

引文：杨术刚, 李兴春, 蔡明玉, 等. 国外CO₂地质封存管理制度、标准体系分析及其启示[J]. 天然气工业, 2023, 43(12): 130-137.

YANG Shugang, LI Xingchun, CAI Mingyu, et al. Overseas management systems and standards for CO₂ geological storage and their implications for China[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(12): 130-137.

国外 CO₂ 地质封存管理制度、标准体系分析及其启示

杨术刚^{1,2} 李兴春^{1,2} 蔡明玉^{1,2} 薛明^{1,2} 张坤峰^{1,2} 刘双星^{1,2}

1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司 2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室

摘要：在实现中国“双碳”目标的过程中，构建结构合理、层次分明、适应经济社会低碳发展的 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系具有重要意义。为此，总结了美国与欧盟 CO₂ 地质封存管理制度及技术标准体系特点，分析了中国 CO₂ 地质封存相关政策与标准现状，并提出了有针对性的建议。研究结果表明：①美国、欧盟 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系，以封存许可为核心，以有效管控 CO₂ 泄漏风险、切实保护地下饮用水源为目标，重在规范封存过程中场地表征、监测、纠正措施等环节的方法选择和方案执行；②中国 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系已初步形成，但仍需要进一步完善和细化；③建议在建设中国 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系的过程中，进一步完善政策激励体系、推进碳封存技术研发与集群示范工程建设、加快构建符合国情的碳封存法律法规与管制制度，加快制订全流程技术标准体系。结论认为，加快构建管理制度与全流程技术标准体系，对于推动我国 CO₂ 地质封存规范化、规模效益化发展具有重要指导意义。

关键词：CO₂ 地质封存；地下注入控制法规；法律框架；管理制度；技术指南；激励政策

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.12.014

Overseas management systems and standards for CO₂ geological storage and their implications for China

YANG Shugang^{1,2}, LI Xingchun^{1,2}, CAI Mingyu^{1,2}, XUE Ming^{1,2}, ZHANG Kunfeng^{1,2}, LIU Shuangxing^{1,2}

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control, Beijing 102206, China)

Natural Gas Industry, Vol.43, No.12, p.130-137, 12/25/2023. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In China, for meeting the "carbon peak and carbon neutrality" goals, it is significant to establish the management system and standard for CO₂ geological storage, which are well-structured, hierarchical, and adaptive to the low-carbon development of the economic society. This paper discusses the characteristics of US and EU management systems and standards for CO₂ geological storage, analyzes China's existing policies and standards for CO₂ geological storage, and puts forward corresponding suggestions. The results show that the US and EU management systems and standards are represented by the issue of carbon storage license to effectively control any risk of CO₂ leakage and practically protect the underground source of drinking water, and they are designed to regulate the method selection and scheme execution in the process of storage, including site characterization, monitoring, and correction. China has preliminarily formed the management system and standard for CO₂ geological storage, which need to be further revised and improved. For this purpose, it is recommended to enhance the relevant incentive policies, carry out R&D and cluster demonstration programs for CO₂ storage, and establish the CO₂ storage laws, regulations and rules in line with China's conditions, thereby finalizing a whole-process standard package. It is concluded that the accelerated establishment of management system and whole-process standard package will have important implications for regularized, extensive and beneficial CO₂ geological storage in China.

Keywords: CO₂ geological storage; Laws and regulations for underground injection control; Legal framework; Management system; Technical guide; Incentive policy

基金项目：中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“咸水层二氧化碳封存协同烟气处置方法研究”（编号：2023ZZ1301）、“高含盐污水低成本脱盐外排与回注风险监控技术研究”（编号：2021DJ6602）。

作者简介：杨术刚，1993 年生，工程师，博士；主要从事气田采出水回注、CO₂ 地质封存以及地下水环境保护等方面的研究工作。地址：（102206）北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼。ORCID: 0000-0001-5452-8634。E-mail: yshugang@cnpc.com.cn

通信作者：刘双星，1990 年生，高级工程师，博士；主要从事 CO₂ 地质封存、碳排放核算等方面的研究工作。地址：（102206）北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼。ORCID: 0000-0003-1385-5246。E-mail: liushuangxing@cnpc.com.cn

