

碳中和目标下 CCUS 技术部署在公正转型中的协同效益

吕昊东^{1,2}, 鲁玺^{1,3,4}, 张贤²

(1.清华大学 环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2.中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038;
3.清华大学 碳中和研究院, 北京 100084; 4.清华大学 环境前沿技术北京实验室, 北京 100084)

摘要:全球经济社会发展高度依赖化石能源,特别是在工业、交通和电力等关键领域,化石燃料仍然是主要能源来源。然而,相关能源基础设施将持续排放大量温室气体,加剧气候变化,对全球气候环境及经济社会造成严重影响。随着国际社会对气候变化问题的关注不断提升,各国面临的减排压力和减排需求与日俱增,如何在保证经济发展的同时实现二氧化碳减排,已成为全球共同面临的重大挑战。碳捕集利用与封存(CCUS)技术作为中国碳中和技术体系中不可或缺的重要组成部分,在提高生态环境综合治理能力、保障能源安全、促进绿色经济发展和提升社会公平公正方面有良好的协同效益。立足全球气候变化治理与推动碳中和目标下经济社会发展的战略决策,以CCUS技术发展为基础,系统性地探索CCUS技术部署与环境、经济、社会的协同效益。研究表明,合理部署CCUS技术可以在实现大规模减排的同时,促进经济增长和社会进步,实现多赢。CCUS技术的应用将显著降低碳排放强度,提高能源利用效率,推动相关产业升级和创新发展。同时,通过政策引导和利益分配机制优化,CCUS技术有望促进区域经济协调发展,提升社会公平性,为公正转型提供有力支撑。研究为中国CCUS部署实现多维度协同效益提供新思路,也为共同促进经济社会公正发展提供参考。

关键词:CCUS; 公正转型; 协同发展; 碳中和; 综合效益

中图分类号: X701; F113 文献标志码: A 文章编号: 1006-4772(2024)10-0139-09

Synergistic benefits of CCUS technology in the just transition towards carbon neutrality

LYU Haodong^{1,2}, LU Xi^{1,3,4}, ZHANG Xian²

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China; 3. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. Beijing Laboratory of Environmental Frontier Technologies, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Global economic and social development is highly dependent on fossil fuels, particularly in critical sectors such as industry, transportation, and electricity, where fossil fuels remain the primary energy source. However, the associated energy infrastructure continues to emit substantial amounts of greenhouse gases, exacerbating climate change and causing significant impacts on the global climate environment and socio-economic systems. As international concern over climate change intensifies, countries are facing increasing pressure and demand to reduce emissions. How to achieve carbon dioxide emission reductions while ensuring economic development has become a major global challenge. Carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology, as an indispensable component of China's carbon neutrality technological framework, exhibits considerable synergistic advantages in enhancing comprehensive ecological and environmental governance, ensuring energy security, fostering green economic development, and advancing social equity and justice. Anchored in strategic considerations for global climate change governance and the promotion of socio-economic development under carbon neutrality objectives, the synergistic benefits of CCUS technology deployment across environmental, economic, and social

收稿日期: 2024-03-12; 责任编辑: 戴春雷 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24031201

基金项目: 科技部科技创新战略研究专项资助项目(ZLY202122); 北京市科协青年人才托举工程资助项目(BYESS2023234);
中国工程院战略研究与咨询资助项目(2023-XZ-24-04)

作者简介: 吕昊东(1991—),男,内蒙古包头人,助理研究员,博士。E-mail: lvhd318@163.com

通讯作者: 张贤(1981—),男,山东青岛人,研究员,博士。E-mail: zhangxian_ama@163.com

引用格式: 吕昊东, 鲁玺, 张贤. 碳中和目标下 CCUS 技术部署在公正转型中的协同效益[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 139-147.

LYU Haodong, LU Xi, ZHANG Xian. Synergistic benefits of CCUS technology in the just transition towards carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 139-147.



dimensions were systematically investigated, predicated on the advancement of CCUS technology. The findings indicate that the strategic deployment of CCUS technology can significantly reduce emissions while simultaneously fostering economic growth and social progress, achieving multiple benefits. Specifically, CCUS is expected to lower carbon emission intensity, enhance energy utilization efficiency, and catalyze industry innovation and upgrading. Through policy support and optimized benefit distribution mechanisms, CCUS can promote balanced regional economic development, elevate social equity, and robustly support a just transition. Novel insights into achieving multidimensional synergistic benefits in China's CCUS deployment were provided and theoretical and scientific references for the collective promotion of equitable socio-economic development were offered.

