燃料用煤得到合理控制，突破一批重大低碳技术，实现水泥窑炉碳捕集利用封存技术的产业化应用，单位产品碳排放强度进一步降低。</p> <p>石化化工。优化产业布局，强化石化化工行业与其他行业耦合发展，重点推进炼油、合成氨、烧碱行业节能降碳，提升重点企业清洁生产水平，加强碳捕集利用封存技术在行业的应用。到2030年，达到清洁生产一级水平的化工企业占比进一步扩大，二氧化碳利用封存能力明显提升。</p>
山东省	山东省碳达峰实施方案	<p>加强绿色低碳技术研发应用。集中力量开展复杂大电网安全稳定运行和控制、大容量风电、高效光伏、大容量电化学储能、低成本可再生能源制氢、磁悬浮冷媒压缩机、CCUS等关键技术攻关。建设二氧化碳捕集利用与封存一体化示范项目。</p> <p>开展国际交流合作。推动开展可再生能源、储能、氢能、CCUS等绿色低碳领域科研联合攻关和技术交流。</p>

地区	政策名称	主要内容
山东省	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	推动先进适用技术研发应用。加强光电转换效率提升、风电核心部件、新型动力电池、磁悬浮动力装备、高温气冷堆核电站等重点技术研发，开展新型节能和新能源材料、可再生能源与建筑一体化等攻关，强化共性关键技术、应用开发技术、测试评价技术协同创新。利用胜利油田巨量埋存空间、完备集输设施和技术优势，加快推进碳捕集利用与封存技术研发、示范和应用。
		深化投资体制改革。加强投融资政策支持，严格控制煤电、钢铁、有色金属等高碳项目投资，加大对节能环保、新能源、低碳交通运输装备和组织方式、碳捕集利用与封存等项目的投融资支持力度。
山东省	山东省工业领域碳达峰工作方案	推动绿色低碳技术重大突破。聚焦基础零部件及元器件、基础软件、基础材料、基础工艺、低碳颠覆性技术研究，通过“揭榜挂帅”等方式，推进实施一批具有前瞻性、战略性的重大科技项目，增强高效储能、氢能、碳捕集利用封存、温和条件二氧化碳资源化利用等关键核心技术供给。
		钢铁。到 2030 年，在富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁、碳捕集利用封存技术等方面取得突破应用，吨钢综合能耗显著降低。
		建材。集中攻关水泥窑替代燃料、窑外预热、工业窑炉烟气二氧化碳捕集利用等重大关键技术。
		石化化工。增强天然气、乙烷、丙烷等原料供应能力，提高低碳原料比重。推广应用原油直接裂解制乙烯、新一代离子膜电解槽等技术装备，开发可再生能源制取高值化学品技术，加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目。
山东省	山东省科技支撑碳达峰工作方案	加快碳中和前沿技术突破。面向我省碳达峰碳中和重大战略需求，聚焦新型能源、新型电力系统、储能、碳捕集利用与封存（CCUS）等领域，围绕超高效光伏、新型核能发电、电力多元转换、人工光合作用、新型绿色氢能、直接空气捕集、生物能源与碳捕获和储存、太阳辐射管理等前沿技术开展深入攻关。开展负碳技术创新能力提升。超前部署负排放和绿碳、蓝碳增汇技术，加快发展 CCUS 关键技术研发，促进化工行业开展 CCUS 示范，探索钢铁、水泥等行业 CCUS 技术路径，开展油田、天然气田低成本碳封存技术研发。推进国内国外创新资源整合。加强与“一带一路”沿线国家、欧美日韩等发达国家在可再生能源、储能、氢能、CCUS 等绿色低碳领域技术创新方面的联合攻关和技术交流，有效解决我省绿色低碳领域技术难题。

地区	政策名称	主要内容
四川省	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实施意见	加快先进适用技术研发和推广。开展复杂大电网安全稳定运行和控制、可再生能源开发利用、氢能开发利用、减污降碳协同、碳捕集利用与封存等关键技术攻关。
		完善投资政策。充分发挥政府投资引导作用，构建与碳达峰、碳中和相适应的投融资政策体系……加大对生态修复、节能环保、新能源、低碳交通运输装备、碳捕集利用与封存等项目的投融资支持力度。
四川省	四川省碳达峰实施方案	推动钢铁行业碳达峰。积极争取开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范。
		加快先进适用技术研发和推广应用。鼓励二氧化碳规模化利用，支持二氧化碳捕集利用与封存技术研发和示范应用。
		开展绿色经贸、技术与金融合作。加大绿色技术国际合作力度，推动开展可再生能源、储能、氢能、二氧化碳捕集利用与封存等领域科研合作和技术交流。
四川省	四川省能源领域碳达峰实施方案	加强科技攻关。重点推进化石能源绿色开发和清洁利用、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）、新型电力系统、氢能、储能、高效光伏、大容量风电、先进核电、可控核聚变、生物质燃料替代、零碳供能等基础前沿技术攻关。
		推进试点示范。开展智慧能源试点示范。加强信息技术、CCUS 技术与能源融合发展。
		CCUS 技术攻关。研发低能耗水合物法捕集高浓度二氧化碳气体、绿色离子液体吸收法捕集低浓度二氧化碳气体、高温共解二氧化碳、二氧化碳及非纯二氧化碳地质封存、二氧化碳资源化利用等关键技术。
		推动重点产业领域节能降碳。支持油气勘探开发企业通过清洁替代、技术设备升级、零散气回收、CCUS 等方式减少生产过程碳排放。