0 引言

CO₂ 地质封存是规模化减少 CO₂ 排放、减缓全球气候变暖、实现可持续发展的重要支撑技术，对促进化石能源低碳化利用、保障国家能源安全具有重要作用^[1-3]。中国 CO₂ 排放总量大、强度高，在实现“双碳”目标的过程中，面临巨大的挑战，统筹能源供应端与消费端的绿色低碳转型，推动 CO₂ 地质封存等固碳端技术创新，并构建相关管理制度及标准体系愈发迫切^[4-5]。美国和欧盟是 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系构建的先行者，颁布了一系列法令推动 CO₂ 地质封存规模化、有序化发展，并表现出显著的引领和促进作用，已处于不同实施阶段的商业化 CO₂ 捕集、利用与封存项目（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, CCUS）占全球 CCUS 项目总数的 56%^[6]。为此，分析美国和欧盟 CO₂ 地质封存激励政策体系、管理制度与全生命周期技术标准体系，进而结合我国 CO₂ 地质封存相关政策与技术标准体系现状提出相应建议，以期为我国 CO₂ 地质封存管理制度与技术标准体系的制订与完善提供有益借鉴。

1 美国 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系

美国含油气盆地 CO₂ 封存潜力约 $1\,200 \times 10^8 \text{ t}$ ，咸水层封存潜力介于 $1.61 \times 10^{12} \sim 20.16 \times 10^{12} \text{ t}$ ^[3]。为充分发挥 CO₂ 地质封存在规模化减碳的作用，美国建立了多层次的激励政策体系，颁布了规范 CO₂ 地质封存全过程的管理制度，构建了 CO₂ 地质封存全生命周期技术标准体系，显著推动了 CCUS 技术的商业化发展。截至 2022 年 9 月，美国处于不同实施阶段的 CCUS 项目共计 83 项，占全球 CCUS 项目的 42%，其中专用地质封存项目 53 项，驱油封存项目 17 项，形成 CO₂ 总捕集能力约 $1 \times 10^8 \text{ t/a}$ ，约占全球总捕集能力的 41%^[6]。

1.1 建立多层次的激励政策体系

经过多年的探索和实践，美国逐步形成了以美国能源部（Department of Energy, DOE）项目资助为引导，以高校、美国地质调查局等科研机构的调查研究为支撑，以财税政策激励为动力的 CCUS 发展体系。

在项目支撑方面，自 1997 年《联合国气候变化框架公约》京都议定书通过以来，美国能源部通过碳封存计划资助高校、国家实验室、微小企业等机构的研发项目。据统计，仅 2012—2023 年期间，DOE 对

CCUS 研究、开发与示范项目（Research Development Demonstration, RD & D）的资助就高达 45 亿美元。《2020 年美国能源法案》授权用于美国能源部和美国环保署（Environmental Protection Agency, EPA）在 2021—2025 年开展 CCUS 相关的 RD & D 费用超过 60 亿美元。2021 年 11 月，美国通过《基础设施投资法案》，提供近 50 亿美元用于支持 CO₂ 运输和封存基础设施及场地的开发与融资。

在研究架构方面，为进一步推动 CCUS 技术进步与发展，美国国家能源技术实验室（National Energy Technology Laboratory, NETL）于 2003 年发起成立美国区域碳封存合作联盟（Regional Carbon Storage Partnerships, RCSPs）^[7-8]。历经 20 年三个阶段的发展，美国区域碳封存合作联盟在保障 CO₂ 安全封存的场地描述、监测、风险评估与管理、不同类型地质体封存现场示范等方面取得重要突破^[8]。

在财税政策激励方面，美国财政部和美国国家税务局联合颁布 45Q 税收抵免政策，对有效碳捕集和封存的项目予以税收抵免^[9]，进一步促进了 CCUS 商业项目蓬勃发展。45Q 税收抵免政策于 2008 年首次颁布，2018 年修订，最新修订于 2021 年 1 月生效，是目前最典型、最具激励性的 CCUS 政策。该政策采用递进式补贴价格的设定方式，其中 CO₂ 地质封存的补贴价格由 2021 年的 34.81 美元/t 递增至 2026 年的 50 美元/t，CO₂ 驱油封存和 CO₂ 捕集与利用的补贴价格由 2021 年的 22.68 美元/t 递增至 2026 年的 35 美元/t。45Q 政策确保了 CCUS 项目长期稳定的现金流，大大降低了项目的财务风险，从而鼓励企业投资新的 CCUS 项目，促进了美国 CCUS 项目的多样化发展^[3]。