Key words: CCUS; just transition; synergetic development; carbon neutrality; comprehensive benefits

0 引言

全球经济社会发展高度依赖化石能源,相关能源基础设施仍将排放大量温室气体和大气污染物,对气候、环境和健康造成严重影响^[1]。为应对全球气候变化,并实现《巴黎协定》规定的2℃/1.5℃温控目标,化石能源向非化石能源转型成为实现气候变化目标和可持续发展的关键步骤之一^[2]。《联合国应对气候变化公约》第28届缔约方大会(COP28)进一步重申了《巴黎协定》温控目标的重要性 and 迫切性,同时达成了迪拜共识,呼吁以公正、有序和公平方式在能源系统中转型脱离化石燃料^[3]。我国协同推进降碳、减污、扩绿、增长,把绿色发展理念贯穿于经济社会发展全过程各方面。2021年,《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》明确:到2060年实现碳中和,中国非化石能源消费比重达80%以上。化石能源与非化石能源之间平稳有序过渡是一个紧迫的现实需求,也是实现能源供需平衡和供应安全的重要保障^[4]。能源低碳转型涉及到广泛的社会经济影响,然而,其过激调整必将导致大规模固定资产成本搁浅、大量传统能源就业岗位消失、严峻的能源安全和公众健康风险^[5-6]。实现公正转型成为能源转型路径中重要关注点。

随着全球碳中和共识的达成和对能源供应安全的重新布局,碳捕集利用与封存(CCUS)已成为实现全球2℃和1.5℃气候目标的重要技术保障。近年来,CCUS技术不断发展,减排潜力亟待释放,为避免化石能源基础设施激进转型引发的风险冲击,推动全球气候治理,有必要积极部署CCUS技术,为全球缓减气候变化提供成本可控、技术可行、应用可推广的重要技术支撑,也为未来保障全球化石能源低碳安全转型、实现经济社会高质量发展、促进全球气候环境公正转型提供新动能。笔者以CCUS技术发展为基础,从能源低碳转型、生态环境保护、资源节约利用、经济社会发展、就业机会增加等角度探索CCUS技术部署与环境、经济、社会的协同效益,并提出针对性的管理

策略,为形成碳中和目标下系统的、多学科交叉的零碳、负碳技术公正转型研究体系奠定理论基础。

1 能源低碳技术公正转型机理

1993年公正转型概念正式提出,目的是为那些因环境保护政策而失去工作的劳动者提供经济援助。2010年在墨西哥坎昆举行的第16届气候变化大会上,公正转型概念作为长期全球气候行动的共同愿景的一部分纳入了《坎昆协议》,该协议表明,将劳动者权益保障与应对气候变化联系起来是气候行动中应重点考虑的问题。应对气候变化需从根本上改变世界生产和消费方式,这将对企业和劳动者产生积极和消极影响^[7]。2014年,国际工会联盟提出,承诺在从工作场所到国家层面的社会对话基础上实现公正转型,并确保绿色技能和社会保护。通过制定《国际劳工组织准则》努力确保劳动者的资本更多地投向实体经济,包括产业转型和新的绿色就业岗位^[8]。在气候转型过程中,主要挑战之一是创造新的绿色就业机会,避免因气候行动导致贫困等负面事件,同时促进气候行动盈利,实现经济社会结构性可持续转变。公正转型的理念不应附加于气候和能源政策,而应成为贯穿政策规划、制定、执行与评估等全过程的重要组成部分,通过适当的手段开创低碳经济中就业与社会的新局面^[7]。

2022年11月,《联合国气候变化框架公约》第27次缔约方会议(COP27)已申明,应对气候危机的可持续和公正的解决方案必须建立在所有利益相关方进行有意义和有效社会对话和参与基础上,指出全球向低排放转型为可持续经济发展和消除贫困提供机遇和挑战。同时强调公正和公平的转型包括能源、社会经济、劳动力和其他方面的途径,所有这些途径都必须以国家确定的发展优先事项为基础,并包括社会保护,以便减轻与转型有关的潜在影响,同时强调与社会团结和保护有关的政策规定在减轻应用措施影响方面的重要作用。

技术创新在解决能源公正转型问题中扮演着重要角色,大部分研究聚焦于新型能源体系对于能源转型的作用。比如,可再生能源技术创新可提高可

再生能源系统效率、可靠性和可持续性,解决能源存储和输送方面的挑战,并通过集成创新技术,提高传统能源系统的能效和可持续运营能力,利于推动能源转型,实现可再生能源大规模应用,并减少对化石能源的依赖^[9-10]。电池技术、氢能源和热储能等技术可有效储存和利用可再生能源,利于解决可再生能源间歇性和波动性问题,提高能源系统稳定性和可靠性^[11-13]。此外,智能电网和能源互联网技术,如智能电表、电力系统调度和能源交易平台也为能源公正转型提供创新解决方案^[14-15]。可再生能源广泛应用将确保各社区,尤其是偏远和低收入地区,能公平地获取清洁、可靠的能源。这种转型推动了经济和社会的包容性发展,还强化了全球对抗气候变化的努力,促进全社会的公平和公正。相比可再生能源等新型能源技术,现有文献研究对于传统能源转型关注较有限,较多研究仅局限于 CCUS 改造^[16-19]、天然气替代中作用^[20]。在以往研究中,对于煤炭和煤电退役的问题^[21-23]及相关影响进行了一系列探索。然而,对于化石能源转型所带来环境-经济-社会问题的讨论相对较少。

化石能源在当前能源结构中仍占主导,短期内在能源供应上仍有高成熟度和稳定性。CCUS 技术被认为是化石能源行业中实现减排并推动能源公正转型的应对路径。作为中国应对气候变化和实现碳中和不可或缺的技术保障,CCUS 技术有从能源利用和工业过程等排放源及大气中捕集、分离 CO₂ 的能力,将 CO₂ 输送至适宜的地点进行再利用或封存,最终实现减排目标。2021 年,政府间气候变化专门委员会第 6 次评估报告 (IPCC AR6) 的第一工作组报告再次强调了生物质能耦合碳捕集与封存 (BECCS) 和直接空气捕集与封存 (DACCS) 技术在实现全球温室气体控制目标方面的关键作用^[24]。第三工作组报告于 2022 年发布,进一步指出 BECCS 和 DACCS 的重要性。BECCS 技术通过捕集和封存来自生物质能源转换过程 CO₂,而 DACCS 技术则直接从大气中捕集 CO₂ 并永久封存^[5]。这两项技术进一步突显了其在实现负碳效应方面的战略地位。