地区	政策名称	主要内容
贵州省	贵州省碳达峰实施方案	推动钢铁行业碳达峰。推广先进适用技术，深挖节能降碳潜力，鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、氧气高炉、非高炉冶炼、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，扩大低品位余热供暖发展规模。
		强化应用基础研究。聚焦煤矿绿色智能开发、化石能源清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）等重点领域……积极开发规模化二氧化碳捕集利用与封存和岩溶地质捕获先进适用的固碳方法。
		加快先进适用技术推广应用。集中力量开展复杂大电网安全稳定运行和控制、大容量风电、高效光伏、大容量电化学储能、低成本可再生能源制氢、低成本二氧化碳捕集利用与封存等关键技术攻关……建设二氧化碳捕集利用与封存全流程、集成化、规模化示范项目。
贵州省	贵州省工业领域碳达峰实施方案	加强绿色低碳技术研发创新。积极攻克一批新型节能及新能源材料、煤炭清洁低碳利用、高效光伏、高效储能、碳捕集利用封存、零碳工业流程再造、复杂难用固废无害化利用等关键核心技术。
云南省	云南省碳达峰实施方案	推动钢铁行业碳达峰。鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，推动低品位余热回收利用。
		加大绿色低碳技术研发和推广应用。鼓励二氧化碳规模化利用，支持二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术研发和示范应用。
云南省	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实施意见	加强基础研究和前沿技术攻关。依托科研院校，推动支撑双碳目标的科技创新平台建设，提升新型储能材料、智能电网和碳捕集利用与封存技术等低碳零碳负碳领域基础研究水平和攻关能力，强化绿色技术供给。
陕西省	陕西省碳达峰实施方案	促进钢铁产业低碳化发展。鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化试点示范，推动低品位余热供暖发展。
		推动建材领域绿色化发展。探索开展窑炉烟气二氧化碳捕集利用。

地区	政策名称	主要内容
		<p>推动绿色低碳研发应用取得新突破。鼓励二氧化碳规模化应用，支持二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）、二氧化碳合成化学品等技术研发和示范应用。</p> <p>激活绿色低碳发展新动能。围绕六大高耗能行业节能降碳减污需求，推广合同能源管理、环境污染第三方治理等模式，培育壮大节能环保、清洁生产、清洁能源、碳捕集利用封存固化等新产业、新业态。</p> <p>加强绿色技术合作。支持我省高等学校、研究机构与国外学术机构开展新能源、储能、二氧化碳捕集利用与封存等领域的合作交流。</p>
陕西省	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实施意见	加强绿色低碳技术研发应用。在二氧化碳捕集利用封存固化领域开展技术攻关，推进规模化应用。
陕西省	陕西省工业领域碳达峰实施方案	<p>推动绿色低碳技术研发与突破。重点支持低碳零碳工业流程再造技术、高效储能、能源电子、氢能、碳捕集利用封存（CCUS）、温和条件二氧化碳资源化利用等关键核心技术取得突破。</p> <p>资源综合利用示范项目。鼓励钢铁联产，支持开展氢冶金、二氧化碳捕集利用（CCUS）一体化试点示范项目，低品位余热供暖项目。</p>
青海省	青海省碳达峰实施方案	<p>清洁能源提质扩能。深度挖掘青藏高原风、光、水能潜力，加强全省风电、太阳能发电为主的多类型清洁能源规模化开发和高质量发展，通过建设新型电力系统增强对新能源的调节能力，率先打造国家储能先行示范区，推进煤电等电源碳捕集、利用与封存技术应用，探索构建全国首个省域零碳电力系统，加大绿电输出，为全国碳达峰目标实现做出“青海贡献”。</p> <p>加快技术研发和推广应用。开展二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）等应用基础研究，选择有条件的区域和行业探索开展 CCUS 技术试点示范。</p>
青海省	青海省工业领域碳达峰实施方案	推动绿色低碳技术重大突破。布局“减碳去碳”基础零部件、基础工艺、关键基础材料、低碳颠覆性技术研究，突破推广一批高效储能、能源电子、氢能、碳捕集利用封存、温和条件二氧化碳资源化利用等关键核心技术。

地区	政策名称	主要内容
		开展绿色低碳技术应用示范。积极跟进节能降碳关键共性技术、前沿引领技术、颠覆性技术研发进展，鼓励企业适时采用氢还原、惰性阳极、碳捕捉等工艺技术实施改造。
宁夏	宁夏碳达峰碳中和科技支撑行动方案	实施绿色低碳先进科技成果引进转化行动。支持企业通过转让、许可、技术入股等方式，引进国内外先进绿色低碳科技成果在区内转化应用。围绕产业低碳、零碳、负碳技术发展需求，实施一批可再生能源、氢能、储能、CCUS重大科技成果转化项目，加强氢能、光伏、风电多能交互清洁能源示范，促进重点产业绿色转型升级。
		火力发电减碳技术研发应用。开展火力发电二氧化碳捕集基础原理与机制、低能耗的二氧化碳吸收剂和捕集材料、低能耗过程设计等研究，引进示范火力发电二氧化碳捕集技术，研发二氧化碳高值化利用关键技术。
		推进煤化工节能减碳技术创新。重点开发煤化工和电石化工下游高附加值产品，研发应用绿色生产工艺、技术、设备，引进转化煤化工二氧化碳捕集、封存与利用（CCUS）技术，促进煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展。
		引进转化煤化工二氧化碳捕集、封存与利用（CCUS）技术。引进及示范应用碳捕集专用大型二氧化碳分离与换热装备、驱油、驱水、地质封存的储存、运输和灌输技术设备；研发二氧化碳制备双氰胺、三嗪醇、加氢制甲醇乙醇技术，形成捕集及碳转化利用一体化技术集成与万吨级示范。
宁夏	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实施意见	推动能源体系绿色低碳转型。支持在煤化工、火电、水泥等行业开展二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）试点示范。
宁夏	宁夏回族自治区碳达峰实施方案	强化应用基础研究和先进适用技术研发应用。加强化石能源绿色智能开发和清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕集利用与封存等重点领域的应用基础研究。集中力量开展复杂大电网安全稳定运行和控制、高效光伏、大容量新型储能、低成本可再生能源制氢、低成本二氧化碳捕集利用与封存等技术创新。开展二氧化碳资源化利用产业发展研究，建设二氧化碳捕集利用与封存全流程、集成化、规模化示范项目。
宁夏	宁夏回族自治区能源领域碳达峰实施方案	完善绿色低碳技术创新机制。加强东西部能源绿色低碳领域科技创新合作，鼓励区内企业、高校、科研院所与国家大院大所、发达地区创新主体深入开展交流合作，建立绿色低碳技术协同创新共同体，推动在新能源、储能、新型电力系统、氢能、CCUS等重点领域整合新建一批自治区科技创新平台，培养创新型、应用型、技能型低碳技术人才，共同实施重大科技项目。