1.2 规范 CO₂ 地质封存全过程管理

美国环保署按照注入介质、注入地层以及应用领域不同，划分了 6 种类型的注入井，其中第 VI 类井用于向深部地层注入 CO₂，即实施 CO₂ 地质封存^[10]。美国以 1974 年通过的《安全饮用水法》和 1980 年颁布的《地下注入控制法规》为基础，形成了《地下注入控制计划之 CO₂ 地质封存井联邦要求：最终条例》（简称第 VI 类井法规），并于 2011 年 1 月开始生效，其主要内容如图 1 所示。

第 VI 类井法规以保护地下饮用水源为初衷，避免其受到 CO₂ 封存的影响，相关要求包括：①广泛的场地描述；②项目生命周期内注入井建井；③注入井作业；④注入期和注入后场地维护期内涵盖井筒完整性、CO₂ 注入与封存、地下水质量等的全面监测；⑤确保 CO₂ 地质封存项目全生命周期内资金可

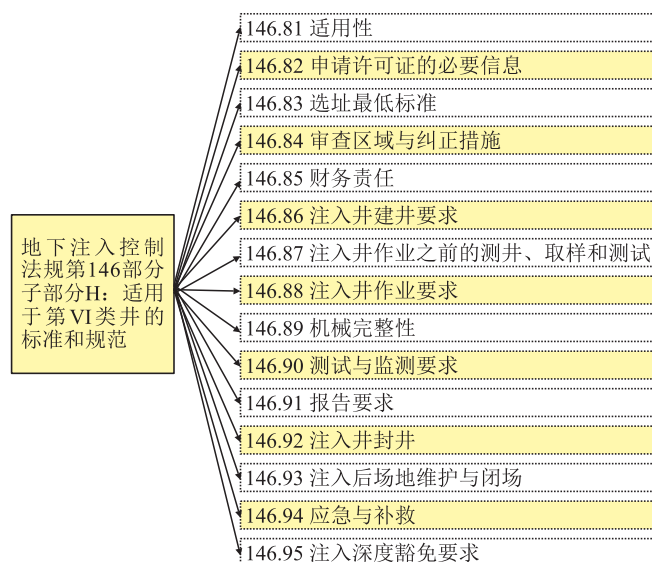


图1 第VI类井法规主要内容概览图

用性的财务责任（包括注入后场地维护和应急响应）；⑥提供项目特定信息以持续评估第VI类井作业和确认保护地下饮用水源的报告和记录保存等。

实施 CO₂ 地质封存项目需获得第VI类井许可证。许可是美国 CO₂ 地质封存计划管理的核心，贯穿于整个项目生命周期^[11]。运营商在提交许可证申请时，提供的资料包括但不限于注入井位、场地地质构造和水文地质特征、区域内所有井筒信息、地球化学背景值资料、拟定作业数据、监测计划、封井计划以及应急预案等^[12]。此外，鉴于地质封存项目注入 CO₂ 的特殊性质，第VI类井法规还旨在解决 CO₂ 的相对浮力、地下流动性、水存在条件下的腐蚀性以及预计注入量等问题。

1.3 构建 CO₂ 地质封存全生命周期技术标准

第VI类井法规生效以后，美国环保署在 2011 年 7 月—2016 年 12 月期间陆续发布了 CO₂ 地质封存财务责任、项目方案制订、场地描述、审查区域评估与纠正措施、建井、测试和监测、封井与注入后场地维护及闭场、记录保存与报告及数据管理等技术指南（图 2），以规范和管理 CO₂ 地质封存项目全生命周期内的所有活动。

