DOI: 10.19666/j.rlfd.202210245

欧洲 CCUS 技术发展现状及对我国的启示

甘满光[1,2]，张力为[1,2]，李小春[1,2]，李 琦[1,2]，陆诗建[3,4]
（1.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；
2.中国科学院大学，北京 100049；3.中国矿业大学碳中和研究院，江苏 徐州 221008；
4.中国矿业大学江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室，江苏 徐州 221008）

［摘 要］在欧盟提出 2050 年实现碳中和愿景的大背景下，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术作为实现碳减排目标的关键技术手段，在欧洲迎来了重大发展机遇。汇总并讨论了欧洲的 CCUS 技术发展现状，包括资金激励政策、碳税政策、法律法规和技术创新政策；总结了欧洲发展 CCUS 技术主要面临的挑战，包括公共资金的落实、CCUS 政策体系的发展以及 CCUS 项目责任的界定等。研究指出：欧洲的 CCUS 技术发展较成熟，相关法律法规、资金激励、税收扶持政策和技术创新政策等比较完善；生物质能结合碳捕集与封存（BECCS）和直接空气碳捕集与封存（DACCS）是欧洲未来实现 CO_2 负排放的重要手段，CO_2 工业集群和运输网络的开发可以大幅减小 CO_2 的运输费用，形成规模化效应，从而增大 CCUS 的适用范围。我国于 2020 年提出 2030 年实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的“双碳”战略目标，借鉴欧洲 CCUS 的发展现状和相关政策，结合我国的基本国情，提出了我国目前发展 CCUS 技术亟需解决的若干问题，并给出相应建议。

［关 键 词］欧洲；碳减排；CCUS；碳中和；工业集群；运输网络

［引用本文格式］甘满光，张力为，李小春，等. 欧洲 CCUS 技术发展现状及对我国的启示[J]. 热力发电，2023，52(4)：1-13.
GAN Manguang，ZHANG Liwei，LI Xiaochun，et al. Development status of CCUS technology in Europe and the enlightenment to China[J]. Thermal Power Generation，2023，52(4)：1-13.

Development status of CCUS technology in Europe and the enlightenment to China

GAN Manguang[1,2], ZHANG Liwei[1,2], LI Xiaochun[1,2], LI Qi[1,2], LU Shijian[3,4]
(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
4. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In the context of Europe's vision of achieving carbon neutrality by 2050, carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology, as an important means to achieve carbon emission reduction goals, has embraced a major development opportunity. This paper summarizes the development status of CCUS in Europe, including the financial incentive policies, carbon tax and policies, laws and regulations, and technology innovation policy for the development of CCUS technology in Europe, and the challenges in the process of developing CCUS technology in Europe, including the implementation of public funds, the comprehensive development of CCUS policies, and clear definition of responsibilities for CCUS projects. It points out that up to now, the development of CCUS technology in Europe is relatively mature. Relevant laws and regulations, financial incentives, tax support policies, and technology innovation policies have come into effect. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) and

收 稿 日 期：2022-10-11 网络首发日期：2022-12-10
基 金 项 目：国家重点研发计划项目：政府间国际科技创新合作重点专项（2019YFE0100100）
Supported by: National Key Research and Development Program (2019YFE0100100)
第一作者简介：甘满光（1992），男，博士，特别研究助理，主要研究方向为二氧化碳地质利用与封存相关技术，cumtgmg@163.com。
通信作者简介：张力为（1985），男，博士，研究员，主要研究方向为二氧化碳地质利用与封存相关技术研发与推广，lwzhang@whrsm.ac.cn；
陆诗建（1984），男，博士，教授（研究员），主要研究方向为二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）、烟气脱硫脱硝与酸气注入技术研究，lushijian@cumt.edu.cn。

direct air capture with carbon storage (DACCS) are important means to achieve negative emissions in the future. CO_2 industrial clusters and the development of transportation network can greatly reduce the transportation cost of CO_2, create profits at scale, and thus promote the application of CCUS. In 2020, China made the pledge to achieve carbon peaking by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. Combining the development status and relevant policies of European CCUS with basic national conditions of China, it puts forward the urgent need for current development of CCUS technology in China, and the problems that need to be solved.
Key words: Europe; carbon emission reduction; CCUS; carbon neutral; industrial cluster; transport network

现代工业化进程的加速导致CO_2排放量大幅增长，全球气候变暖。因此，采取有力措施控制温室气体排放、减缓温室效应已成为全球关注的热点。碳捕集、利用与封存（carbon capture，utilization and storage，CCUS）技术是全球范围内实现碳减排目标的重要途径。CCUS 技术是指能将 CO_2 从工业、能源生产等排放源或空气中捕集分离，并输送到适宜的场地加以利用或封存，最终实现 CO_2 减排的技术[1]。主要的 CO_2 排放源包括发电厂、钢铁厂、化工厂、水泥厂等，主要的捕集方式包括燃烧前捕集、燃烧后捕集以及富氧燃烧捕集，主要的利用方式包括化学利用、地质利用和生物利用。国际能源署（International Energy Agency，IEA）的调查结果显示：要实现全球温升控制在 2 ℃以内的巴黎协定目标，CCUS 需要贡献累计 14%的 CO_2 减排量；到 2050 年，利用 CCUS 技术捕集的 CO_2 总量预计需达到 56.35 亿 t，其中利用量 3.69 亿 t，封存量 52.66 亿 t。

作为经济发展水平最高的大洲，欧洲一直处于温室气体减排的先锋地位。2019 年 12 月，欧盟委员会发布《欧洲绿色协议》[2-3]，旨在到 2050 年将欧洲建成第一个实现碳中和（人为 CO_2 排放量与人为 CO_2 去除量在一段特定时期内达到平衡[4]）的大陆，CCUS 技术将在欧洲 2050 年实现碳中和的目标中发挥重要作用。Butnar 等人[5]预测的全球升温 1.5 ℃的情景中，欧洲境内 2030 年捕集 CO_2 的中位数为 230 万~430 万 t/a，2050 年将增至 930 万~1 200 万 t/a。《欧洲绿色协议》[2]中明确提到，CCUS 技术是实现欧洲温室气体净零排放气候目标的必要手段之一，是欧洲脱碳进程中不可或缺的组成部分。《欧洲绿色协议》[2]还强调了欧洲要实现 2050 年碳中和的目标，必须在近 10 年加速推进 CCUS 项目的开发和部署以及相关基础设施的建设。

我国于 2020 年提出到 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和的“双碳”战略目标[6]。CCUS 技术是我国 2060 年实现碳中和目标不可或缺的关键技术，其减排贡献预计在 2050 年将达到 6 亿~16 亿 t CO_2[7]。鉴于 CCUS 技术对实现碳减排目标的重要作用，本文深入总结了欧洲 CCUS 的发展现状，介绍了欧洲在发展 CCUS 技术方面的资金激励、税收政策、法律法规和技术创新政策，总结了欧洲在发展 CCUS 技术的过程中面临的机遇和挑战，以期为我国 CCUS 技术发展、实现 CCUS 技术规模化部署提供参考和借鉴。

1 欧洲 CCUS 技术发展现状

欧洲现有的 CCUS 项目主要部署在北海地区，包括挪威 1996 年投运的 Sleipner 项目和 2008 年投运的 Snøhvit 项目，这 2 个项目的 CO_2 封存能力为 170 万 t/a。截至 2021 年 11 月[8-9]，欧洲境内所有运行、在建和计划的 CCUS 项目总共 70 个，预计到 2030 年可实现封存 CO_2 能力 6 000 万 t/a。除了挪威的 Sleipner 和 Snøhvit 项目外，目前欧洲正在运行的 CCUS 项目还有克罗地亚的 CO_2 EOR Project Croatia 项目和爱尔兰的 Hellisheidi 项目。

除了传统的 CCUS 技术外，多种新形式的 CCUS 技术正在开发，比较典型的是生物质能碳捕集与封存（bioenergy with carbon capture and storage，BECCS）和直接空气碳捕集与封存（direct air carbon capture and storage，DACCS）。BECCS 指通过“生物质利用+CCUS”的技术组合，将生物质燃烧或转化过程中产生的 CO_2 进行捕集、利用或封存的过程，可实现从生物质原料产生到利用全过程的负排放。DACCS 指直接从大气中捕集 CO_2 并进行封存的技术。越来越多的国家在长期气候政策中选择 CCUS 技术作为碳减排手段，并通过 BECCS 和 DACCS 来进行碳移除。在国际能源署的可持续发展情景中，2050 年后，BECCS 和 DACCS 将发挥更突出的作用。到 2070 年，欧洲境内电力部门捕集的 CO_2 中将有 2/3 与 BECCS 有关[10]。