地区	政策名称	主要内容
		探索试点负碳技术。开展具有自主知识产权的碳捕集、利用和封存等技术的研发和试验示范，研究全区重点行业开展碳捕集、利用和封存示范工程的可行性和潜力，在燃煤发电、煤化工等重点排放行业开展二氧化碳规模化捕集技术应用示范，在地质条件适合的地区开展二氧化碳封存试验，持续攻关二氧化碳高效转化原料、燃料的高值化利用关键技术。
		火力发电减碳技术研发应用。开展火力发电二氧化碳捕集基础原理与机制、低能耗的二氧化碳吸收剂和捕集材料、低能耗过程设计等研究，引进示范火力发电二氧化碳捕集技术，研发二氧化碳高值化利用关键技术。
		引进转化煤化工 CCUS 技术。引进及示范应用碳捕集专用大型二氧化碳分离与换热装备、驱油、驱水、地质封存的储存、运输和灌输技术设备；研发二氧化碳制备双氧胺、三嗪醇、加氢制甲醇乙醇技术，落实下游二氧化碳消纳渠道，形成捕集及碳转化利用一体化技术集成与万吨级示范。
广西	广西壮族自治区碳达峰实施方案	开展应用基础研究。聚焦化石能源绿色智能开发和清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕集利用与封存等重点，开展应用基础研究。
		加快先进适用技术研发和推广应用。狠抓绿色低碳技术攻关，推进碳减排关键技术突破与创新，鼓励二氧化碳规模化利用，支持二氧化碳捕集利用与封存技术示范应用。
西藏	西藏自治区工业领域碳达峰实施方案	采矿行业碳达峰行动。积极应用先进、非传统的采矿选矿新理论新技术，非爆采选一体化技术及装备、深地热能、应力能及水势能综合利用技术、井下二氧化碳收集及就地封存等技术。
湖北	湖北省碳达峰碳中和科技创新行动方案	突破一批关键核心技术。瞄准世界前沿，强化减排降碳增汇技术攻关，在可再生能源、储能、氢能、CCUS、生态碳汇等方面取得重大科技成果 100 项以上。
		能源领域。针对湖北省以煤炭为主的能源结构，加速推进煤炭低碳高效清洁利用，加大太阳能、风能、水能、氢能等清洁能源的研究与开发，加快 CCUS 技术、储能技术发展
		CO ₂ 捕集、利用与封存。研发富氧燃烧技术、化学链燃烧技术、燃后捕集技术、二氧化碳矿化利用技术、二氧化碳地质封存与驱油增产技术，推进生物质能与 CCUS 耦合的负碳排放技术研发。

地区	政策名称	主要内容
		<p>大宗化工零碳工业流程再造与 CO₂ 捕集利用与封存。突破燃烧后 CO₂ 捕集技术，提升捕集的选择性和捕集率；突破 CO₂ 驱油技术和 CO₂ 制造化学品技术，促进大宗化工与油田、氢能利用协同发展。</p> <p>碳回收及资源化利用技术。加强碳捕获、利用与封存关键技术的研究，支持冶金煤气 CO₂ 分离回收、CO₂ 制备清洁燃料与有机原料、CO₂ 驱油技术、CO₂ 制化产品技术的研究，积极推进碳捕获、利用与封存技术大规模商业化应用。</p> <p>CCUS 技术转化应用。积极推动火电机组十万吨级 CO₂ 捕集与利用技术应用示范，通过工程放大和技术迭代，降低碳捕集成本，在建材、化工、水泥、钢铁等行业进行 CO₂ 捕集利用技术转化应用。</p> <p>服务绿色“一带一路”建设。推动与创新型国家和“一带一路”沿线国家开展可再生能源、储能、氢能、CCUS 等绿色低碳前沿技术领域的国际科研合作和技术交流。</p>
湖南	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实施意见	<p>加强绿色低碳重大关键技术攻关。重点支持储能和智能电网、可再生能源应用技术与建筑一体化、高耗能行业低碳流程重塑工艺、碳捕集利用与封存、废弃物资源化与再制造、储能、氢能等重大技术研发。</p> <p>提升生态系统碳汇增量。推进岩溶地区、矿山尾矿区等地质碳汇调查，探索岩溶地区二氧化碳捕集利用与封存。</p>
湖南	湖南省推动能源绿色低碳转型做好碳达峰工作的实施方案	推动能源科技创新。积极探索战略性、前瞻性技术，攻克高效氢气制备、储运和燃料电池关键技术，开展小型模块化反应堆等先进核能系统技术研究，适时部署碳捕集、利用与封存技术（CCUS）。
湖南	湖南省碳达峰实施方案	<p>推动关键低碳技术研发和攻关。加强基础前沿创新引领，重点开展新一代太阳能电池、储能、氢能、直接空气碳捕集、化学链载体材料等方向机制、理论研究。</p> <p>加快科技成果转化和先进适用技术推广应用。积极开展可再生能源替代、智能电网、氢能产业、装配式建筑技术、碳捕集封存与利用等领域示范项目和规模化应用。</p>