2 CCUS 的能源公正转型效益体系

2.1 环境效益促进低碳发展

CCUS 提升碳污同治能力,促进生态系统可持续发展。CCUS 技术可减少化石燃料燃烧等能源生产和工业过程中 CO₂ 排放,可实现全生命周期净零排放,为加快推进应对气候变化行动提供驱动力。IEA 在 2050 年能源部门净零排放情景下 CCUS 技术

贡献研究中表明,到 2030 年,每年的碳捕集量将达 16 亿 t,到 2050 年将达 76 亿 t^[25]。在该情景中,单独的 CCUS 设施目前每年可捕集约 100 万 ~ 200 万 t CO₂。到 2030 年,CCUS 集群建设每年将能减排 500 万 ~ 1 000 万 t CO₂^[26]。因此在 2030 年前,每年约需建造 2 个 CCUS 集群以满足 2050 年能源部门净零需求。IPCC 在全球升温 1.5 °C 特别报告中对 90 种减排情景进行评估,几乎所有情景都需 CCS 的参与才能将温升控制在 1.5 °C 内^[27]。在所有情景中,2050 年的平均碳排放总量 100 亿 t/a^[26]。

IPCC AR6 报告明确指出,BECCS 和 DACCS 技术将生物质能源转化和大气中 CO₂ 进行捕集,通过永久封存实现负排放。2 项技术的纳入进一步完善了 CCUS 技术体系,为全球碳中和目标提供坚实支持。预测显示,到 2050 年,BECCS 和 DACCS 的减排潜力预计分别为 5.2 亿 ~ 94.5 亿和 17.4 亿 t/a (以 CO₂ 计,下同);在可持续发展情景下,到 2070 年,这些潜力分别可达 26 亿和 2.7 亿 t/a^[5,28]。CCUS 技术利于提高生态环境综合治理能力,还可在实现 CO₂ 减排的同时减少空气污染物排放,推动协同治理^[28]。通过用 CO₂ 驱替深部咸水层技术 (CO₂-EWR),将捕集 CO₂ 注入咸水层进行驱替并淡化利用,可解决中国西部水资源短缺问题,同时提高 CO₂ 封存工程的安全性^[18,29]。此外,结合生物质利用的 CCUS 技术还能有效增加土壤碳储量,改善土壤健康状况,且促进生物多样性的提升。

CCUS 有效降低资源依赖,推进资源全面节约和循环利用。CCUS 的 CO₂ 利用环节通过利用其物理、化学或生物作用,在减少 CO₂ 排放的同时实现能源增产增效、矿产资源增采、化学品转化合成、生物农产品增产利用和消费品生产,能同时兼顾保障能源资源供给、强化循环利用、控制碳排放和保护环境等多方面需求^[30]。一方面,CCUS 与相关能源系统结合可培育 CCUS 发展的技术经济新范式,突破 CO₂ 利用的经济性与规模性。氢能与 CCUS 间有显著协同效应,利用低排放氢能和 CCUS 技术将在推进中国实现碳中和目标中发挥重要作用。将 CCUS 技术用于氢气生产,是目前 CO₂ 捕集成本最低机会之一,利于扩大早期 CCUS 规模。同时耦合 CCUS 制氢成为短期内实现中国低排放制氢的经济有效途径。这种创新的应用降低了碳排放,还为中国绿色能源转型提供实质性支持。中国实现碳中和目标,氢能和 CCUS 将累计贡献 13% 的减排量^[31]。另一方面,CCUS 技术可将提纯后的 CO₂ 用作碳原料,广泛用于交通、化工、建筑等领域,削减了对化石能源需求,也实现碳元素的绿色、清洁供应,

推动产业结构向更环保可持续的方向发展。如通过氢与 CO₂ 结合, 可生产柴油、甲醇和煤油等氢能衍生物, 可直接取代目前在重型公路运输、航运和航空等难减排部门使用的化石燃料。甲醇还可作为碳中性塑料工业的核心成分, 且 CO₂ 可在塑料材料中可保持多年, 促进化石行业脱碳, 还提供更高的行业整合, 同时提供绿色燃料/原料供应的灵活性和安全性。此外, 来自氢电解和合成燃料工厂的余热还可用于区域供热^[32]。