截至目前，欧洲境内主要的 BECCS 项目是瑞典 ExergiKVV8 项目。该项目是欧洲最大的生物质热电联用电站，每年可从大气中去除 80 万 t 的 CO_2，目前处于试点阶段。欧洲目前运营着世界上最大的 DACCS 项目 Orca，该项目于 2021 年 9 月在冰岛投

运，捕集后的 CO_2 与水混合，注入地下岩层中。另一个有代表性的 DACCS 项目是苏格兰的 Dreamcatcher 项目，该项目每年预计可捕集 50 万~100 万 t 大气中的 CO_2，目前处于建造阶段。

欧洲 CCUS 项目的规划方式在过去一段时间发生了很大变化[11]。

过去主要是独立的全链条规划方案，即 CO_2 排放源、运输管道和封存点均独立建设（点对点模式），这种模式适合大型封存点与单个大型工业排放源之间距离合理的情况。CCUS 设施仅涉及 1 个碳源、1 个碳汇和 1 条管道，这种分散型的封存模式成本较高，且存在相互依赖的风险。目前，以 CCUS 枢纽和集群为基础的规划方案备受青睐，许多碳排放设施集中在同一区域，因此，可以从多个 CO_2 排放源进行捕集，并利用 CO_2 运输共享基础设施和封存网络来进行 CO_2 封存。典型的 CCUS 枢纽和集群的特点包括[12]：1）多个 CO_2 工业点源连接到 CO_2 运输和封存网络；2）大规模的地质封存资源；3）枢纽和集群通过规模化可大幅降低 CO_2 封存单位成本，形成商业合力，降低投资风险。目前欧洲境内正在运营或开发的 CCUS 集群主要包括荷兰的鹿特丹港和阿姆斯特丹港、比利时的安特卫普港以及英国的亨伯和蒂赛德地区。主要的 CCUS 枢纽和集群项目见表 1[12-15]。

表 1 欧洲境内主要的 CCUS 枢纽和集群项目
Tab.1 Major CCUS hubs and clusters in Europe

项目名称	项目描述
北极光项目（N-LiTES）	挪威北极光项目的建设现场如图 1[16]所示。该项目旨在建设成欧洲 CO_2 捕集点与挪威近海大陆架封存点之间的运输连接枢纽，包括从奥斯陆峡湾地区的工业源捕集 CO_2，将压缩后的液态 CO_2 从捕集场运送至挪威西海岸的陆上码头，然后利用管道将液化的 CO_2 输送到北海近海的封存地点进行封存
CO_2 输运港（CO_2TransPorts）	建立基础设施，使欧洲的鹿特丹港、安特卫普港和北海港口大规模运输 CO_2，这三大 CO_2 输运港将为 CO_2 捕集项目提供运输服务
阿托斯项目（ATHOS）	项目的重点是在阿姆斯特丹工业港口地区提供 CO_2 交通基础设施，为北海的 CCUS 提供服务，以实现 2030 年前每年减排 750 万 t CO_2 的目标
阿拉米斯项目（Aramis）	项目旨在运输工业集群捕集的 CO_2，运输手段包括液化 CO_2 的运输船只、连接工业集群的专用管道、鹿特丹港和海上 CO_2 转运枢纽之间的输送主干管道以及将 CO_2 输送到各个永久封存地点的支线管道，预期运输能力超过 2 000 万 t/a
达塔尼昂项目（Dartagnan）	旨在将敦刻尔克港建立成一个开放的多模式 CO_2 输运中心，将敦刻尔克港及其附近的主要工业排放源与 CO_2 封存地点连接起来，使 CO_2 出口到荷兰和北海地区进行封存
波兰 CO_2 输送项目（Poland CO_2 Transmission）	建立一个格但斯克（Gdańsk）及其腹地开放的多模式 CO_2 输运中心，将格但斯克及其附近的工业 CO_2 排放源连接到北海的 CO_2 封存场地进行封存
黑斯特-不来梅输运管道项目（Hastedt–Bremen）	项目拟建设 CO_2 输运管道连接德国不来梅的一个碳密集型工业中心和威廉姆沙文能源工业园区，提供从 CO_2 供应到液化以及封存的连接管道，每年预计可接收和装载 100 万 t 的 CO_2
Acorn 全尺寸 CCS 项目（Acorn Full-Scale CCS）、欧维亚科克（Ervia Cork）	Acorn 项目旨在圣弗格斯天然气终端进行工业 CO_2 排放源的碳捕集，通过英国北海底下现有的、多余的天然气管道进行运输，连接到格兰杰默斯（Grangemouth）工业集群。爱尔兰的 Ervia Cork 项目将利用金赛尔地区枯竭的海上气田和基础设施来封存附近工业区产生的 CO_2
亨伯零排放网络（Zero Carbon Humber）	英国亨伯工业区周边开发的一个净零 CCS 集群，目标是成为英国第一个净零产业集群。项目计划于 2027 年开始将捕集后的 CO_2 封存至北海油田中，在 2035 年前后将在生物能源发电机组部署 CCS 设施
提赛德净零网络（Net Zero Teesside）	英格兰东北部开发的工业集群，该集群计划每年从气电厂和其他工业源捕集 600 万 t CO_2，并有望在 2030 年前全面投入运营
珀尔托斯网络（Porthos）	2021 年初进入后期开发阶段，贯穿鹿特丹港口地区的总长约 30~33 km 的管道将输送液态 CO_2 到北海底下进行封存。到 2030 年，预计每年能够封存 200 万~500 万 t CO_2

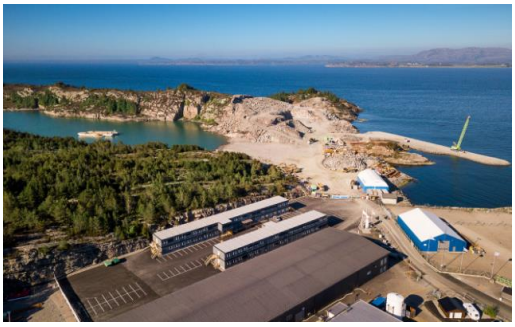

图 1 挪威北极光项目建设现场
Fig.1 Construction site of Norway Northern Lights project

通过共享 CO_2 集群的基础设施，将来自不同排放源的 CO_2 在枢纽统一进行汇集、压缩和运输，可以有效降低压缩和管道运输的成本，从而降低单个 CCUS 站点的封存成本[17]。全球碳捕集与封存研究院（GCCSI）2021 年的年度报告中关于管道成本的估算显示[15]，小流量的 CO_2 会升高 CO_2 的管道输送成本。一旦 CO_2 气相流量超过 25 万 t/a，就可以实现大部分的规模经济。因此，CCUS 工业集群与运输网络可以为 CO_2 地质封存提供经济的、必不可少的基础设施，且可激活较小规模（约 20 万 t/a 或更

小规模）的 CO_2 捕集项目。孙亮[18-19]基于数学规划和优化高级建模系统（GAMS）的 CCUS 源汇匹配动态规划模型研究了 CO_2 捕集与封存累计量的管网建设与成本问题。结果表明，与静态规划相比，动态规划下的运输管网更加成熟，管网的连通性增强，运输能力得到提高。该模型可有效确定 CO_2 捕集与封存位置及相应量值、运输管道拓扑结构及管径。管道单位运输成本跟 CO_2 运输量及 CO_2 管网规模密切相关[20]，CO_2 捕集规模、排放源位置、CO_2 封存场地位置等因素对管道运输成本都有显著影响。根据统计结果，在大规模运输（3 000 万 t/a）条件下，欧洲管网的运输成本约为 1.40 美元/t[21]；在小容量运输（300 万 t/a）条件下，欧洲管网的运输成本约为 11.74 美元/t[22]。我国 CO_2 管道运输的成本和欧洲类似。京津冀地区 CO_2 捕集量在 0~1.8 亿 t/a 变化时，源汇匹配单位总成本约为 181~260 元/t（折合成 25.59~36.76 美元/t）。当 CO_2 捕集量为 4.6 亿 t/a 时，管道的单位 CO_2 运输成本约为 89 元/t（折合成 12.58 美元/t）。当 CO_2 捕集封存量在 2.88 亿~28.86 亿 t/a 变化时，单位 CO_2 运输成本降至 7~12 元/t（折合成 0.99~1.70 美元/t）。综上所述，CO_2 的运输成本与 CO_2 的捕集量密切相关，CO_2 集群与运输网络的形成可以有效激活较小规模的 CO_2 捕集项目，降低 CO_2 封存项目的关停风险，大幅增大 CO_2 的捕集量，从而降低单位 CO_2 的运输费用。