地区	政策名称	主要内容
湖南	湖南省工业领域碳达峰实施方案	加快绿色低碳技术成果转化和推广应用。围绕钢铁、有色金属、石化化工、建材等行业,实施生产工艺深度脱碳、工业流程再造、电气化改造、碳捕集利用封存等技术示范工程,形成一批可复制可推广的典型技术案例。
		水泥:重点研发高固废掺量的低碳水泥、新型固碳胶凝材料、全固废免烧新型胶凝材料、绿色氢能煅烧水泥熟料、市政污泥建材化处置、水泥窑烟气二氧化碳捕集利用等技术。
广东	关于完整准确全面贯彻新发展理念推进碳达峰碳中和工作的实施意见	加强核心技术攻关和前沿技术布局。加强气候变化成因及影响、非二氧化碳温室气体减排替代、可控核聚变、碳捕集利用与封存等低碳前沿技术布局。
		完善法规规章和标准计量体系。加快构建碳达峰、碳中和先进标准计量体系,研究制定重点行业和产品温室气体排放、生态系统碳汇、碳捕集利用与封存等地方标准。
广东	广东省碳达峰实施方案	大力发展绿色低碳产业。发挥技术研发和产业示范先发优势,加快二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)全产业链布局。
		推动钢铁行业碳达峰。推广先进适用技术,降低化石能源消耗,推动钢铁副产资源能源与石化、电力、建材等行业协同联动,探索开展非高炉炼铁、氢能冶炼、二氧化碳捕集利用一体化等低碳冶金技术试点示范。
		推动石化化工行业碳达峰。推广应用原料优化、能源梯级利用、物料循环利用、流程再造等工艺技术及装备,探索开展绿色炼化和二氧化碳捕集利用等示范项目。
		推动水泥行业碳达峰。合理控制生产过程碳排放,探索水泥窑尾气二氧化碳捕集利用。
		低碳基础前沿科学研究行动。强化绿色低碳领域基础研究和前沿性颠覆性技术布局,聚焦二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)技术、新能源、天然气水合物、非二氧化碳温室气体减排/替代等重点领域和方向,重点开展低成本二氧化碳捕集利用与海底封存、二氧化碳高值转化利用、.....等方向基础研究。

地区	政策名称	主要内容
		<p>低碳先进技术成果转化行动。鼓励二氧化碳规模化利用，支持二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术研发和示范应用。</p> <p>开展绿色低碳试点示范。推动钢铁、石化、水泥等重点行业企业提出碳达峰、碳中和目标并制定中长期行动方案，鼓励示范推广二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术。</p> <p>完善投资金融政策。加大对节能环保、新能源、新能源汽车、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）等项目的支持力度。</p>
山西	山西省碳达峰实施方案	<p>推动钢铁行业碳达峰。鼓励钢焦化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范。</p> <p>强化碳达峰碳中和和应用基础研究。聚焦化石能源绿色智能开发和清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕集利用与封存等重点领域，深化二氧化碳低能耗大规模捕集、富氧燃烧减排、CO₂-催化减排、二氧化碳捕集的高性能吸收剂（吸附材料）及工艺、传统优势产业节能降碳减污技术等应用基础研究，提升共性关键技术、前沿引领技术和“卡脖子”技术供给能力。</p> <p>大力开展低碳技术推广示范。实施近零碳排放示范工程，探索应用变温变压吸附法碳捕集工艺，开展二氧化碳捕集利用封存全流程、集成化、规模化示范项目。支持建设工业化空气二氧化碳捕集（DAC）系统、超临界二氧化碳发泡塑料系统。支持二氧化碳-甲烷干重整示范项目，推动实现烟道气捕碳高效转化利用。</p> <p>开展碳达峰区域协同联动。加强与京津冀、长三角、粤港澳大湾区在可再生能源、节能、储能、氢能、高效光伏、低成本二氧化碳捕集利用封存等领域的深度合作</p>
山西	关于完整准确全面贯彻新发展理念切实做好碳达峰碳中和工作的实施意见	<p>开展低碳零碳负碳重大科技攻关。主动对接国家科技项目，加强煤炭清洁高效利用、煤成气开发利用、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）、智能电网、大规模储能、氢燃料电池等领域研究。</p> <p>加快推进低碳技术推广示范。积极推进近零碳排放示范工程，探索创建省级零碳产业创新区，开展 CCUS 全流程、集成化、规模化示范项目。</p>

地区	政策名称	主要内容
		完善投融资政策。加大对节能环保、新能源、低碳交通运输装备和组织方式、CCUS等项目的投融资支持力度，严格控制钢铁、氧化铝、水泥等高碳项目投资，推动山西能源转型发展基金投资向碳达峰、碳中和领域倾斜。
山西	山西省工业领域碳达峰实施方案	<p>开展重点行业升级改造示范。聚焦钢铁、建材、焦化、化工、有色金属等重点用能行业，积极开展富氢气体冶炼、氢能替代、可再生能源电力替代、二氧化碳捕集利用等低碳零碳技术示范工程。</p> <p>建材。提高低碳生产技术水平，推广应用水泥熟料回转窑余热发电、高效篦式冷却机改造、大推力低一次风量多通道燃烧器技术、集成模块化窑衬节能技术、带分级燃烧的高效低阻预热器系统、高效节能粉磨设备、二氧化碳捕集利用等技术和装备。</p> <p>发展绿色金融。加大对节能环保、新能源、CCUS等项目的投融资支持力度，推动山西能源转型发展基金投资向碳达峰、碳中和领域倾斜。</p>
山西	山西省科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030年)	开展碳捕集、利用与封存及碳汇技术攻关示范行动。大力发展碳捕集、利用与封存技术，攻克二氧化碳捕集、压缩与运输、转化利用、地质利用与封存等关键技术，突破低能耗、大规模二氧化碳吸附捕集技术瓶颈，开展二氧化碳矿化利用、合成液体燃料及聚合物、重整制合成气、光热光电催化还原、生物固碳等转化利用技术攻关，前瞻布局空气直接捕集、碳捕集、利用与封存与新能源耦合等颠覆性技术研发。重点攻克基于多行业深度耦合的大规模、高效率、低能耗碳捕集、利用与封存技术，并开展万吨级以上碳捕集、利用与封存全流程技术示范，促进碳捕集、利用与封存产业集群化发展，实现二氧化碳大规模转化利用。
辽宁	辽宁省碳达峰实施方案	<p>抢占绿色低碳产业发展新高地。积极发展新一代信息技术、清洁能源、节能环保、二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS）等新兴产业，推动油（气）田等重点领域CCUS全产业链关键技术突破和成套技术开发，探索石化、建材等重点行业新扩建项目同步建设二氧化碳捕集矿化等试点。</p> <p>打造绿色低碳技术研发高地。狠抓绿色低碳技术攻关，推进碳减排关键技术的突破与创新，鼓励二氧化碳规模化利用，支持二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术研发和示范应用。</p>
辽宁	辽宁省科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2023-2030年)	超前部署碳中和前沿颠覆性技术。围绕零碳能源、前沿储能、碳捕获与转化、固碳增汇等重点方向，依托能源催化转化全国重点实验室等创新资源，开展超高效光伏电池、新型制氢技术、新一代储能技术、人工光合成、碳直接空气捕集、碳基资源高效催化转化等基础前沿理论研究，加强学科交叉融合，催生颠覆性技术，促进关键核心技术创新能力提升，引领实现产业和经济发展方式的迭代升级。