2.2 经济效益推动韧性发展

CCUS 促进传统能源向清洁能源低碳转型, 加速技术-经济协同融合发展。目前 CCUS 技术体系不断成熟, 通过低成本、低能耗技术升级与技术迭代增强了 CCUS 系统性能。同时将 CCUS 纳入低碳技术组合可提供低成本能源转型方案、可降低能源基础设施改造成本并实现碳中和目标的经济成本, 当碳捕集技术的灵活性、可靠性和碳强度得到充分重视时, 它在电力系统中就会更具竞争力。不同技术类型和应用场景下, CCUS 的捕集成本通常超过 50 美元/t (以 CO₂ 计, 下同), 若耦合能源基础设施改造, 捕集成本约 60~105 美元/t。BECCS 和 DACCS 的成本相对高, 捕集成本分别在 15~400 美元/t 和 100~300 美元/t 以内^[28,30,33]。如将自然碳汇技术纳入, 尽快部署碳移除 (CDR) 技术体系将避免由于气候行动延迟导致的约 1 460 亿~2 320 亿美元/t 的移除成本^[34]。随着全球气候治理的不断深入和能源需求的不断扩大, 仅依靠风能和太阳能等可再生能源并不足以满足以上需求。然而, 在能源转型中, CCUS 将一定程度比传统技术提升更多减排成本, 但相比增加的能源成本, 继续向大气中排放 CO₂ 带来的社会成本将更高。到 2050 年, 加装 CCUS 的发电厂将提供全球发电量 5% 的电力。全球燃煤发电量中有 40% 来自加装 CCUS 的燃煤电厂, 而天然气发电量中有 16% 来自加装 CCUS 的天然气电厂。IEA 研究表明^[35], 如果全球能源系统中 CCUS 可用性受限制, 那么电力部门的边际减排成本将从 2060 年的 250 美元/t 增至 450 美元/t。

CCUS 可保护能源基础设施资产, 促进经济社会全面绿色发展。在实现经济社会高质量发展的前提下, 全球大部分化石能源基础设施在短期内还不会面临较大的退役风险, 而且全球能源基础设施平均运行年限都较短。较多亚洲国家燃煤电厂的平均寿命少于 20 a, 中国仅 13 a, 欧洲为 35 a, 美国 40 a 左右。目前全球运营的 2 100 GW 燃煤发电能力和在建的 167 GW 燃煤发电能力中, 到 2050 年仍有约 1 440 GW 在运行, 其中中国有 900 GW^[35-36]。然

而, 在全球迈向低碳转型和净零排放的背景下, 未来火电、钢铁和水泥行业的持续惯性投资仍会使大量基础设施的平均服役寿命缩减至 10~20 a, 造成巨额资本搁浅风险。以我国煤电发展为例, 我国现役 40% 的燃煤电厂的厂龄不足 10 a^[37], 剩余服役年限较长 (图 1), 如强制退役将引起大量资产搁浅。

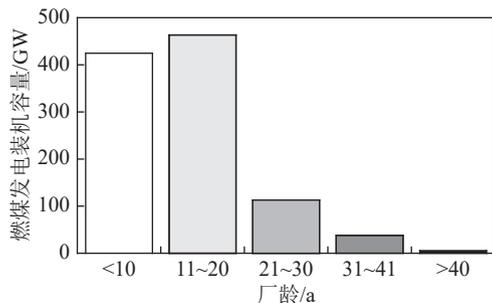


图 1 中国燃煤电厂机组平均厂龄

Fig. 1 Average age of units at coal-fired power plants in China

中国燃煤机组 CCUS 改造潜力如图 2 所示。若考虑燃煤机组 40 a 的运行寿命和 15 a 的 CCUS 改造投资回收期, 2030—2035 年将成为最佳改造窗口期, 改造潜力将达 248.54~477.82 GW^[19,38], 可较大程度避免现役电厂强制退役。燃煤电厂或燃气电厂的退役也意味着对其他低碳电力来源和配套基础设施的更多投资。鉴于化石燃料发电机组的年轻寿命和国家日益严格排放法规, CCUS 改造提供了一个重要资产保护策略, 使其能在现有基础设施继续运营的同时实现碳减排目标, 回收剩余风险资本。在 2℃ 情景下, 2015—2050 年, 全球化石燃料基础设施资产搁浅将达 1 亿~4 万亿美元, 在 1.5℃ 情景下, 资产搁浅成本则更高, CCUS 是避免大规模化石能源固定资产搁置损失的有效技术手段^[5]。

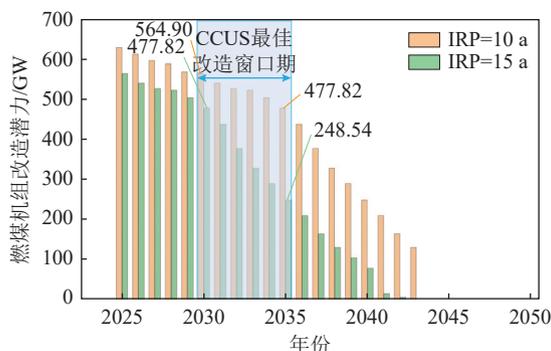


图 2 中国燃煤机组 CCUS 改造潜力

Fig. 2 CCUS retrofitting potential of coal-fired units in China

中国长久以来以煤炭为主的能源结构已造成以重工业为主的产业结构和技术路径的锁定效应, 产业转型面临一定困难。因此通过 CCUS 耦合能源基础设施灵活性改造, 可提升提高化工/钢铁/水泥等工业产能、优化能源及工业过程减排路径^[39-40]。