2 欧洲发展 CCUS 技术的相关政策

欧洲在 CCUS 的发展部署和政策制定方面主要有以下特点[23]：1）颁布 CCUS 技术发展路线图，明确不同时期的技术方向和研发重点，加强国家层面的技术政策指导和宏观协调；2）加大政府公共投入，引导私有投资，加快开展全流程 CCUS 项目示范，推动 CCUS 技术商业化；3）建立跨行业、跨领域的 CCUS 合作平台，加强技术成果转化，加强知识与经验共享；4）除了在技术方面开展 CCUS “硬技术”研发和示范以外，同时对技术标准、法律法规、管理制度和规范等进行技术应用的“软环境”建设。

其中，在“软环境”建设方面，欧洲对 CCUS 制定的政策主要是通过资金激励、碳税税收政策、法律法规以及技术创新政策推动 CCUS 技术的发展，以下将进行简要介绍。

2.1 资金激励政策

有学者指出，未来 CCUS 项目的部署将更多地取决于碳市场的开发以及 CCUS 项目融资的复杂性，而不是与地下储存 CO_2 有关的技术问题[24]。IEA[25]指出，目前 CO_2 所需商业激励为 40 美元/t；若加以充分利用，通过现有低成本的 CCUS 项目可捕集、利用和封存多达 4.5 亿 t CO_2，为推广 CCUS 的部署奠定坚实基础。根据《巴黎协定》[26]的预测，为有效减少排放，到 2020 年碳价应定位在 40~80 美元/t，到 2030 年碳价应达到 50~100 美元/t。

欧洲 CCUS 技术的投资环境持续改善。2005 年 1 月，欧盟开始实施温室气体排放许可交易制度（EU-ETS），旨在以经济高效的方式促进温室气体减排。其运行模式是采取总量交易的形式确定纳入排放交易体系的企业免费获得或者通过拍卖有偿获得欧盟排放配额（EUA），而实际排放低于所得配额的企业可以在碳交易市场出售，超过则须购买 EUA，否则遭受惩罚。EU-ETS 不仅进行 EUA 的交易，还与全球的碳减排有着紧密的联系。《京都议定书》对发达国家规定了具有法律约束力的量化减排目标，确立了温室气体减排的灵活机制：联合履约（joint implementation，JI）、清洁发展机制（clean development mechanism，CDM）和排放权交易（emission trading，ET）来协助发达国家履行减排义务，同时鼓励发展中国家采取自愿性减排行动的机制。依照《京都议定书》的设定，CDM 引导发达国家和发展中国家合作开展减排项目，实现的减排量经认证后获得核证减排量（CER），可用于冲抵发达国家合作方的排放；JI 则规范发达国家间减排项目的合作以及减排成果的认定、转让与使用。与 CDM 和 JI 基于项目的机制不同，以 EU-ETS 为代表的碳排放配额交易市场以排放配额（EUA）作为交易标的，由政府部门设定配额总量并向企业分配，企业根据自身实际排放情况选择减排或在市场上购入配额，以实现减排任务。因此，EU-ETS 覆盖下的企业除了通过自主减排或购买配额的方式完成减排任务之外，还可以使用 CDM 产生的“CER”或 JI 产生的“减排单位（VER）”以抵减自身排放。将 CDM 和 JI 市场与 EU-ETS 市场连接，为欧洲以外的地区推进减排提供了现实激励，在全球产生了显著的碳减排效应[27]。因此，EU-ETS 加速了欧洲国家之间以及欧洲国家与欧洲以外地区之间的 CCUS 项目合作与交流，构建了知识共享网络，促

进了 CCUS 技术的发展。

EU-ETS 是欧盟的主要碳减排工具，而欧洲部分国家也建立了自身的碳排放权交易体系。比如，为了补充 EU-ETS 涵盖的行业以外的碳排放，德国于 2021 年全面启动碳排放权交易系统并实施固定价格，2021—2025 年 CO_2 的固定价格为 25、30、35、45、55 欧元/t。从 2026 年开始，CO_2 的价格将固定在 55~65 欧元/t。德国的国家排放交易与欧盟排放交易体系存在差异，欧盟的排放交易体系主要针对工业、发电厂和空中交通出现碳排放的区域；而德国的国家排放交易体系要求燃料供应商以购买证书的形式获得污染权，企业需要为未来的燃料燃烧产生的温室气体排放而付费。若一些企业因其交易领域而被 2 种排放交易体系同时覆盖，有 2 种机制可防止其承担双倍的责任[28]：1）燃料供应商向已加入 EU-ETS 的企业出售燃料时可减少应缴纳的费用，以消除燃料设备产生的 CO_2 成本；2）企业可向德国排放交易管理局申请补偿。此外，英国于 2021 年 5 月正式实施碳交易市场，这标志着英国彻底离开欧盟碳排放交易市场。与欧盟碳排放交易市场不同，英国启动了碳交易底价保证机制，设定 CO_2 不低于 22 英镑/t 的底价，并承诺将逐步提高碳成本，到 2030 年将增至 70 英镑/t。期间如果 CO_2 价格上涨过快，政府可以通过成本控制机制进一步释放碳排放配额，以确保碳市场平稳运行。不过，由于体量较小、流动性弱以及运营经验不足，英国碳交易市场易引发价格波动性风险，给企业等市场参与者带来经济压力，从而降低市场竞争力[29]。

第一个为欧盟 CCUS 项目提供财政资助的专门政策机制是 2009 年 8 月推出的欧洲经济复苏计划（European Economic Recovery Plan，EERP）[30]。EERP 的主要目标是经济复苏、能源安全和温室气体减排，已为 CCUS 项目拨款 10 多亿美元，旨在降低 CCUS 技术的运营成本，加快监管和许可 CCUS 项目计划的制定和实施[31]。此外，在调整 EU-ETS 的过程中，欧洲委员会设立了欧洲最大的 CCS 基金——创新基金（The Innovation Fund）。该基金为整个欧盟 CCS 项目的规划、建设和运行提供了主要资金来源。根据碳价差异，创新基金将在 10 年内为 CCUS 以及可再生能源、能源密集型产业和储能等领域的突破性技术提供超过 250 亿欧元的资金支持。英国计划在 2030 年底前将温室气体排放量减少 68%。为了实现这一目标，英国政府宣布了一项 10 亿英镑的 CCUS 基础设施基金，旨在 2030 年前建立 4 个 CCUS 工业集群，CO_2 捕集能力达 1 000 万 t/a。其他的激励方式还包括直接资本赠款、税收抵免、碳定价机制、运营补贴（例如电价补贴）、从配备 CCUS 的工厂公共采购低碳产品、风险缓解措施（贷款担保、风险分担机制、CO_2 责任所有权）以及为 CCUS 技术研发提供资金等[32]。

欧盟委员会预计 2022 年欧元区平均通胀率将高达 7.6%，通胀集中表现为能源推动型物价上涨，这主要是由于传统能源的供给不足以及新型能源对传统能源的替代不充分所致[33]。因此，欧盟将加速绿色能源的转型，并计划到 2030 年将欧盟的可再生能源在最终能源消耗总量中的份额提高到 45%[34]。与美国 45Q 条款最终法规所规定的税收抵免不同，欧洲主要通过碳交易系统对 CO_2 的碳价进行调节，较高的碳价让一些工业排放主体考虑将 CCUS 应用作为减碳计划的选项。

此外，开展 CCUS 技术实际减排量的量化、核算与验证，建立 CCUS 全流程碳核查方法体系，是检验减排效果、开展碳市场交易、兑现政府激励及惩戒违规排放的基础[35]。在 CCU 的减排核算方法方面，Lee 等人[36]通过开发新的 CO_2 减排计算方法预测了安装在运行的 500 MW 燃煤电厂的 2 MW CCU 装置（CO_2 的 CCU 能力为 40 t/d）的 CO_2 减排效果，结果表明，在监测期间的 22 h 内 CO_2 减少了 16.54 t。假设该设备每天运行 24 h，连续运行 300 天，每年可减少 CO_2 排放 5 413 t。

2.2 税收政策

碳税作为解决 CO_2 大量排放的有效手段，在欧洲许多国家取得了卓有成效的减排成果。芬兰、瑞典、挪威、丹麦和荷兰是世界上最早推出碳税的国家，而且将碳税作为单独的税种进行征收。意大利、德国和英国则是将碳排放因素引入已有的税种，形成潜在的碳税[37]。比较典型的利用碳税解决 CO_2 排放的国家是挪威。挪威自 1990 年落实碳税政策，于 1991 年开始征收碳排放税，是世界上最早征收碳税的国家之一。1991 年，挪威对离岸采油作业征收 CO_2 税。在该税收政策刺激下，挪威国家石油公司在 Sleipner 油田的深部地层中封存 CO_2，成功打造世界首个利用深部咸水层作为 CO_2 地质封存场地的 CCS 商业案例。根据挪威《石油活动 CO_2 税法》，对燃烧的天然气、石油和柴油排放的 CO_2 征收碳排放税。2022 年，税率为每立方米（标准状态）天然