地区	政策名称	主要内容
		<p>新型负碳技术：研究 CO₂ 直接空气捕集、CO₂ 捕集转化一体化、CO₂ 合成制备高性能碳材料等新型 CCUS 技术；揭示海洋和陆地碳汇格局、过程机制、固碳功效、增汇潜力机制机理。</p> <p>加强固碳增汇技术创新。聚焦碳捕集利用与封存（CCUS）技术的全生命周期能效提升和成本降低，重点突破低成本低能耗二氧化碳捕集的吸收剂/吸附剂、二氧化碳高效催化转化，以及二氧化碳化学利用、驱油、地质封存等核心关键技术，开展 CCUS 与工业过程的全流程深度耦合技术研发。</p> <p>碳捕集、利用与封存（CCUS）技术：研发低能耗低成本碳捕集技术、与生物质结合的负碳技术（BECCS）、CO₂ 管道运输技术、CO₂ 驱油增产技术、CO₂ 地质封存技术，CO₂ 加氢制烷烃、芳烃及醇类技术，CO₂ 光电催化转化技术等，开发绿色低能耗吸收溶液、高容量性能稳定吸附材料等；在辽河油田、大连长兴岛等工业园区建设 CCUS 示范工程。</p>
浙江	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实施意见	加快关键核心技术攻关。围绕零碳电力、零碳非电能源、零碳流程重塑、零碳系统耦合、碳捕集利用与封存和生态碳汇等方向，创新科研攻关机制，采用揭榜挂帅等方式，实施关键核心技术创新工程，推进低碳技术集成与优化。
浙江	浙江省工业领域碳达峰实施方案	<p>加快节能降碳技术攻关。以新能源、新材料、氢能、高效储能、综合能源优化利用、再生资源利用、减污降碳协同、碳捕集封存利用等领域为重点，集中优势资源推动绿色低碳共性关键技术、前沿引领技术、颠覆性技术和相关设施装备攻关，形成一批原创性引领型科技成果。</p> <p>钢铁行业。鼓励发展优特钢产品和钢铁新材料，提高钢铁产业链附加值，积极探索氢能冶炼、氧气高炉、非高炉冶炼及二氧化碳捕集利用一体化等突破性低碳技术应用。</p>
河南	河南省碳达峰实施方案	<p>推动钢铁行业碳达峰。推广先进适用技术，鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，推动低品位余热供暖发展。</p> <p>加快先进适用技术研发和推广应用。集中力量开展复杂大电网安全稳定运行和控制、大容量风电、高效光伏、大容量电化学储能、低成本可再生能源制氢、碳捕集利用与封存等技术创新。加快推广先进成熟绿色低碳技术，推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用。</p> <p>完善绿色低碳政策体系。发挥新兴产业投资引导基金、创业投资引导基金、河南省绿色发展基金等政府投资基金的引导作用，撬动更多社会资金投入节能环保、新能源、碳捕集封存利用等绿色产业。</p>

地区	政策名称	主要内容
河南	河南省工业领域碳达峰实施方案	推动绿色低碳技术重大突破。部署工业低碳前沿技术研究，实施低碳零碳工业流程再造工程，创新研发低碳零碳新工艺新技术，突破推广一批高效储能、氢能、碳捕集利用封存、温和条件二氧化碳资源化利用等关键核心技术。
		加大绿色低碳技术推广力度。鼓励各地各行业开展绿色微电网、碳捕集利用与封存等节能低碳技术的典型应用场景试点示范，探索绿色低碳技术推广新模式。
		钢铁行业。深挖节能减碳潜力，持续推动钢铁行业实施绿色化改造、超低排放改造，推广先进适用技术，鼓励钢化联产，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，发挥节能减碳协同作用。
重庆	重庆市工业领域碳达峰实施方案	加大绿色低碳产品供给。在大气污染治理、固废处置处理、废水治理、碳捕集利用与封存等领域培育装备制造龙头企业，增加资源能源使用环节绿色低碳装备的供给。
甘肃	甘肃省碳达峰实施方案	推动钢铁行业碳达峰。推广先进适用技术，深挖节能降碳潜力，推动钢铁与化工、能源等行业间技术耦合与协同发展，强化焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气等清洁高效利用，探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，推动低品位余热供暖发展。
		强化应用基础研究。聚焦化石能源绿色智能开发和清洁低碳利用、可再生能源大规模利用、新型电力系统、节能、氢能、储能、动力电池、二氧化碳捕集利用与封存等重点，深化应用基础研究。
		加快先进适用技术研发和推广应用。开展大容量风电机组、高效光伏和光热发电、新一代智能电网、规模化储能、先进输配电、新能源装备回收处理、中深层地岩热供暖技术、低成本二氧化碳捕集利用与封存等技术创新建设全流程、集成化、规模化二氧化碳捕集利用与封存示范项目。
		开展绿色经贸、技术与金融合作。加大可再生资源、储能、氢能、二氧化碳捕集利用与封存等领域绿色技术合作交流力度。