CCUS 可促进绿色投资, 增强碳中和经济动能。COP 27 气候变化大会提出要关注并关切发展中国家缔约方需求间不断扩大的差异, 尤其是由于气候变化影响日益加大和债务增加而造成的需求, 目前这类需求在 2030 年前约 5.8 万亿 ~ 5.9 万亿美元。2019—2020 年, 全球气候资金流约 8 030 亿美元, 占《巴黎协定》温控目标所需年度投资的 31% ~ 32%。超前部署 CCUS 为高效利用气候资金实现全球气候变化治理提供技术解决方案。而且如果没有 CCUS, 一些国家不断上涨的碳价格可能使其重工业产业失去国际竞争力, 迫使生产转移到排放不受监管的国家。此外, 国际政府及相关金融领域也在积极寻求社会资本投资, 与 CCUS 相关环境、社会和治理资产预计将在 2025 年达 53 万亿美元^[26]。美国能源部的负碳发射倡议 (Carbon Negative Shot Initiative) 呼吁在 CO₂ 移除途径上进行创新, 提出要到 2025 年累计投资 1 亿美元用于支持碳移除和碳利用示范项目, 并支持推进强有力的测量、报告和验证工作。

2.3 社会效益保障包容性发展

CCUS 在支持现代灵活的电力系统方面发挥着重要作用, 有效保持电力可持续供应。到 2050 年, 加装 CCUS 的化石燃料电厂将产生超过全球 5% 的电力, 配备 CCUS 的煤炭和天然气发电厂对于安全、经济和可持续的电力系统越来越重要。在可持续发展情景下, 虽然 CO₂ 和空气污染政策结合将导致燃煤发电的份额大幅下降, 但在剩余燃煤发电中, 40% 来自加装 CCUS 技术的工厂^[41]。到 2040 年, 用 CCUS 技术的 160 GW 燃煤机组将产生 1 000 TW·h 的发电能力, 约占全球发电量的 2.6%。到 21 世纪 20 年代中期, 天然气发电在全球内不断增长, 在电力结构中占比达 24% 左右, 有碳捕集能力的天然气电厂在 2040 年生产约 900 TW·h 的电力, 约占燃气发电总量 16%^[35]。实现气候目标还意味着建立一个极其灵活的电力系统, 可管理高比例的可再生能源。加装 CCUS 的火电厂将成为未来高度灵活电力系统的重要组成, 火力发电在平衡可再生能源波动性造成的季节性或长期电力短缺方面发挥重要作用^[6]。因此在充分考虑电力系统可靠性、灵活性及碳排放的情况下, CCUS 技术对保障电力供应和能源安全更具竞争力。

CCUS 耦合可再生能源能有效提升电力保障能力, 支持能源多元化利用途径。CCUS 耦合可再生能源和储能系统可通过提高多能互补的能源系统和工业领域中可靠性、灵活性、分割性和适应性, 推动能源系统的韧性发展, 对于构建清洁低碳安全高

效的能源体系起关键支撑作用。一方面, 分布式能源基地、热电联产机组和储能设备可在提高可再生能源消纳, 减少对化石能源需求的同时加强能源系统灵活性, 增加能源多样性和平衡地区资源禀赋差异性, 并降低不可控风险^[42-43]。另一方面, 由于目前高比例可再生能源电力系统面临间接性能源带来的不稳定和不可控性问题, 以及大规模储能技术成本高昂的挑战, 在电力系统转型初期, 煤电仍将发挥其稳定及持续的优势, 在可再生能源出力不足的时候, CCUS 可作为煤电托底性保障提供可靠的电力^[39]。此外, CCUS 与可再生能源结合进一步支持了能源多元化战略的实施。通过利用 CCUS 技术捕集处理 CO₂, 可探索新的能源利用方式, 如转化为燃料或其他高价值化学品, 利于减少传统化石燃料依赖, 还能开发出新的经济增长点, 促进清洁能源和化学产业发展。

CCUS 也能提升多样化就业前景和技能, 降低失业风险并减少贫困。CCUS 在设施设计、建设、运营维护及下游产品生产各环节需大量劳动力, 将为经济增长和创造就业带来积极的协同效益。此外, CCUS 在实现公正转型过程中, 允许现有行业保持竞争力, 保持和创造就业机会, 并在向净零未来转型的同时继续为当地经济做出贡献。在多元政策工具支撑下, CCUS 技术推广将提升多样化就业前景和技能、降低失业风险, 减少贫困, 促进社会公正。受益于 CCUS, 加拿大的 Boundary Dam CCS 项目建设阶段雇用 1 700 名建筑工人。CCUS 设施运行和维护同样需工作岗位支撑, 一个商业 CCUS 设施可能会雇用约 20 名操作员和维护人员, 同时支持提供其产品和服务的公司^[44]。美国将提供 37 亿美元变革性投资, 旨在扩大 CCUS 等零碳技术的商业应用, 为全国各地带来就业机会。到 2045 年化石燃料生产行业将增加 1 500 ~ 3 300 名工人的就业^[45]。到 2050 年, 全球 CCS 行业必须增长超过 100 倍, 以实现《巴黎协定》的气候目标, 这意味着 10 万个建筑工作岗位和 3 万 ~ 4 万人的持续工作^[44,46]。在碳进口行业中, 只增加了有限的就业, 约 200 ~ 500 名员工, 包括 CO₂ 航运、CO₂ 从港口到封存地的管道运输及 CO₂ 的封存。此外, 作为 BECCS 的资源基础, 生物质能发展带来了新的经济增长和就业曙光。2020 年, 生物质能产业年销售收入约 1 200 亿元, 提供就业岗位 400 万个, 农民收入增加 200 亿元, 经济和社会效益明显^[47]。DACCS 将成为一个新的行业, 技术与产业发展将创造多样化就业机会。未来, DACCS 全产业链每百万吨的捕集规模将创造约 3 500 个工作岗位。