气或每升石油或凝析油 0.16 欧元。对于天然气的燃烧，相当于每吨 CO_2 68.48 欧元[38]。此外，英国的气候变化税政策规定，实施 CCS 项目的企业可获得 80%的税收抵免[39]。

2021 年 7 月，欧盟提出了“Fit to 55”（承诺在 2030 年底温室气体排放量较 1990 年至少减少 55%）的立法提案[40]，概述了 CCUS 相关的一揽子计划，核心是对 EU-ETS 的修改。该措施将会增加相关碳减排的补贴，以实现欧盟 2030 年的碳减排目标；此外，提案将添加一个新的碳边界调整机制，将碳税施加到进口的目标产品，如钢铁和水泥等，以避免“碳逃逸”。

2.3 法律法规政策

法律法规政策对 CCUS 技术的推广至关重要，没有强有力的、持续的政府政策和法律法规支持，CCUS 很难得到充足的投资。对 CO_2 运输影响较大的法规是 1996 年颁布的《伦敦议定书》[41]，这是一项管理在海洋环境中倾倒废物的国际海洋协议修正案。该议定书最初禁止缔约方跨境运输用于地质封存的 CO_2。但是，缔约方于 2009 年通过了一份修订案以解决这一问题，允许对封存在海床以下岩层的 CO_2 暂时实施《伦敦议定书》修订案[41-42]。若缔约方接受修订案，则可对用于 CCUS 的 CO_2 进行跨境运输，以有效缓解 CO_2 排放。如果一个国家封存潜力有限，那么邻近国家可以代为封存该国的 CO_2。该修订案的制定为 CO_2 跨境运输网络的形成奠定了基础。

欧洲是 CCUS 制度化和规范化的积极倡导者。欧盟于 2009 年制定了世界上第一部关于 CCS 的详细立法《CCS 指令（Directive/2009/31）》（以下简称“《CCS 指令》”），该指令为 CCUS 链条中的 CO_2 地质储存部分提供了一个立法框架，通过适当的项目设计来指导欧盟成员国的 CCS 项目，以确保 CO_2 永久和安全封存，从而为 CO_2 地质封存建立一个监管制度[41,43-44]。《CCS 指令》是在全球范围内建立 CCUS 技术法律和监管制度的重要第一步，解决了管理复杂 CCUS 链条的主要困难，特别是与 CO_2 地质封存相关的地质风险和长期责任的问题。《CCS 指令》对 CCS 项目的可用存储容量和技术经济可行性进行评估，促进了研究项目、示范项目和针对 CCS 部署的跨界合作项目的发展[44]。2014 年 5 月，欧盟委员会启动了《CCS 指令》的审查程序，对其有效性、相关性和效率进行了评估，由于缺少实际的经验以及《CCS 指令》的可操作性，提出了不对其进行重大修订的建议。虽然《CCS 指令》为 CCS 项目建立了一个框架，但并没有解决 CO_2 跨界运输问题。CO_2 的跨界运输引发了跨国或跨区域 CCS 项目所没有面临过的国际法律问题，这将要求欧盟会员国就 CO_2 运输达成一个法定框架，解决国际、国家和地方各级的法律问题。因此，关于跨欧洲能源基础设施指导方针的法规《跨欧洲能源基础设施条例》（简称“TEN-E 条例”）应运而生。该条例提供了促进战略能源基础设施互联互通和发展的机制，为欧洲的基础设施现代化设定了框架。考虑到 CO_2 捕集和封存的跨境部署，CCS 作为 TEN-E 条例优先发展的主题领域，需要在成员国之间以及与邻国第三国之间发展 CO_2 运输基础设施，从而形成交通运输网络[45]。英国政府于 2008 年通过《气候变化法案》并公布了具体的气候治理路线图，提出设立公民个人信用碳排放账户，为约束碳排放提供了强有力的法律保障。该法案于 2019 年完成修订，补充完善了实现净零碳排放目标的相关政策，使英国成为国际上第一个以立法形式设立碳排放治理中长期目标的国家。

此外，2021 年，欧洲国家实施的可再生能源指令鼓励 CCU 生产燃料，并将 CCU 生成的合成燃料纳入可再生能源的目标。欧盟委员会还提出了“空中加油倡议（ReFuel EU Aviation Initiative）”，要求燃料供应商将越来越多的可持续航空燃料混合到欧盟机场携带的航空燃料中，包括合成低碳燃料，即电子燃料（e-fuel，可由 CCU 合成），这将极大促进 CCU 的发展。新出台的《欧洲绿色新政》和《气候法》把气候中立（人类活动对气候系统没有净影响的状态，须考虑区域或局部的地球物理效应[4]）的政治承诺转变为法律义务，因此也催生了相关支持 CCUS 的政策。

2.4 技术创新政策

CCUS 技术不是一成不变的，随着世界各国在减排和去除 CO_2 的目标越来越高，降低 CCUS 价值链各个环节的成本成为了人们关注的焦点，这也推动了全球范围内对更先进、成本更低的 CCUS 技术的研究和开发。技术发展是推动未来 CCUS 成本降低的关键因素，技术的突破可以使 CCUS 技术在现有技术的基础上实现跨越式改进，典型的例子包括 DACCS 和 BECCS。此外，通过材料创新、工艺创新和设备创新，如开发先进的化学溶剂、高 CO_2 渗

透膜和吸附剂技术等，可有效提高 CO_2 捕集性能。

欧洲地平线计划（Horizon Europe）[46]是欧盟推出的提升欧洲研究和创新水平的资助项目，旨在解决气候变化问题，实现可持续发展目标。该计划在 2021 年和 2022 年分别提供 3 200 万欧元和 5 800 万欧元资金资助 CCUS 技术研发，将支持与 CCUS 相关的研究、试点和小规模示范项目，重点在于展示成熟的 CO_2 捕集技术在工业设施中的集成链，包括后续的运输、利用和地下封存，重点的资助方向包括技术（优化捕集装置与工业过程的集成、灵活性与可伸缩，提高 CO_2 纯度）、安全性（运输和封存期间）、财务（CO_2 捕集和整合的成本）和战略性质（商业模式、产业集群和运输网络的构建）。该计划将促进各领域合作，加强创新在制定、支持和实施欧盟政策方面的影响，并鼓励入选的项目加入欧盟 CCUS 知识分享网络。

通过分析欧洲发展 CCUS 技术的相关政策，发现《CCS 指令》采取了一种相对平衡的方式，允许在商定的期限之后转移责任。然而，欧盟《CCS 指令》中关于责任的特殊情况可能使项目开发者面临高度的不确定性，导致 CCUS 项目开发存在重大障碍。《CCS 指令》对 CCS 发展提出了明确的实质性和程序性要求，CCS 项目生命周期内，项目运营商应对所有环境责任负责且责任转移存在严格的标准，这给封存站点运营商带来了巨大的负债和成本。监管机构的风险管理权力与运营商承担的责任之间存在明显的不匹配，这可能极大地抑制潜在项目开发商的积极性。欧盟排放交易制度通过市场稳定储备强化碳定价信号。为避免通过实施补充性监管措施削弱碳定价信号，欧盟排放交易制度下的限额和配额分配应充分考虑 CCUS 所带来的减排效果。此外，支持 CCUS 项目发展的公共资金作用有限，创新基金下的项目获得可用资金少。由于碳价格的不确定性，现有政策工具（特别是欧盟排放交易体系）对私人投资的吸引力不高，因此需要补充相关金融政策工具来诱导低碳投资[47]。

3 欧洲发展 CCUS 技术的机遇与挑战

3.1 欧洲发展 CCUS 技术的机遇

2018 年 11 月，欧洲委员会发布了 2050 年实现碳中和的愿景，指出欧洲的碳中和需要依靠 CCUS 实现工业脱碳，通过 BECCS 和 DACCS 实现负排放。2050 年实现碳中和愿景的提出，使 CCUS 技术在欧洲的发展迎来了重要机遇。

欧盟对 CCS 和 CCUS 项目的资金支持力度较大，主要通过地平线项目和创新基金进行资金扶持[48]。前者的扶持重心是研究和创新领域，预计 2023—2024 年的工作计划将着重扶持 CO_2 运输和封存基础设施项目。后者则主要扶持能为市场带来突破性技术的项目，比如能源密集型行业的 CCUS 项目。2020 年 7 月，欧盟投入 100 亿欧元的创新基金开始接收项目申请。这是全球规模最大的低碳技术推广项目。该基金已成为整个欧盟 CCUS 项目规划、建设和运行的主要资金来源。