附件 3 中国 CCUS 示范项目一览表

项目名称	所在省市区	所属工业类型	经营主体	捕集源/捕集技术	捕集规模 (万吨/年)	能耗 (吨)	水耗 (吨)	CO ₂ 纯度 (%)	CO ₂ 总产量 (万吨)	输送		利用与封存							吨 CO ₂ 成本 (元/吨)	投运年份	2023 年状态					
										输送方式	输送距离 (km)	处置单位/企业	处置地	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量 (万吨/年)	CO ₂ 总利用量 (万吨)	产品	产能 (万吨/年)				资源 (万吨)				
包钢集团包头 200 万吨 (一期 50 万吨) CCUS 示范项目	内蒙古包头市	钢铁	包钢 (集团) 公司	钢铁厂尾气	NA	NA	NA	NA	NA	管道、罐车	NA	包钢、油气田	包钢、油气田	钢铁连续生产	200 万吨/年 (一期 50 万吨/年)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	一期建设中	2023 年	
包钢环保包头碳资源化利用项目	内蒙古包头市	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	包融公司 (包钢集团) 与瀚矿环保 (上海) 科技有 限公司于 2018 年 1 月合资成 立	包融公司	包融公司	包融公司	包融公司	0.3	NA	高纯碳酸 钙、含 铁料、绿 色还原剂	NA	NA	NA	NA	NA	2023 年	投运中		
北京建材研究院总 陵夏尔烟气环境 下 CO ₂ 捕集技术 示范项目	北京	水泥 生产	北京金隅 科技有限 公司	水泥窑 炉	10	NA	NA	NA	NA	市场销售	10	市场销售	市场销售	市场销售	10	NA	微藻	NA	NA	NA	NA	NA	NA	规划中	2023 年	
瞻百年盐城微藻 固碳项目	江苏盐城	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	微藻固碳	0.5	微藻固碳	微藻固碳	微藻固碳	0.5	NA	微藻	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	投运中	2023 年
大唐北京高井热 电厂 CO ₂ 捕集项 目	北京	热电厂	大唐国际 发电股份 有限公司 高井热 电厂	发电后 排集	0.15	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	投运中	2013 年

项目名称	所在省市区	捕集										输送		利用与封存							吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(CO ₂)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产量(万吨/年)	资源总产量(万吨)			
国电投重庆双源电厂CO ₂ 捕集示范项目	重庆	燃煤电厂	重庆合川双源电厂	2台300MW机组	燃烧后(化学吸收)	1	NA	NA	> 99.9	NA	-	-	-	用于焊接保护、电厂发电机气冷置换等	-	-	-	-	-	NA	2010	投运中	
国家能源集团锦界电厂15万吨/年燃烧后CO ₂ 捕集与封存全流程示范项目	陕西省榆林市	燃煤电厂	国家能源投资集团锦界电厂有限公司	锦界电厂1号600兆瓦亚临界机组	燃烧后(物理吸收)	15								驱油封存、市场销售							2021	投运中	
国家能源集团泰州电厂50万吨/年CCUS项目	江苏泰州	燃煤电厂	国家能源投资集团泰州电厂有限公司	泰州电厂4号百万千瓦超超临界燃煤发电机组	燃烧后	50	.44电耗<90(千瓦时)		> 99.99					铜箔制造、食品添加剂、润滑油2万吨/月EOR							2023	投运中	
国家能源集团国电大同电厂CO ₂ 化学矿化利用示范项目	山西大同	燃煤电厂	国家能源集团国电大同电厂											电石渣化学矿化利用	0.1		轻烃液烃				2022	投运中	
国家能源集团鄂尔多斯CO ₂ 成本封存项目	内蒙古鄂尔多斯	煤制油	国家能源投资集团鄂尔多斯煤制油分公司		燃烧前(物理吸收)	10	1.23	无	99.5	30.26	罐车	-13	国家能源投资集团鄂尔多斯煤制油分公司	鄂尔多斯成本封存	10	30.26	-	-	-	249	2011	于2016年停止注入,监测中	

项目名称	所在省市	捕集										输送			利用与封存						吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术(化学吸收)	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)	资源总产量(万吨)			
海螺集团芜湖白马山水泥厂CO ₂ 捕集与纯化示范项目	安徽芜湖	水泥厂	芜湖白马山水泥厂	燃烧前(化学吸收)	5	NA	NA	99.99	-	罐车	-	-	市场销售	-	-	-	-	-	-	NA	2018	运行中	
河钢集团张家口氢能开发利用工程示范项目	河北省张家口市														6						2023	投运中	
河南开祥化工电石渣矿化利用CO ₂ 池式项目	河南省义马市											河南开祥精细化工有限公司	河南开祥电石渣矿化利用	0.05									建设中
河南开祥化工5万吨/年化工合成气分离CO ₂ 副产品	河南		河南开祥精细化工有限公司	化工合成气	5																	建设中	
河南强顺新材料焦作3万吨CO ₂ /年固废利用项目	河南省焦作市											河南强顺新材料股份有限公司	河南强顺新材料股份有限公司	固废利用	3								投运中
河南强顺新材料焦作2万吨CO ₂ /年固废利用项目	河南省焦作市											河南强顺新材料股份有限公司	河南强顺新材料股份有限公司	固废利用	2								投运中
河南强顺新材料焦作5万吨CO ₂ /年固废利用项目	河南省焦作市											河南强顺新材料股份有限公司	河南强顺新材料股份有限公司	固废利用	5								投运中

项目名称	所在省市区	捕集										输送				利用与封存						吨CO ₂ 成本 (元/吨)	投运年份	2023年 状态							
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模 (万吨/年)	能耗 (CO ₂)	水耗 (吨)	CO ₂ 纯度 (%)	CO ₂ 总产量 (万吨)	输送方式	输送距离 (km)	处置单元/ 业态	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注 入量 (万吨)	CO ₂ 总利用量 (万吨)	产品	产能 (万吨/年)	资源 总产量 (万吨)											
梁宇环保北京房山水泥厂捕集CO ₂ 捕集项目	北京市房山区	水泥生产																									停运	2023年 状态			
华电集团向塔1万吨/年CO ₂ 捕集工程	江苏省镇江市江都区	燃煤电厂	江苏华电	江苏华电句容发电有限公司	燃烧后捕集	1			99.9												市场销售	食品冷链		1						2021	投运中
华能正宁电厂150万吨/年CO ₂ 捕集封存项目	甘肃省庆阳市	燃煤电厂	华能集团	华能正宁电厂	燃烧后化学吸收	150						石油企业		EOR	150															建设中	
华能上海12万吨/年相变型CO ₂ 捕集工业装置	上海市宝山区	燃煤电厂	华能集团	上海石化第二电厂	燃烧后捕集	12																								2021	投运中
华能北京热电厂3000吨/年二氧化碳CO ₂ 捕集示范项目	北京市	热电厂	华能集团	北京热电厂	燃烧后捕集	0.3			99.5																					2007	停运
华能长春热电厂1000吨/年相变型CO ₂ 捕集工业装置	吉林省长春市	热电厂	华能集团	长春热电厂	燃烧后化学吸收	0.1	2.3																							2020	同歌运行
华能洋浦热电厂燃气机组2000吨/年CO ₂ 捕集工程	海南省儋州市	燃气电厂	华能集团	洋浦热电厂	燃烧后化学吸收	0.2																								2023	投运中
华能天津IGCC电厂10万吨/年燃烧前CO ₂ 捕集工程	天津市	燃煤电厂	天津津滨滨海新区400兆瓦燃煤气化联合循环发电示范机组	燃烧前(化学吸收)	10	NA	NA	NA	NA		罐车	-	-	-	放空															2015	捕集装置完成, 但暂未利用与封存工程延迟