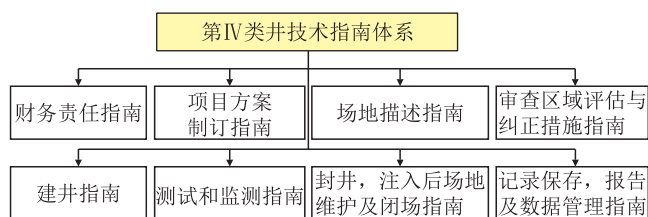


图2 地下注入控制计划第VI类井技术指南体系图

1.3.1 项目方案制订指南

第VI类井法规要求 CO₂ 注入井的所有者或运营者制订、获批并实施区域审查和纠正措施方案、测试和监测方案、注入井封井方案、注入后场地维护与闭场方案、应急与补救方案^[13]。本指南介绍了每类方案所需要的基本内容，描述主管部门评估和批准每个方案的过程以及美国环保署如何在整个项目生命周期内对方案进行建议，进而编制符合第VI类井法规要求的 CO₂ 地质封存项目方案。美国公共饮水系统中 90% 的水都取自地下水，因此方案审查的重点是 CO₂ 和地层咸水是否会通过人工通道流入地下饮用水源，封闭的注入井将来是否会演变成 CO₂ 和地层咸水泄漏的通道，CO₂ 羽流扩展是否会威胁地下饮用水源，以及地下饮用水源受到封存活动影响时，所有者或运营者计划采取的措施。

1.3.2 场地描述指南

场地描述在于识别潜在风险，排除不适宜场地，确保 CO₂ 地质封存工程长期安全^[14]。在场地描述阶段，第VI类井法规要求对拟选场地开展详细的地质、水文地质、水文地球化学以及地质力学特征评估，以确保 CO₂ 注入井选择在合适的位置^[15]。

场地描述指南由三部分构成：①区域地质 / 水文地质 / 构造地质 / 矿产地质特征、各类地图与地质图、地震历史、储盖层物性特征以及场地地球化学—土壤气—大气背景值等资料；②封存场地适宜性论证，包括储层盖层结构、CO₂ 羽流与地层及井筒的兼容性、封存潜力论证及盖层完整性论证；③在批准 CO₂ 注入前必须满足的注入井钻井与完井相关要求，包括测井、储盖层岩石取样与分析、储层流体取样与物化性质表征、储盖层破裂压力分析以及水文地质试验。场地描述所获取的数据将为封存场地地质建模、流体运移模拟、审查区域划定、监测系统设计等工作提供支撑。

1.3.3 审查区域评估和纠正措施指南

第VI类井法规要求划定 CO₂ 注入井周围因 CO₂ 注入活动而导致地下饮用水源可能受影响的区域^[16]。审查区域划定通过历史资料收集、现场勘察、遥感以及地球物理探测等手段，识别审查区域内所有可能导致注入区流体泄漏的潜在通道，包括地质裂缝和人工构筑物，如井筒或矿井。对那些可能穿透注入区盖层的井筒，必须评估其套管和固井质量以及封井质量。对已经识别出的潜在流体泄漏通道的井筒采取封井或补救固井等纠正措施，并在附近实施

强化监测。审查区域划定通常采用计算模拟的方法，并在 CO₂ 地质封存全生命周期内定期重新评估审查区域，其频率不得低于每 5 年 1 次。

1.3.4 建井指南

注入井建井是 CO₂ 地质封存工程的关键环节，对确保 CO₂ 安全注入储层并封存在目标地层、防止储层地层水或 CO₂ 流入地下饮用水源或其他未批准区域、保护浅层地下水资源免受危害至关重要。建井指南由建井要求、其他类型井转为 CO₂ 注入井以及作业要求三部分组成^[17]。其中，建井要求规定了机械完整性论证，井身结构、测井、修井设计，井筒强度与耐腐蚀，固井套管、油管、封隔器、地表与井下关闭装置选择等。现有井（如第 I 类井、第 II 类井、监测井及地层测试井等）转为 CO₂ 注入井主要规定了井筒材料的强度以及与 CO₂ 和地层流体的相容性、井筒设计和机械完整性。作业要求旨在维持井筒完整性，主要内容包括注入压力要求、环空监测要求