欧洲金融政策将吸引公共和私人资本更多转向 CCUS 的投资。EU-ETS 已经通过修订案，将 CO_2 捕集、管线运输和 CO_2 地质封存涵盖在其活动范围内。EU-ETS 通常被视为引导私营部门投资 CCUS 技术的关键驱动力，该体系于 2018 年加强了市场稳定储备这一减少排放配额盈余的机制，从而加快了碳减排的步伐。此外，欧洲还设立了支持 CCUS 的公共资助项目，关键举措包括欧洲能源回收计划（European Energy Program for Recovery，EEPR）和新准入者储备（New Entrant Reserve，NER）[49]，这进一步加速了欧洲 CCUS 技术的发展。

目前，欧洲 CCUS 基础设施的发展有足够的潜力推动 CCUS 技术大规模应用。大型排放源集群是创造规模经济的绝佳选择，通过建立共享的 CO_2 运输基础设施，让第三方接入，让多个用户有效使用 CCUS 基础设施，可有效盘活大量的小型碳排放源捕集项目。此外，欧洲拥有巨大的 CO_2 地质封存储量和海底碳封存专业技术，挪威和英国等国家愿意与欧盟分享海上 CO_2 封存设施，从而有效推动临海欧盟各国开展 CCUS 项目。CO_2 工业集群和跨境运输网络让缺乏良好 CO_2 封存资源的国家也能开展 CCUS 项目。例如，法国敦刻尔克、比利时根特和瑞典哥德堡等工业地区正计划通过挪威的北极光项目汇集工业 CO_2 进行液化并运往北海封存。

3.2 欧洲发展 CCUS 技术的挑战

欧洲 CCUS 项目的实施一直充满挑战，许多项目因经济和财务限制、公众接受度低和缺乏激励措施而放缓或取消。CCUS 技术发展的主要障碍是部署成本高，其显著增加了燃煤和燃气发电以及工业生产过程的设备、运行和维护成本。因此，CCUS 技术在规模化应用中面临高昂成本的限制，如何降低成本并推广 CCUS 技术，是目前欧盟面临的重要挑

战[50]。此外，欧洲承诺投入 CCUS 的公共资金是否最终落地、碳定价是否会保持稳定并逐步升高等也将成为不确定的因素。在引导私人资金方面，相关的金融政策稳定、透明、明确，并与 CCUS 投资的目标相关联，让投资者能够在商业条件下量化 CCUS 投资政策创造的机会与风险也是欧洲发展 CCUS 技术面临的挑战[51]。从欧盟 2021 年提交的共同利益项目（连接欧盟国家能源系统的跨境基础设施项目）清单来看[48]，欧洲当下具备进入市场条件的 CCUS 项目数量持续增加，未来 10 年这些项目有望启动运营。目前迫切需要协调各国的融资机制以及出台支持 CCUS 技术的政策和金融措施，以确保这些项目 2030 年前开始运作。

除了上述挑战外，低碳政策机制的发展乏善可陈，缺乏法律和监管制度激励 CCUS 投资，也是欧洲 CCUS 面临的挑战。各国不断强调提升政策支持的必要性，但是重点更应放在制定促进性法律和监管框架上。目前，应对气候变化的现有政策总体上仍显不足，在 CCUS 方面的法律和监管普遍乏力，很少有国家或地区制定专门针对 CCUS 的法律或适用于整个 CCUS 项目生命周期的法律。CCUS 运营所适用法规和监管制度的确定性和实用性非常重要，即使是在已经制定专门的 CCUS 框架的区域，如果法律体系互不关联的问题没有得以解决，也将严重阻碍 CCUS 的部署。此外，《CCS 指令》对于在 CCUS 项目中发生地质风险事件（地表变形、微震、CO_2 泄漏等）的情况下，运营商和国家主管当局之间的责任分配存在监管上的不确定性，也会阻碍 CCUS 项目的进一步推广。通过分析《CCS 指令》发现，CCUS 发展面临的主要障碍是关于泄漏风险的责任规定、补救问题的不确定性以及从封存场地运营方到政府主管部门的责任转移。封存场地运营方长期负担风险责任的现状造成了风险分担的不平衡，即项目方在估计潜在泄漏造成财务损失方面存在高度不确定性。因此，不明确的责任规定成为 CCUS 投资和部署的一个重大障碍[44]。法律责任制度应明确 CCUS 运营商和政府主管部门之间的责任分工，并应明确规定责任的性质、范围和期限，以在法律确定性、安全性和投资收益之间取得平衡。

此外，当前紧张的政治局势加剧了欧洲发展 CCUS 技术的不确定性，俄乌冲突使欧洲国家能源供应出现重大问题。俄罗斯大幅削减对欧盟国家的能源出口，给欧盟带来了重大影响。在能源供应不足的压力下，德国、法国等欧洲国家纷纷宣布重启燃煤发电或推迟退煤进程，这将加剧大气中 CO_2 的排放，对欧洲的碳中和目标造成严峻挑战。因此，欧盟委员会通过制定 REPowerEU 计划来应对俄乌冲突引发的能源危机，其目标是结束欧盟对俄罗斯能源的依赖，加快向绿色能源转型，同时应对气候变化。

4 欧洲发展 CCUS 技术对我国的启示

CCUS 技术作为实现“双碳”目标的重要技术手段，目前备受我国重视。2016 年，原环保部发布《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》，规范和指导 CCUS 项目的环境风险评估工作；中国“十四五”规划首次提出将建设大规模 CCUS 示范项目；2021 年 5 月，生态环境部会同多个部委，宣布支持自由贸易区 CCUS 试点和示范项目。然而，我国发展 CCUS 技术仍面临诸多挑战，主要包括相关的法律法规和激励政策不完善，以及 CCUS 工业集群与运输网络建设的滞后性。

CCUS 技术具有鲜明的区域特征，由于发展起点、资源分布、经济社会发展水平不同，CCUS 的发展路径和方式有所不同。对于我国而言，要实现 CCUS 技术快速发展，既要借鉴欧洲国家的技术和政策经验，同时要平衡我国发展过程中的政治、经济、社会、环境之间的关系。CCUS 项目周期内，一个完整的政策框架应该是可持续的，需要根据发展的阶段、具体行业和地区，采取因地制宜的政策措施。例如，虽然碳排放税在挪威是一种完善的政策机制，对成熟的 CCUS 技术有很大的激励作用，但对正处于发展阶段的我国而言，其效果值得商榷。结合我国的实际情况，欧洲发展 CCUS 技术的相关经验对我国的启示主要有：

1）*加快相关立法，完善 CCUS 技术的法律法规政策体系*　政府是 CCUS 项目的主要监管主体。我国想要实现快速部署 CCUS 项目，就必须消除技术壁垒，制定支持性的法律和监管模式[52]。目前，我国还未出台专门针对 CCUS 技术的法律法规，对 CCUS 技术的运输、封存以及泄漏风险对环境的影响一般参照现有的相关法律。比较典型的有[53]：CO_2 的运输参照《危险化学品安全管理法规》进行监管，CO_2 封存参照《放射性污染防治法》进行监管与审批，CO_2 封存对环境的影响按照《环境影响评价法》进行监管。在 CCUS 技术的发展过程中，国家应该

出台针对性的法律法规，为规范和促进 CCUS 技术的发展提供必要的支撑，同时进行有效的监管。CCUS 涉及捕集、运输、利用和封存阶段等多个环节，目前在基础方法、技术推广、项目建设与管理、监测、风险管理等多个环节尚无相关标准可以遵循，严重影响了 CCUS 技术的推广应用。

作为《伦敦议定书》的签署国之一，我国向海底注入 CO_2 的行为将受到相关国际法规的约束，这意味着未来的国内法规需要考虑《伦敦议定书》的约束，以避免与国际法发生冲突，任何可能的跨界 CCUS 双边协议也应参照《伦敦议定书》的规定和要求[47]。目前，我国海底 CO_2 封存等问题牵涉较多主管部门，应考虑到国内各方的协调难度，相关政策的制定需要整合所有与之相关的部门以及市场、社会、公众等主体，顶层设计的落地必须依靠自上而下配套政策体系和监管机制的支持。因此，各部门之间的协调以及公众参与也是促进 CCUS 项目顺利实施的关键。此外，我国在 CCUS 示范项目的选址、建设与运营，封存场地的关闭，关闭后的环境风险评估、预警和监测等方面均缺乏完整的法律法规约束，对 CCUS 各个过程的环境影响缺少必要的监管[54]。