由于资源、基础设施、运输、劳动力和供应商的易得性，排放密集型产业往往在集群中发展。许多当地社区依靠这些集群来支持其就业和支撑当地经济，关闭这些排放密集型产业意味着这些社区和人们将面临严重经济和社会混乱。CCUS除保留传统能源、工业行业相关工作外，还可通过利用现有的基础设施帮助这些排放密集型产业转型为近零排放的产业，保护当地就业和社区。而且，在这些能源与工业密集型地区，通过CCUS部署还可将其改造为低碳技术中心，吸引新的低碳企业^[26]。进一步，CCUS集群建设还可分担基础设施成本，创造其他规模经济，并通过领先的CCUS技术在工业脱碳领域创造更大的就业环境。如美国零碳亨伯（Zero Carbon Humber）CCUS集群项目建设阶段评估认为CCUS集群将直接在建筑业创造5 500个就业岗位，而且在保护当地现有产业和就业基础上，还将帮助创造至少7 000个额外就业机会^[26]。挪威北极光（Northern Lights）CCUS集群项目建设阶段将带来1 500~3 000个工作岗位，运营期间直接创造了约170个工作岗位^[26]。

CCUS社会公正转型需政府、企业、个人共同参与，协同发力。对政府而言，政府有全面的经济视角，也有许多公正转型的工具，包括财政措施、技术研发、基础设施和社会保护，是CCUS公正转型过程的关键参与者，决定CCUS技术突破、项目部署、商业模式及劳动力市场政策规则。因此政府在推动CCUS商业化行动和确保体面工作、社会包容方面有双重作用。对企业而言，在可持续发展和

消除贫穷的背景下实现经济高质量发展，将需调动和引导CCUS社会投资，为企业的繁荣创造有利环境，并创造体面的工作机会。对个人而言，应保证支持性立场，在CCUS各环节技术研发、商业化部署和知识传播方面给予支持，同时确保自身的岗位资格和就业能力，为发展新业务创造新技能。

2.4 CCUS公正转型促进经济社会系统性变革

综上，CCUS技术部署体现了全球气候变化治理体系下低碳、韧性和包容性的协同发展。CCUS能源-经济-社会公正转型三角如图3所示。

低碳发展推动了传统化石能源向清洁能源系统转型进程，并通过加速CCUS技术体系构建提升碳污同治能力，助力生态环境可持续发展，进一步实现CCUS与能源-碳排放-水资源的协同耦合。韧性发展展现了CCUS技术对于促进电力系统灵活性运行的调节能力，通过有序、有效部署CCUS及其与可再生能源系统耦合技术，提升能源基础设施资产搁浅风险抵御能力及电力供应和能源安全保障能力，实现最大化的绿色经济效益。具备包容性的CCUS部署，意味着CCUS部署要为社会公平稳定性和可持续性提供重要保障，坚持以人为本的原则，公平合理地分配利益、分担风险和承担责任，创造多样的就业环境和培训机会，为社会公平发展带来新动能。

钢铁、水泥、化工和冶金等重工业领域CCUS技术应用同样彰显了其在环境低碳发展、经济韧性发展和社会包容性发展方面的潜力。首先，CCUS技术为高排放行业带来了技术创新的机会，

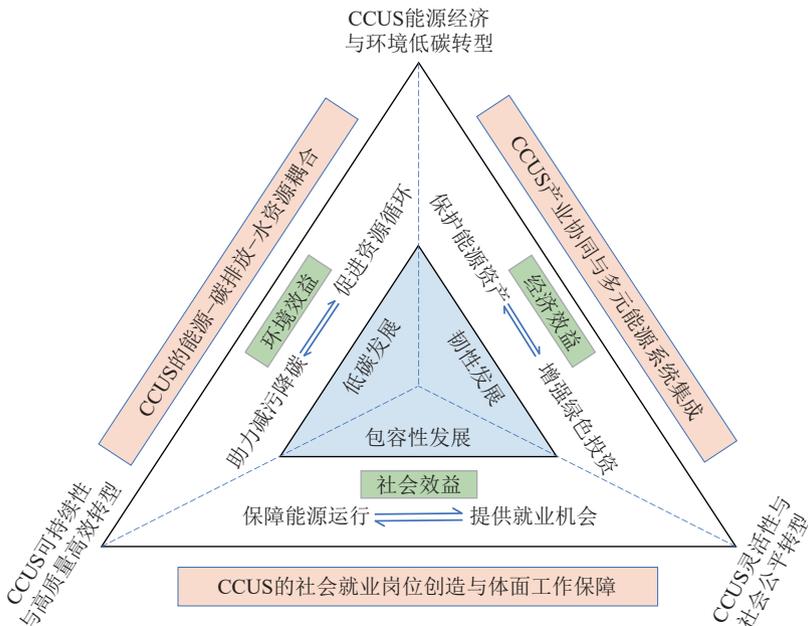


图3 CCUS能源-经济-社会公正转型三角

Fig. 3 Just transformation triangle of energy-economy-society with CCUS

直接应对气候变化。如在钢铁生产中, CCUS 能捕集高炉或电弧炉排放 CO₂, 显著降低温室气体排放。水泥行业中, CCUS 则可用于熟料生产过程, 从源头减少碳排放。其次, 在经济韧性方面, CCUS 技术部署有助于重工业企业适应日益严格环境法规, 减少潜在的碳税负担, 同时开拓新的市场机会。如通过 CCUS 技术转化 CO₂ 可作为原料在化工产品中再利用, 创造出附加值较高的产品, 增强企业的市场竞争力。对于社会包容性发展, 所有行业则均需关注当地社区创造就业机会的潜力, 确保技术转型的社会公平性。