以及井筒完整性维护要求。此外，指南要求注入压力宜低于注入区地层破裂压力的 90%，并定期开展机械完整性测试，连续监测各类压力、注入速率和注入量。

1.3.5 测试和监测指南

测试与监测是 CO₂ 地质封存工程的重要组成部分，起着评估封存项目是否安全稳定并达到预期效果，以及衡量项目成败的关键作用。第 VI 类井法规要求在 CO₂ 地质封存项目全生命周期内开展测试与监测，以查明流体泄漏或可能导致流体泄漏的风险因素，确保井筒维持其机械完整性、流体运移范围和压力增幅在许可划定范围内，并确定地下饮用水源未受威胁^[18]。本指南要求的测试与监测活动包括机械完整性测试、作业期间的注入井测试和监测、不同层位的地下水水质监测、CO₂ 羽流及与之相关的压力前缘追踪、土壤气和大气监测^[18]。CO₂ 地质封存项目不同阶段所应采取的测试与监测活动如表 1 所示。

表 1 CO₂ 地质封存不同阶段所需开展的测试与监测活动表

阶段	测试与监测活动
场地评估阶段	盖层上部地下水水质监测、羽流与压力前缘追踪
建井阶段	机械完整性测试、盖层上部地下水水质监测、羽流与压力前缘追踪
CO ₂ 注入与监测阶段	机械完整性测试、CO ₂ 气流成分分析、注入压力 / 速率 / 总量监测、腐蚀监测、盖层上部地下水水质监测、压降测试、羽流和压力前缘追踪
注入后场地维护阶段	机械完整性测试、盖层上部地下水水质监测、羽流与压力前缘追踪

机械完整性测试包括内部机械完整性和外部机械完整性，前者需在整個注入阶段持续进行；后者在注入前以及停注封井前需开展 1 次，注入阶段至少每年 1 次。注入阶段的作业测试与监测包括：① CO₂ 气流的物理化学性质分析；② 注入速率和注入量监测；③ 注入压力监测，确保注入压力不超过地层的破裂压力和油管的爆裂压力；④ 腐蚀监测，腐蚀监测需每季度进行；⑤ 压降测试，至少每 5 年开展一次。

地下水水质和地球化学监测在于识别注入流体和地层流体的运移，监测因注入流体或储层流体外溢引起的重金属和有机物浸出或迁移而产生的地球化学变化，从而判定是否存在流体泄漏。监测井网设计需统筹考虑注入速率、注入量、地质、现有井等所有场地资料。在注入阶段前几年，美国环保署建议每季度对所有监测井进行地下水取样与分析。CO₂ 羽流运移与压力前缘监测主要是为了识别注入活动对地下饮用水源的潜在风险、验证 CO₂ 羽流运移模拟预测结果，同时也为区域审查二次评估提供重要信息。

1.3.6 封井，注入后场地维护及闭场指南

为确保在停注 CO₂ 后，CO₂ 地质封存项目从作业阶段成功过渡到注入后场地维护阶段以及闭场阶段，美国环保署制订了封井、注入后场地维护（Post-Injection Site Care, PISC）及闭场指南^[19]。

封井指南对封井方案编制、井底储层压力确定、封井前机械完整性测试、封井准备、实施封井以及编制与提交封井报告等作了规定。指南 PISC 部分旨在规范：① 封存项目生命周期内 PISC 与闭场方案的审查与修订。② PISC 时间表。③ PISC 阶段的监测，包括注入区 CO₂ 羽流和压力前缘监测，以及盖层上部地层地下水水质和地球化学监测；在没有批准其他替代监测方案时，美国环保署要求监测时限为 50 年。④ 基于监测结果和特定场地数据的地下饮用水源未受危害的论证。

闭场指南主要包括闭场告知、监测井封井、闭场报告与记录保存、闭场后要求等 4 部分。对所有监测井实施封堵是闭场阶段最主要的活动，以防止

注入流体或储层流体经监测井泄漏。

1.3.7 记录保存, 报告及数据管理指南

为确保上述活动按计划进行并符合法规和许可要求, 美国环保署颁布了记录保存、报告与数据管理指南^[20]。该指南由地质封存数据工具(Geologic Sequestration Data Tool, GSDT)与电子报告提交、建井前报告与记录保存、作业前报告与记录保存、注入阶段报告与记录保存、注入后报告与记录保存 5 部分组成, 旨在说明: ① CO₂ 地质封存项目在每一阶段的报告与记录保存要求; ② 基于地质封存数据工具的报告流程; ③ 项目相关活动和操作按计划进行的报告提交^[20]。鉴于 CO₂ 地质封存工程的复杂性和管理要求的多样性, 美国环保署开发了电子报告与数据管理集成系统以便于管理, 同时也减轻了各方负担。