与欧洲相似，我国 CCUS 发展的瓶颈不仅在于技术研发的滞后，更在于政策支持保障力度不足、市场公平竞争环境缺失和监督监管机制有限。我国发展 CCUS 的政策法规需求包括以下内容[55]：形成 CCUS 相关的国家标准体系、碳排放权交易制度、完善相关碳减排投资和金融政策、规范大型 CCUS 项目商业模式等。我国 CCUS 的发展仍处于研究和项目示范的早期阶段，主要依靠气候政策和碳中和目标的推动，尚未纳入国家法律框架。我国还未建立 CCUS 的具体监管框架，在项目审批和责任条款方面需要监管透明度，设计合理的成本、效益、责任分担机制，将 CCUS 全产业链涉及的社会责任、经济效益、社会效益在相关企业之间进行合理的分担和分配，以支持 CCUS 的发展[47]。此外，我国需要在示范项目开发与标准化工作方面加大投入，系统部署并加快推进 CCUS 标准化工作，尽快与国际标准制定工作接轨[56]。

在责任规定方面，从欧盟 CCS 指令中吸取的教训表明，考虑到 CCUS 在我国各地区的发展仍处于初级阶段，我国应采用相对温和的责任制度，包括适度的损害补救和合理的责任转移。借鉴欧洲颁布的关于 CCUS 的法律法规，我国需制定 CCUS 相关法律，明确行业指导、技术支持、价格控制、成本分摊、融资方案、监管措施和法律责任，对所有参与者（排放源工厂、交通运输部门、政府机构、第三方等）具有较强的可操作性。法规应鼓励第三方访问 CCUS 基础设施，优先考虑开放技术或开放获取 CCUS 项目，以实现知识共享收益的最大化。各省、市、自治区应按照国家要求，根据本地区的实际情况制定地方性法规，完善地方监督管理制度，确保中央政策框架在地方生效[47]。

2）*完善财政与金融体系，构建良好的* CCUS *融资环境*　主要的财政与金融体系包括：碳排放交易体系与碳价的机制[57]、税收以及资金激励政策。我国应该建立多元化的融资体系，包括相关激励和税收政策，如可以考虑对采用 CCUS-EOR 技术进行采油的企业根据采出油量进行资源税的部分减免；对于相关燃煤和燃气电厂，可以考虑对捕集 CO_2 并封存的电厂进行税收减免，以刺激 CCUS 技术的大规模推广。CCUS 技术对工业行业深度脱碳具有重要意义，但关键技术的创新与发展仍然面临着成本高昂、投资不足等问题。近年来，欧洲相继出台扶持 CCUS 技术发展的政策，加大 CCUS 变革性新技术的研发力度。从国内来看，与新能源等相关碳减排产业相比，CCUS 政策扶持力度亟需加强[58]。我国在碳排放交易市场成熟度和碳税价格等方面和欧洲存在一定的差距：2021 年，我国全国碳市场的配额价格在 40~60 元/t 波动，而欧盟碳市场在 2021 年底的配额收盘价已涨至 73.28 欧元/t。在缺乏激励机制的条件下，我国广大企业（尤其是私营企业）对碳减排的积极性总体有限。德国 TÜV Rheinland 于 2022 年 2 月发布的《探讨中国企业碳中和路径调研报告》显示[59]，尽管有 73%的受访企业表示 2060 年碳中和目标的提出对其企业的业务产生了影响，但仅有 12%的受访企业已经制定了具体的减排脱碳目标和时间表，仍有 30%的受访企业不了解或没有任何相关计划。我国应通过建立财政激励机制，吸引社会资本，缓解投资 CCUS 的不确定性，将 CCUS 与碳市场挂钩，推动 CCUS 融资趋向多样化和灵活化[7]。

在资金激励方面，直接的经济支持如各级政府的 CCUS 专项资金是 CCUS 部署最有效的驱动因素。可对捕集电厂产生的电力提供更有针对性的补贴，以抵消高昂的捕集成本。推广信贷、债券、基

金等多种绿色金融产品，为基础设施建设提供充足的金融保障。同时，建议间接支持 CCUS 项目，例如在基准电价下分配发电配额较高的 CCUS 电厂，或在排放交易系统中分配更高的碳配额，以鼓励早期 CCUS 示范项目[47]。借鉴欧洲先进的碳排放交易体系，我国应完善碳交易市场制度，对碳排放指标科学统一定价，稳定碳市场交易秩序，引导各金融机构充分发挥和利用碳交易的融资作用发展 CCUS 技术，逐步将碳交易市场推向国际社会，与国际碳交易市场接轨[60]。

此外，可以考虑充分利用国家核证自愿减排量（CCER）机制。CCER 指排放企业需要按照减去自愿减排量的排放量来进行生产经营活动，如果排放超额，就要受到处罚；如果不愿受到处罚，则可以向拥有多余配额的企业购买排放权。在这一机制下，可以促进企业通过技术升级来减少碳排放量，从而达到节能减排的效果，同时也可提高生产经营效率。国内 CCER 项目开发的 16 个专业领域包括了碳捕集与封存，国内碳排放权交易允许 CCER 作为抵消限制进入，且使用比例为 5%~10%，作为抵消机制的 CCER 进入碳排放权交易市场将会扩大市场参与并降低碳减排成本[61]。

3）加快 CCUS 工业集群以及 CO_2 运输网络的构建，降低 CO_2 运输费用，激励小规模的 CO_2 捕集项目　我国应在碳运输和储存基础设施项目的早期规划与协调方面发挥主导作用，在源汇匹配条件较好的区域建立以碳运输和存储基础设施共享为特色的 CCUS 产业集群，通过对管网和封存基础设施的共享使用，降低 CO_2 运输成本，形成规模效应，提高 CCUS 技术的经济适用性[16]。根据我国的 CO_2 源汇匹配分析结果，建议在鄂尔多斯盆地、准噶尔-吐哈盆地、四川盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、珠江口盆地等具有较好 CCUS 工业集群建设条件的区域，积极探索建设以 CCUS 技术为基础的“分散式 CO_2 捕集-共享式 CO_2 封存净零示范区”，形成泛盆地的 CO_2 运输网络，推动 CCUS 产业化、规模化发展[58,62]。借鉴欧洲的 CO_2 运输网络经验，我国可以在上述具有较好工业集群建设条件的区域开发 CCUS 项目，从而形成一个泛盆地的 CO_2 运输网络，实现 CO_2 的跨区域运输与封存。此外，可以借鉴欧洲的经验，制定一个关于 CO_2 运输网络的法律法规，明确跨省市的 CO_2 管道运输条例，促进 CCUS 基础设施互联互通机制，建立 CCUS 运输网络框架。CCUS 项目不能作为单一的工程项目来看待，项目涉及 CO_2 捕集、管网运输以及最终的利用和地下封存。因此，需要政府和社会共同推进，加强相关基础设施建设。

4）在技术创新方面，大力投资 CCUS 技术研发与创新，以降低 CCUS 成本　成本的降低是实现 CCUS 大规模商业化发展的关键因素，欧洲部分国家设有专门的 CCUS 研发计划并进行了持续的研发投入以降低成本。我国可围绕 CCUS 各个环节开展核心技术攻关，如研发低成本和低能耗的先进碳捕集和 CO_2 高价值转化利用技术、开发降低 CO_2 泄漏风险的封存技术，并在加大政府投资支持力度的同时撬动企业的研发投入[63]。借鉴欧洲在技术创新方面的经验，我国应设立专门的 CCUS 研发资金，为 CCUS 的全流程技术创新投入可持续的研发成本，降低 CCUS 的运营成本，加快 CCUS 项目的大规模部署。

总之，与欧洲 CCUS 相关国家的政策体系相比，我国的 CCUS 技术发展存在以下挑战：缺乏可执行的法律框架、项目运作资料不足、疲软的市场刺激措施和财政补贴不足[64-65]。为此，需要对 CCUS 技术立法，完善 CCUS 政策体系，简化相关政策制度，提高政策的实用性，激发市场活力，并提供足够的资金支持。此外，应加强国际合作，深化与欧洲主要国家和地区开展合作机制，充分借鉴国外先进大规模全流程 CCUS 项目示范经验，如加强产学研深度融合，以及建立 CCUS 枢纽中心和合作共享机制，打造大规模 CCUS 产业集群等，从而加快我国 CCUS 发展进度。

5 结　语

近年来，CCUS 技术的发展为世界各国碳中和目标的实现提供了强有力的工具。欧洲 CCUS 技术的发展水平处于前沿，本文首先介绍了欧洲 CCUS 的发展现状，并从资金激励、税收政策、法律法规政策和技术创新政策 4 个角度对欧洲 CCUS 技术的软激励手段进行了探讨，最后总结了欧洲发展 CCUS 技术的机遇与挑战，并分析了我国发展 CCUS 技术可从欧洲得到的启示。相较于欧洲发达国家，我国 CCUS 技术的成熟度和配套政策还存在一定的进步空间，因此，强化国际合作，借鉴欧洲成熟的技术经验，有利于加速我国 CCUS 技术的发展。在 CCUS 技术等前沿技术领域，我国和欧洲相

关国家可建立专门工作组，定期开展合作交流、分享 CCUS 技术的实践经验，重点攻关关键核心技术项目，推动 CCUS 技术在我国的高质量快速发展。

［参 考 文 献］

［1］ 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, 2022: 1.
HUANG Jing. National assessment report on development of carbon capture utilization and storage technology in China[M]. Beijing: Science Press, 2022: 1.