CCUS 公正转型的低碳、韧性和包容性发展三者实现相辅相成, 互相促进, 是新形势下实现能源/工业系统环境-经济-社会综合效益的当务之急和首要任务, 也是碳中和目标下经济社会系统性变革的重要体现。当然, CCUS 技术对全球不同区域的公正转型也会产生差异化影响。在环境方面, 发达国家通过 CCUS 技术实现工业排放降低和污染物的协同控制。相比之下, 中国等许多发展中国家采用 CCUS 技术推动环境管理的现代化, 已在降碳、减污、扩绿、增长方面取得显著成就, 展示了对环境可持续发展的承诺和技术实施能力。经济上, 发达国家利用 CCUS 开发高附加值 CO₂ 利用途径, 提升市场竞争力; 发展中国家则通过 CCUS 拉动投资, 促进技术和经济增长。社会发展方面, 发达国家通过 CCUS 巩固绿色技术产业的领先地位, 而发展中国家更多强调促进新的绿色产业链形成, 推动社会经济结构优化。因此 CCUS 技术的推广需考虑地区差异, 以实现各国环境保护与经济的双重目标。

3 结论与建议

1) CCUS 可实现促进传统能源向清洁能源低碳转型、促进经济社会全面绿色发展增强碳中和经济动能、推动社会包容发展创造就业机会 3 方面的协同效益, 共同促进气候环境公正发展。

2) CCUS 部署提升了减污降碳潜力, 同时有效降低资源依赖, 推进资源全面节约和循环利用。能源基础设施加装 CCUS 可提高设施服役期产能、保护能源基础设施资产, 避免大规模资产搁浅风险, 促进经济社会全面绿色发展。此外, CCUS 低成本的零排放效应对工业延续、能源基础设施正常运行及其支持的就业岗位至关重要。

结合中国 CCUS 技术发展现状和面临的需求与挑战, 提出建议如下:

1) 科学统筹 CCUS 技术发展路径, 有序部署 CCUS 研发推广与应用。在避免高位达峰的同时警

惕高碳锁定和技术锁定带来的资本搁浅风险; 也要超前布局新一代颠覆性负排放技术研发, 补齐 DACCS、制备燃料、海底封存、集群枢纽、安全监测等技术短板和缺项, 为零碳及负碳技术和产业竞争做好准备。

2) 合理布局 CCUS 集群和基础设施建设, 因地制宜推动 CCUS 技术集成示范。统筹考虑 CCUS 各环节技术的成熟度、经济可行性、技术风险与社会环境效益等因素, 建设一批规模化、集群化的 CCUS 示范项目, 优化陆海管网布局。同时明确各利益相关方在项目中的利润分配、责任承担及风险共担机制, 加速促进 CCUS 产业化发展。

3) 立足责任、平等和能力等公平原则, 统筹 CCUS 在区域、部门和代际层面环境、经济、社会问题, 促进气候环境公正发展。在项目部署和政策制定中, CCUS 技术项目必须提供与优先事项一致的切实的非气候利益, 确保区域空气和水质量、土地利用和生态完整性、健康和安全性, 保障就业机会和强有力的公众参与, 并在项目实施过程中增强社区的包容性和参与性进程。

4) 有效制定强有力的 CCUS 监管框架, 加强 CCUS 针对性的政策激励。在碳达峰碳中和“1+N”政策框架下, 建立科学合理的 CCUS 政策体系, 包括制定 CCUS 行业规范、法规和项目审批标准, 确保项目审查、开发和运营的有序进行。同时因地制宜设计适合国情的 CCUS 税收优惠和激励政策, 探索将 CCUS 纳入绿色金融与碳交易市场体系, 并推动同步纳入绿色发展鼓励项目。

参考文献 (References):

- [1] 《全球能源基础设施排放数据库》工作组. 全球能源基础设施碳排放及锁定效应 [R]. 北京: 清华大学碳中和研究院, 2021.
- [2] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下能源经济转型路径与政策研究 [J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-66.
ZHANG Xiliang, HUANG Xiaodan, ZHANG Da, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. Journal of Management World, 2022, 38(1): 35-66.
- [3] UNFCCC. Outcome of the first global stocktake [EB/OL]. (2023-12-13)[2024-02-10]<https://unfccc.int/documents/636608>.
- [4] 施训鹏. 以人为本实现公平正义的能源转型 [J]. 环境经济研究, 2021, 6(3): 1-7.
SHI Xunpeng. People-centred just energy transitions for social justice[J]. Journal of Environmental Economics, 2021, 6(3): 1-7.
- [5] IPCC. 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]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