2 欧盟 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系

欧盟高度重视 CCUS 技术, 将其作为应对气候挑战、实现碳中和与可持续发展的关键手段, 并通过一系列法律和政策来支持 CCUS 项目的发展。在政策支持方面, 欧盟于 2005 年开始实施温室气体排放许可交易制度, 于 2022 年 11 月发布碳清除认证框架(Carbon Removal Certification Framework, CRCF), 以促进 CCUS 技术创新。在资金激励方面, 欧盟于 2020 年 6 月创立了总额为 100 亿欧元的欧洲创新基金, 作为今后 CCUS 项目的主要公共资金来源; 科研资助扶持计划“地平线欧洲”也涉及多个 CCUS 相关项目^[3, 21]。与此同时, 欧盟也积极探索制定 CCUS 技术发展路线图和产业专门发展战略。

在立法层面, 欧盟于 2009 年通过了《CO₂ 地质封存指令》, 并于 2014 年启动审查程序和修订建议。该指令规定了封存场地选择、封存许可、监测、报告、检查、运行、闭场和闭场后义务、资金保证、第三方准入、信息公开等基本制度, 为在欧盟范围内开展环保安全型、风险可控型的 CCUS 项目提供了法律监管框架的基础。2018 年, 欧盟修订《可再生能源指令》, 就可再生能源以及非生物来源的可再生燃料制造过程中的 CO₂ 封存提出监管方案。

在标准体系方面, 欧盟于 2011 年发布《CO₂ 封存生命周期风险管理框架》和《封存体表征、CO₂ 气流成分、监测和纠正措施》两份技术指导文件^[22-23]。前者主要介绍 CO₂ 地质封存风险特征以及风险管理, 并提供了确保封存安全性和有效性的风险评估和管

理方法。后者包括 4 个部分: ① 封存体表征, 阐述场地筛选、封存体及周边区域的基础数据收集、三维地质模型建立等内容; ② CO₂ 气流成分, 阐述不同处理工艺 CO₂ 气流组成、管输影响、封存完整性、健康和环境危害; ③ 监测, 概述项目不同阶段的责任划分、监测方法、监测范围、方案执行一报告和效果管理; ④ 纠正措施, 阐述项目各阶段的责任划分、纠正措施方法、纠正措施方案的范围以及方案的执行与报告和效果管理。

3 中国 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系现状

自从《联合国气候变化框架公约》京都议定书于 2005 年正式生效以来, 在 2006—2020 年期间, 中国陆续发布了近 40 项涉及支持 CCUS 的政策^[4-5]。例如, 2006 年国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》, 提出重点研究开发主要行业 CO₂、CH₄ 等温室气体的排放控制与处置利用技术, 生物固碳技术及固碳工程技术。2008 年, 国务院发布《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书, 指出将 CO₂ 捕集、利用与封存技术列为科技研发重点支持领域。2014 年, 国务院发布《国家应对气候变化规划(2014—2020 年)》, 指出在地质条件适合的地区, 开展封存试验项目, 实施 CO₂ 捕集、驱油、封存一体化示范工程。2020 年, 中国提出“双碳”目标, 将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局, 为 CCUS 项目发展提供了新的机遇。

得益于相关支持政策, 中国 CO₂ 地质封存技术实现了从基础研究到工程示范乃至工业示范的跨越。在吉林油田、长庆油田以及胜利油田等地建成了不同规模的 CO₂ 驱油封存示范工程, 建设完成首个海上 CO₂ 封存示范工程项目, 并在鄂尔多斯建成中国首个 30 万吨级深部咸水层 CO₂ 地质封存示范项目, 形成 CO₂ 地质利用与封存项目规模约 200×10^4 t/a^[24]。在新的应用场景与深度减排需求下, 中国已规划建设千万吨级 CCUS 项目以及深部咸水层封存、玄武岩矿化封存、CO₂ 驱替煤层气/天然气等大型示范项目^[4]。然而, 相比于中国可再生能源、电动车、核能等技术领域, 目前给予包括 CO₂ 地质封存在内的 CCUS 项目的实质性政策仍然不足, 缺少支撑 CCUS 项目商业化发展的动力^[5]。此外, 我国 CO₂ 地质封存示范项目是在缺少法律框架的情况下逐步摸索发展起来的, 现行的法律法规尚未对 CO₂ 地质封存项目的实