项目名称	所在省市	捕集工业类型	经营主体	捕集来源/CO ₂ 流	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送			利用与封存						吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态		
											输送方式	输送距离(km)	处理单位/证书	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)				资源总产量(万吨)	
中能北京密云云燃气燃气1000吨/年CO ₂ 捕集示范工程	北京市密云区	天然气联合循环发电	华能清洁能源研究院	天然气、生物质、垃圾焚烧发电、CO ₂ 再生、CO ₂ 再液化、CO ₂ 再生体按一定比例混合	燃烧后化学吸收	0.1																	2013	停运
华能湖南岳阳低温法CO ₂ 和污染物协同脱除工程	湖南省岳阳市	燃煤电厂	华能清洁能源研究院	岳阳电厂	燃烧后	0.1																	2021	停运
华能电力海丰燃煤机组CO ₂ 捕集平台	广东省海丰县	燃煤电厂	中英(广州)CCUS研究中心	华海丰电厂1号机组	燃烧后	2	3.24	200h	99.99	NA	无												2019	投运中
华中科大武汉35MW富氧燃烧工业示范	湖北省孝感	燃煤电厂	湖北六大(应城)公司	热电二车间	富氧燃烧	10	15.48	40	95	NA	罐车												2014	停运
佳利达环保佛山1万吨/年烟气CO ₂ 捕集与固碳示范工程	广东省佛山市	污水处理	佛山市佳利达环保科技有限公司	燃煤锅炉烟气	燃烧后化学吸收	1																	2022	投运中
中能金坛泰州CO ₂ 纯化利用制浆碱液驱油内捕项目	江苏省泰州市																						2003	投运中

项目名称	所在省市	捕集										输送			利用与封存						吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态		
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(KD)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)	资源总产量(万吨)					
金隅集团琉璃河水泥厂CO ₂ 捕集及应用项目	北京琉璃河	水泥厂	北京市琉璃河水泥有限公司		燃烧前	0.1																	2017	投运中	
金隅集团北京水泥厂CCUS项目	北京	水泥厂	北京金隅环保科技有限公司	水泥厂	燃烧后捕集	10																		建设中	
中石油大庆油田三肇CCUS项目	黑龙江大庆																							投运中	
通源石油库车百万吨CCUS一体化示范项目选商方案	新疆库车市																							规划中	
清华大学运城中温变压吸附H ₂ CO ₂ 分离中试示范装置	山西省运城市			丰喜集团	变压吸附	2.5																		规划中	
金恒吕梁纳储及徐全英间接矿化利用项目	山西省吕梁市																							建设中	
四川大学西昌CO ₂ 矿化地质封存关键技术中试工业试验	四川西昌																							2021	规划中
腾讯湛江玄武岩CO ₂ 矿化封存示范项目	广东省湛江市																								规划中

项目名称	所在省市	捕集										输送		利用与封存							吨CO ₂ 成本(元/吨)	投资年份	2023年状态		
		捕集工业类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产率(万吨/年)	资源总产量(万吨)					
天津大学鄂尔多斯CO ₂ 电催化合成气项目	鄂尔多斯																						2020	阿默运行	
西南化工研究院设计太原晋光电厂烟气CO ₂ 捕集项目	山西省太原市	热电厂	山西晋光热电有限责任公司	热电厂	燃烧尾气预处理	0.3																	2016	投资中	
西南化工研究院设计吉林佰盛发醇厂CO ₂ 捕集项目	吉林省吉林市	酒精发酵	吉林佰盛气体公司	酒精发酵厂	酒精发酵	4																		投资中	
清华大学成都煤化字燃烧联合流程示范项目	四川省成都		东方电气集团东方锅炉股份有限公司		化学链燃烧	10																		建设中	
中石化塔河炼化制氢弛放气CCUS全流程项目	新疆维吾尔自治区	制氢	中石化塔河炼化公司	制氢装置弛放气		9.1																		2020	投资中
中石油塔里木CCUS项目	新疆维吾尔自治区																								投资中

项目名称	所在省市区	捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集							输送				利用与封存							吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态							
					捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/地点	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)	资源总产量(万吨)												
中石油吐哈哈密CCUS示范项目	新疆哈密市	煤化工	新疆/汇能科技联合利用有限公司	新疆/汇能科技120万吨/煤制甲醇联合利用项目7.2m ³ LNG项目的低温甲醇装置尾气	10									吐哈油田	吐哈油田三塘湖采油区	EOR	10										建设中	建设中				
心连心CCUS全流程示范项目	河南省新乡市、新乡市、焦作市、濮阳市																													投运中	投运中	
海油烟台蓬莱电厂微藻固碳项目	山东烟台	燃煤电厂	蓬莱电厂	蓬莱电厂										蓬莱国电	蓬莱国电	微藻养殖	0.1														2021	投运中
新加坡石化集团兰州液态太阳能燃料合成示范项目	甘肃省兰州市新区													兰州新区石化集团	太阳能合成二氧化碳加氢制甲醇	0.2															2020	停运
中煤鄂尔多斯液态阳光示范项目	内蒙古鄂尔多斯市													中煤鄂尔多斯能化公司	中煤鄂尔多斯能化公司	二氧化碳加氢制甲醇	15															规划中
浙能兰溪CO ₂ 捕集与矿化利用集成示范项目	浙江省兰溪市	燃煤电厂	浙能集团三溪发电公司	浙能集团燃煤电厂										燃煤电厂		矿化养护	1.5															建设中