［2］ Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal[R]. Brussels: European Commission, 2019: 1.

［3］ 江思羽. 碳中和目标下的欧盟能源气候政策与中欧合作[J]. 国际经济评论, 2022(1): 134-154.
JIANG Siyu. EU’s Energy-Climate policy under the carbon neutrality target and China-EU cooperation[J]. International Economic Review, 2022(1): 134-154.

［4］ ROGELJ J, SHINDELL D, JIANG K, et al. Global warming of 1.5 ℃. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 ℃ above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R]. Cambridge, UK and New York, USA, 2018: 1.

［5］ BUTNAR I, CRONIN J, PYE S. Review of carbon capture utilisation and carbon capture and storage in future EU decarbonisation scenarios. Final Rep[R]. London: UCL Energy Institute, 2020: 57.

［6］ 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 13-26.
WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, et al. Roadmap for achieving China’s carbon peak and carbon neutrality pathway[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 13-26.

［7］ ZHANG J T, WANG Z Y, KANG J N, et al. Several key issues for CCUS development in China targeting carbon neutrality[J]. Carbon Neutrality, 2022, 1(1): 1-20.

［8］ The International Association of Oil & Gas Producers: CCUS projects in Europe[EB/OL]. (2021-11-01) [2022-10-11]. https://iogpeurope.org/wp-content/uploads/2020/06/ Map-of-EU-CCS-Projects.pdf.

［9］ 贾凌霄, 王欢. 欧洲与北美 55 个碳减排关键技术:碳捕获/利用和存储技术(CCUS)项目简介与启示[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 974-978.
JIA Lingxiao, WANG Huan. Introduction and implication of 55 European and North American carbon emission reduction key technology: carbon capture/utilization and storage (CCUS) projects[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 974-978.

［10］能源情报研究. 欧洲能源转型: 2050 年碳中和路径探析(3)[EB/OL]. (2020-11-07) [2022-10-11]. https://www.huanbao-world.com/green/clean/172192_3.html.
Energy Information Research. Europe’s Energy transition: a path to carbon neutrality 2050 (3) [EB/OL]. (2020-11-07) [2022-10-11]. https://www.huanbao-world.com/green/clean/172192_3.html.

［11］李琦, 刘桂臻, 李小春, 等. 多维度视角下 CO_2 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.
LI Qi, LIU Guizhen, LI Xiaochun, et al. Intergenerational evolution and presupposition of CCUS technology from a multidimensional perspective[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 157-166.

［12］GCCSI. Global status of CCS 2019[R]. Sydney: Global CCS Institute, 2019: 1.

［13］Energy Industry Review. Candidate PCI projects in cross-border carbon dioxide (CO_2) transport networks[EB/OL]. (2021-11-22) [2022-10-11]. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/detailed_information_regarding_the_candidate_projects_in_CO_2_network.pdf.

［14］GCCSI. Global status of CCS 2020[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2020: 1.

［15］GCCSI. Global status of CCS 2021[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2021: 1.

［16］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. 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, 2021: 1.
Chinese Academy of Environment Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Center for China’s Agenda21. China status of CO_2 capture, utilization and storage (CCUS) 2021—China’s CCUS pathways[R]. Beijing: Ministry of Ecological Environment, 2021: 1.

［17］CHEN W H, LU X, LEI Y L, et al. A comparison of incentive policies for the optimal layout of CCUS clusters in China’s coal-fired power plants toward carbon neutrality[J]. Engineering, 2021, 12(7): 1692-1695.

［18］孙亮, 陈文颖. 基于 GAMS 的 CCUS 源汇匹配动态规划模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(4): 421-426.
SUN Liang, CHEN Wenying. CCUS source-sink matching dynamic programming model based on GAMS[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(4): 421-426.

［19］孙亮, 陈文颖. 基于 GAMS 的 CCS 源汇匹配管网优化模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1): 111-116.
SUN Liang, CHEN Wenying. CCS source-sink matching network optimization model based on GAMS[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(1): 111-116.

［20］孙亮, 陈文颖. 中国大陆 CCUS 源汇静态匹配管网布局[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(6): 678-683.
SUN Liang, CHEN Wenying. Pipelinee networks for CCUS by static programming in the Chinese Mainland[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(6): 678-683.

［21］IPCC Fifth Assessment Report—Synthesis Report[R]. New York: IPCC, 2014: 1.

［22］MOE A M, DUGSTAD A, BENRATH D, et al. A trans-European CO_2 transportation infrastructure for CCUS: opportunities & challenges[R]. Brussels: Advisory Council of the European Zero Emission Technology and Innovation Platform (ETIP ZEP), 2020: 1.

［23］彭斯震. 国内外碳捕集、利用与封存(CCUS)项目开展及相关政策发展[J]. 低碳世界, 2013(1): 18-21.
PENG Sizhen. Domestic and foreign carbon capture, utilization and storage (CCUS) projects and related policy development[J]. Low Carbon World, 2013(1): 18-21.