- [6] 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.
ZHANG Xian. The application prospect of CCUS in China under the target of carbon neutrality[J]. China Sustainability Tribune, 2020(12): 22–24.
- [7] 周杰侯. 再分配视角下碳中和与公正转型的实施路径探讨 [EB/OL]. (2022-05-31)[2024-02-10]. <https://iigf.cufe.edu.cn/info/1012/5305.htm>.
- [8] Just Transition Centre. Just transition: a report for the OECD[EB/OL]. (2017-05-29)[2024-02-10]. <https://www.ituc-csi.org/just-transition-centre>.
- [9] GIELEN D, BOSHELL F, SAYGIN D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2019, 24: 38–50.
- [10] TURLEY B, CANTOR A, BERRY K, et al. Emergent landscapes of renewable energy storage: considering just transitions in the western United States[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 90: 102583.
- [11] HUANG W C, ZHANG Q Z, YOU F Q. Impacts of battery energy storage technologies and renewable integration on the energy transition in the New York State[J]. *Advances in Applied Energy*, 2023, 9: 100126.
- [12] PARRA D, VALVERDE L, PINO F J, et al. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 279–294.
- [13] 郑琼, 江丽霞, 徐玉杰, 等. 碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 529–540.
ZHENG Qiong, JIANG Lixia, XU Yujie, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 529–540.
- [14] LEI Y Y, LIANG Z J, RUAN P. Evaluation on the impact of digital transformation on the economic resilience of the energy industry in the context of artificial intelligence[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 785–792.
- [15] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735–2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2735–2745.
- [16] LIU H W, GALLAGHER K S. Catalyzing strategic transformation to a low-carbon economy: a CCS roadmap for China[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 59–74.
- [17] FAN J L, XU M, WEI S J, et al. Carbon reduction potential of China's coal-fired power plants based on a CCUS source-sink matching model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105320.
- [18] WEI N, JIAO Z S, 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.
- [19] YANG L, WEI N, LV H D, et al. Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China's coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation[J]. *iScience*, 2022, 25(12): 105664.
- [20] OGDEN J, JAFFE A M, SCHEITRUM D, et al. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: insights from the literature[J]. *Energy Policy*, 2018, 115: 317–329.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [25] IEA. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [26] The CCUS Hub. The CCUS hub playbook—A guide for regulators, industrial emitters and hub developers [EB/OL]. [2024-02-10]. <https://ccushub.ogci.com/ccus-basics/>.
- [27] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 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]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [28] 彭雪婷, 吕昊东, 张贤. IPCC AR6 报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 580–590.
PENG Xueting, LYU Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology development[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(5): 580–590.
- [29] YANG L, LV H D, JIANG D L, et al. Whether CCS technologies will exacerbate the water crisis in China? —A full life-cycle analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110374.
- [30] 黄晶. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [31] IEA and ACCA21. Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China [EB/OL]. [2024-02-10]. <https://www.iea.org/reports/opportunities-for-hydrogen-production-with-ccus-in-china>.
- [32] State of Green. White papers for a green transition: carbon capture, utilization and storage-picking the high-hanging fruits in CO₂ mitigation[EB/OL]. [2024-02-10]. www.stateofgreen.com/publications.
- [33] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70–80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 70–80.
- [34] Research Square. The consequences of inaction on carbon dioxide removal [EB/OL]. (2021-11-10)[2024-02-10]. <https://www>.

- [researchsquare.com/article/rs-422173/v1](https://www.researchsquare.com/article/rs-422173/v1).
- [35] IEA. The role of CCUS in low-carbon power systems[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [36] IEA. CCUS in clean energy transitions[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [37] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [38] FAN J L, XU M, LI F Y, et al. Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: The technology lock-in and cost optimization perspective[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 326–334.
- [39] 中国能源建模论坛 (CEMF). 能源转型的低碳、韧性、包容性发展 [R]. 北京: 清华大学产业发展与环境治理研究中心 (CIDEG), 美国环保协会 (EDF), 2022.
- [40] 赵鲁涛, 李丰荣, 李照源, 等. 中国绿色低碳经济政策: 进展与展望 [J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 128–137.
ZHAO Lutao, LI Fengrong, LI Zhaoyuan, et al. China's green and low-carbon economic policies: progress and prospects[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 128–137.
- [41] IEA. Energy technology perspectives 2020[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [42] LIU G D, JIANG T, OLLIS T B, et al. Resilient distribution system leveraging distributed generation and microgrids: a review[J]. *IET Energy Systems Integration*, 2020, 2(4): 289–304.
- [43] REN21. Is renewable energy the definition of resilience?[R]. Paris: REN21, 2020.
- [44] GCCSI. State of the art: CCS technologies 2022[EB/OL]. [2024–02–10]. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-of-the-Art-CCS-Technologies-2022.pdf>.
- [45] Energy Central. CCUS economics impacts study: delivering a roadmap for growth and emissions reductions for Scotland[EB/OL]. [2024–02–10]. <https://energycentral.com/c/og/ccus-economic-impacts-study>.
- [46] GCCSI. Global status of CCS 2022 report[EB/OL]. [2024–02–10]. <https://status22.globalccsinstitute.com/>.
- [47] 国家能源局. 国家能源局关于印发《生物质能发展“十三五”规划》的通知 [EB/OL]. (2016–11–28)[2024–02–10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/t20161205_2328.htm?key words=.