项目名称	所在省市区	捕集										输送			利用与封存						吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态			
		捕集工艺类型	经营主体	捕集来源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(kWh)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)	资源总产量(万吨)							
地调局水环中心阜康CCUS全流程项目	新疆阜康市	-			燃烧后捕集	-						罐车											2018	停运		
中国煤炭地质总局天津东厂烟气CO ₂ 捕集项目	河北省邯郸市	钢铁厂	天津钢厂			0.5																		2018	建设中	
中海油圆水L336-1气田CO ₂ 捕集纯项项目	浙江省温州市	天然气处理		中海油圆水L336-1气田	燃烧前捕集	5																			停运	
中海油渤中10-6凝析气田1期开工工程	山东省滨州市	天然气处理		滨州天然气处理站	燃烧前捕集	28																			规划中	
中石油南方油田延迟CCUS项目	海南省澄迈县	石油开采	福山油田天然气处理站	油田伴生气	燃烧前捕集	10					罐车														投运中	
中海油恩平15-1油田CO ₂ 封存项目	深圳	石油开采	中海油	油田伴生气	燃烧前捕集	30						恩平15-1油田	咸水层封存	30											2017	投运中
中科院长春应用化学研究所吉林CO ₂ 基生物降解塑料项目	吉林省吉林市												CO ₂ 制可降解塑料	2		可降解塑料	5							2017	回搬运行	
中科院长春应用化学研究所瑞安CO ₂ 制多元醇项目	浙江瑞安												CO ₂ 制多元醇	0.2		多元醇									回搬运行	
中科院上海高研院CO ₂ 长链工业废气大规模重整转化制合成气关键技术示范	山西省长治市												重整制合成气	2		合成气									投运中	

项目名称	所在省市区	捕集										输送			利用与封存					吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态						
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式(外输气)	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)				资源总产量(万吨)					
中石油东北油田沧州CCUS项目	河北沧州											罐车(外输气)		中石油华北油田	八里西潜山	EOR	40		原油							运行中		
中石油新疆油田CCUS工业化项目	新疆克拉玛依													中石油新疆油田	克拉玛依油田八区530克下组砾岩油藏	EOR	30		原油							建设中		
中石油辽河油田盘锦CCUS项目	辽宁盘锦													中石油辽河油田	双229区块(参差、蓬、潜山、孔山)致密油等11个油藏单元	EOR	20		原油							建设中		
中石油南方油田临高CCUS项目	海南临高													福山油田		EOR	10		原油							建设中		
旭阳集团邢台焦炭烟气CO ₂ 捕集示范项目	河北邢台							0.75			99.99				市场销售										2022	投运中		
宝武集团乌鲁木齐欧冶炉冶金煤气CO ₂ 捕集	新疆乌鲁木齐																										建设中	

项目名称	所在省市	捕集										利用与封存							吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态			
		捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)	产品	产能(万吨/年)				资源总产量(万吨)		
华润集团肇庆10万吨/年纯气CO ₂ 捕集与矿化项目	广东肇庆	水泥生产	华润水泥(封开)有限公司	水泥窑烟气	燃烧后化学吸收法	10						华润水泥(封开)有限公司	市塚镇 5万吨干冰、5万吨湿冰、5万吨液碱土	10								800	2022	投运中
宁波钢铁2万吨/年石灰窑尾气CO ₂ 捕集与矿化项目	浙江宁波	钢铁生产	宁波钢铁	钢铁厂石灰窑尾气	燃烧后化学吸收法	2						宁波钢铁	市塚镇 1万吨干冰、1万吨矿化	2										规划中
清华大学盐城千吨级相变储能技术示范项目	江苏盐城		河北建滔	燃煤锅炉烟气	燃烧后化学吸收	0.1																	2022	投运中
中石油新疆油田CCUS先导项目	新疆克拉玛依	甲醇厂	新疆敦化石油技术有限公司	中石油克拉玛依石化公司甲醇	燃烧后化学吸收	10	2.5	45	99.96	NA	罐车	26	准噶尔盆地新疆油田	EOR	10	123.9	原油	1.4-3.9	49.51		800		2015	投运中
延长石油榆林煤化工公司30万吨/年CO ₂ 捕集装置项目	陕西榆林	煤制甲醇	榆林煤化工	煤制甲醇	燃烧前捕集	30			99.6														2022	投运中

项目名称	所在省市区	捕集工艺类型	经营主体	捕集源/CO ₂ 源	捕集			输送				利用与封存						吨CO ₂ 成本(元/吨)	投运年份	2023年状态						
					捕集技术	捕集规模(万吨/年)	能耗(GOJ)	水耗(吨)	CO ₂ 纯度(%)	CO ₂ 总产量(万吨)	输送方式	输送距离(km)	处置单位/企业	处置地点	处置技术	CO ₂ 年利用/注入量(万吨)	CO ₂ 总利用量(万吨)				产品	产能(万吨/年)	资源总产量(万吨)			
国电投长兴岛电厂10万吨级燃煤烟气ccus项目	上海市崇明区	燃煤电厂	长兴岛热电有限公司	燃煤烟气	燃烧后捕集	10																	2023	投运中		
华润集团深圳微藻固碳项目	深圳				燃煤电厂																				投运中	
广东能源湛江生物质电厂(微藻固碳)示范项目	广东湛江				生物质电厂																				投运中	
延长石油安塞化子坪36万吨/年CO ₂ 驱油与封存示范项目	陕西延安	煤化工	延长石油榆林煤化公司	煤化工	燃烧前																				投运中	
延长石油靖边区块5万吨/年CO ₂ 驱油与封存示范项目	陕西榆林、延安	煤化工	陕西延长石油榆林煤化工公司	煤化工	燃烧后捕集(预氧化)	30	NA	NA	99.8	5		罐车	200	延长石油榆林延链油田	陕西榆林靖边油田	EOR	5	13		原油	NA	NA	120		2013	投运中
300万吨CCUS示范项目	宁夏宁东	煤化工	国家能源集团		燃烧前捕集							管道		长庆油田	EOR+封存	250+50				原油					一期建设中	