[24] FRANKLIN M O. Carbon capture, utilization, and storage: an update[J]. SPE Journal, 2018, 23(6): 2444-2455.
[25] NUSSBAUMER P, SCHRECK B, BAZILIAN M, et al. Carbon capture and storage in industrial applications. technology roadmap[R]. OECD/International Energy Agency and United Nations Industrial Development Organization, 2011: 1.
[26] STIGLITZ E, NICHOLAS S, DUAN M, et al. Report of the high-level commission on carbon prices[R]. Washington, USA: The World Bank Group, 2017: 1.
[27] 碳交易网. 欧盟碳交易机制（EU-ETS）简介[EB/OL]. (2019-09-08)[2022-10-11]. http://www.tanpaifang.com/tanguwen/2019/0908/65569.html.
Carbon Trading Network. Introduction to the European union carbon trading scheme (EU-ETS) [EB/OL]. (2019-09-08) [2022-10-11]. http://www.tanpaifang.com/tanguwen/2019/0908/65569.html.
[28] 碳道. 碳中和-了解德国的国家排放交易体系[EB/OL] (2021-08-17) [2022-10-11]. http://www.ideacarbon.org/news_free/55805/?pc=pc.
Carbon channel. Carbon neutrality: learn about Germany's national emissions trading system[EB/OL]. (2021-08-17)[2022-10-11]. http://www.ideacarbon.org/news_free/55805/?pc=pc.
[29] 中国能源报. 英国碳交易市场“上线”争议不断[EB/OL]. (2021-05-25)[2022-10-11]. https://finance.sina.com.cn/wm/2021-05-25/doc-ikmxzfmm4595898.shtml.
China Energy News. The "launch" of the UK carbon trading market is controversial[EB/OL]. (2021-05-25)[2022-10-11]. https://finance.sina.com.cn/wm/2021-05-25/doc-ikmxzfmm4595898.shtml.
[30] European Council. An European economic recovery plan[EB/OL]. (2008-11-26)[2022-10-11]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52008DC0800.
[31] BOLSCHER H, BROWNSORT P, OPINSKA L G, et al. High level report: CCUS in Europe[R]. Brussels: European Commission, 2019: 1.
[32] DAHL C A, SUN C, WANG J. How can CCUS play its needed role in climate policy?[C]. Mapping the Energy Future-Voyage in Uncharted Territory, 43rd IAEE International Conference, July 31-August 3, 2022. International Association for Energy Economics.
[33] 第一财经. 通胀创新高，欧盟能源转型之路怎么走[EB/OL]. (2022-09-04)[2022-10-11]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1743053413577205234&wfr=spider&for=pc.
China Business News. Inflation has reached a new high, how to go on the road of EU energy transformation. [EB/OL]. (2022-09-04)[2022-10-11]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1743053413577205234&wfr=spider&for=pc.
[34] 奇点能源. 欧盟再发力!可再生能源目标 45%!欧盟议会一读通过可再生能源指令![EB/OL]. (2022-09-15) [2022-10-11]. http://www.ideacarbon.org/ news_free/58152/.
Singularity Energy. The EU is re-energized! Renewable energy target 45%! EU Parliament adopts renewable energy directive on first reading! [EB/OL]. (2022-09-15)[2022-10-11]. http://www.ideacarbon.org/news_free/58152/.
[35] 高炜, 白平, 王鸿，等. CCUS 项目的温室气体排放核算方法学思考[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 12-21.
GAO Wei, BAI Ping, WANG Hong, et al. Consideration on greenhouse gas emission accounting methodology of CCUS project[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(4): 12-21.
[36] LEE B J, LEE J I, YUN S Y, et al. Methodology to calculate the CO_2 emission reduction at the coal-fired power plant: CO_2 capture and utilization applying technology of mineral carbonation[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7402.
[37] 范允奇, 王文举. 欧洲碳税政策实践对比研究与启示[J]. 经济学家, 2012(7): 96-104.
FAN Yunqi, WANG Wenju. Comparative research and enlightenment of European carbon tax policy practices[J]. Economist, 2012(7): 96-104.
[38] Norwegian Petroleum Directorate. CO_2 emissions from petroleum activities in 2021, by source[EB/OL]. (2022-10-07) [2022-10-11]. https://www.norskpetroleum.no/en/environment-and-technology/emissions-to-air/.
[39] 何璇, 黄莹, 廖翠萍. 国外 CCS 政策法规体系的形成及对我国的启示[J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 157-163.
HE Xuan, HUANG Ying, LIAO Cuiping. Review and analysis of CCS policies in domestic and overseas[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(2): 157-163.
[40] European Council of the European Union. Fit for 55[EB/OL]. (2022-10-01)[2022-10-11]. https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/#what.
[41] EU. DIRECTIVE 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006[EB/OL]. (2009-08-23)[2022-10-11]. https://www.legislation.gov.uk/eudr/2009/31.
[42] EU. 2013 amendment to the 1996 protocol to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter, 1972 to regulate marine geoengineering[EB/OL]. (2013-10-18) [2022-10-11]. https://cdrlaw.org/wp-content/uploads/2020/04/ London-Convention-2013-Amendment-Alone.pdf.
[43] 邹乐乐, 张九天, 魏一鸣. 二氧化碳封存技术相关国际法规与政策的回顾与分析[J]. 中国能源, 2010, 32(4): 15-18.
ZOU Lele, ZHANG Jiutian, WEI Yiming. Review and analysis of international regulations and policies related to CO_2 storage technology[J]. Energy of China, 2010, 32(4): 15-18.
[44] ROCHA H, COSTA H K d M. Chapter 14: legal and regulatory barriers to CO_2 geological storage in Brazil: lessons from the European Union, De Medeiros Costa H K, Arlota C, editor, Carbon Capture and Storage in International Energy Policy and Law[M]. Elsevier, 2021: 263-283.
[45] HEFFRON R J, DOWNES L, BYSVEEN M, et al. Ownership, risk and the law for a CO_2 transport network for carbon capture and storage in the European Union[J]. Journal of Energy & Natural Resources Law, 2018, 36(4): 433-462.
[46] European Commission. Horizon Europe[EB/OL]. (2022-10-08)[2022-10-11]. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/horizon-europe_en.
[47] ZHANG H. Regulations for carbon capture, utilization

and storage: comparative analysis of development in Europe, China and the Middle East[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 173: 105722.

[48] 中国石化报.全球 CCUS 的发展趋势与挑战[EB/OL]. (2009-08-23)[2022-10-11]. https://baijiahao. baidu.com/s?id=1727059317703837957&wfr=spider&for=pc.
Sinopec News. Global CCUS development trends and challenges[EB/OL]. (2009-08-23)[2022-10-11].https://baijiahao.baidu.com/s?id=1727059317703837957&wfr=spider&for=pc.

[49] BASSI S, BOYD R, BUCKLE S, et al. Bridging the gap: improving the economic and policy framework for carbon capture and storage in the European Union[R]. Policy brief: Centre for Climate Change Economics and Policy (CCCEP), Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, 2015: 1.

[50] 董利苹, 曾静静, 曲建升, 等. 欧盟碳中和政策体系评述及启示[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(12): 1463-1470.
DONG Liping, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, et al. Review of EU's carbon neutral policy system and its enlightenment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(12): 1463-1470.

[51] 高华. 全球碳捕捉与封存（CCS）技术现状及应用前景[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(5): 33-38.
GAO Hua. Research on global CCS technology status and application prospect[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 33-38.

[52] 彭峰. 碳捕捉与封存技术(CCS)利用监管法律问题研究[J]. 政治与法律, 2011(11): 18-26.
PENG Feng. Research on regulatory legal issues in the use of carbon capture and storage technology (CCS)[J]. Political Science and Law, 2011(11): 18-26.

[53] 杜雪. 节能减排背景下 CCUS 技术政策比对与管理研究[D]. 太原: 山西大学, 2016: 1.
DU Xue. CCUS technology policy analyses and management researches under the background of energy conservation and emission reduction[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016: 1.

[54] 刘玉梅. 二氧化碳驱油与地质封存环境风险分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 1.
LIU Yumei. Environmental risk analysis of carbon dioxide flooding and geological storage[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020: 1.

[55] 王高峰, 秦积舜, 孙伟善. 碳捕集利用与封存案例与产业发展对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 1.
WANG Gaofeng, QIN Jishun, SUN Weishan. CCUS development suggestions based on case analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2020: 1.

[56] 魏凤, 李小春, 刘玫, 等. CCS 国际标准化进展剖析及对我国的启示[J]. 科技管理研究, 2014, 34(6): 201-205.
WEI Feng, LI Xiaochun, LIU Mei, et al. Current status of CCS international standardization activities and its suggestions for China[J]. Science and Technology Management Research, 2014, 34(6): 201-205.

[57] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议[J/OL]. 环境科学: 1-15 (2022-06-23) [2022-11-22]. DOI:10.13227/j.hjkx.202203136.
ZHAO Zhenyu, YAO Shun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: status, problems and suggestions of CCUS in China[J/OL]. Environmental Science: 1-15 (2022-06-23)[2022-11-22]. DOI:10.13227/j.hjkx.202203136.

[58] 邢力仁, 武正弯, 张若玉. CCUS 产业发展现状与前景分析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(8): 99-105.
XING Liren, WU Zhengwan, ZHANG Ruoyu. Development status and prospect analysis of CCUS industry[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(8): 99-105.

[59] 中国（德国）研发创新联盟: 中国(德国)研发创新联盟碳中和白皮书 2022[EB/OL]. (2022-09-20)[2022-10-11]. https://www.doc88.com/p-938470118676 20.html.
China (Germany) R&D Innovation Alliance: China (Germany) R&D innovation alliance carbon neutral white paper 2022[EB/OL]. (2022-09-20)[2022-10-11]. https://www.doc88.com/p-93847011867620.html.

[60] 余丽, 周旭磊. 碳达峰目标实现的国际经验及中国路径[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2022, 43(3): 12-21.
YU Li, ZHOU Xulei. International experience and China's path to achieve carbon peak[J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Science), 2022, 43(3): 12-21.

[61] 电力节能环保服务平台. 各类型 CCER 减碳量如何核算？如何开发![EB/OL]. (2022-03-11) [2022-10-11]. https://new.qq.com/rain/a/20220311A01L5J00.
Electric power energy conservation and environmental protection service platform. How to calculate the carbon reduction of each type of CCER? How to develop![EB/OL].(2022-03-11)[2022-10-11] https://new.qq.com/rain/a/20220311A01L5J00.

[62] 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.

[63] 秦阿宁, 吴晓燕, 李娜娜, 等. 国际碳捕集、利用与封存（CCUS）技术发展战略与技术布局分析[J]. 科学观察, 2022, 17(4): 29-37.
QIN Aning, WU Xiaoyan, LI Nana, et al. Analysis on international strategy and technology development of carbon capture, utilization and storage (CCUS)[J]. Science Focus, 2022, 17(4): 29-37.

[64] JIANG K, ASHWORTH P, ZHANG S, et al. China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109601.

[64] 桑树勋, 刘世奇, 陆诗建, 等. 工程化 CCUS 全流程技术及其进展[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(5): 711-725.
SANG Shuxun, LIU Shiqi, LU Shijian, et al. Engineered full flowsheet technology of CCUS and its research progress[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 711-725.

（责任编辑　刘永强）