施细节做出明确的规定或要求，也尚未建立专门适用于 CO₂ 地质封存的法律法规或管理条例。

在技术标准体系方面，为发挥标准化对中国实现碳达峰、碳中和目标的支撑作用，2021 年 12 月，国家发展和改革委员会发布《国家标准化发展纲要》，提出要研究制订生态碳汇、碳捕集利用与封存标准。2023 年 2 月，国家标准化委员会印发《碳达峰碳中和标准体系建设指南》，指出到 2025 年，要推动制订陆上封存、海上封存等碳封存标准。依托前期实施的 CO₂ 地质利用与封存示范工程，我国先后发布了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》《二氧化碳地质利用与封存

项目泄漏风险评价规范》等行业、团体或地方标准（表 2），启动了《二氧化碳地质封存场地评价指标体系》《碳捕集、利用与封存（CCUS）项目温室气体减排量化和核查技术规范》等国家标准的编制工作。然而，现行标准或起草中的标准，主要聚焦于 CO₂ 地质封存环境风险评估、减排核算、场地评价和注入规程，CO₂ 地质封存全生命周期中的封存方案制订、精细化场地选址、封存区域评估、建井、CO₂ 泄漏风险和羽流分布监测、场地维护及闭场等多个环节的技术标准仍处于空白，并且已发布的环境风险评估规范在风险识别指标的确定性、方法的科学性等方面仍有待于进一步完善。

表 2 中国现行的有关 CO₂ 地质封存技术指南、标准及其主要内容表

指南和标准	发布部门	实施日期	主要内容
二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）	原环境保护部	2016 年 7 月 1 日	环境风险评估工作程序、主要环境风险源识别、环境风险受体、确定环境本底值、环境风险评估和管理
石油天然气开发注二氧化碳安全规范（SY/T 6565—2018）	国家能源局	2019 年 3 月 1 日	规定了陆上油气田注 CO ₂ 的设计、施工、运行操作、安全管理等方面的安全要求
CO ₂ 驱油田注入及采出系统设计规范（SY/T 7440—2019）	国家能源局	2020 年 5 月 1 日	规定了注入、油气集输处理、自动控制及 CO ₂ 计量、站场总图等方面的要求
砂岩油田二氧化碳驱油藏工程方案编制技术规范（SY/T 7454—2019）	国家能源局	2020 年 5 月 1 日	规定了 CO ₂ 驱油藏工程方案编制的技术内容及要求，包括油田概况、油藏地质特征、基础参数确定、方案必选、经济效益分析等
二氧化碳捕集利用与封存术语（T/CSES 41—2021）	中国环境科学学会	2022 年 1 月 1 日	对 CO ₂ 捕集、运输、利用和地质封存全流程涉及的主要用语进行了定义或规范，对 CCUS 项目实施过程中涉及的监测、计量和风险等方面的术语进行了界定
液态 CO ₂ 驱油与封存注入地面操作规程（DB61/T 1501—2021）	陕西省市场监督管理局	2022 年 1 月 17 日	规定了液态 CO ₂ 地面注入系统、注入前检查、注入系统运行、停注、注入参数监测、安全环保注意事项、相关记录表格等内容
二氧化碳地质利用与封存项目泄漏风险评价规范（T/CSES 71—2022）	中国环境科学学会	2022 年 11 月 8 日	CO ₂ 泄漏风险识别和环境本底值调查、CO ₂ 泄漏风险分析、CO ₂ 泄漏风险等级划分及监测要求
二氧化碳驱油封存项目碳减排量核算技术规范（DB37/T 4548—2022）	山东省市场监督管理局	2022 年 11 月 21 日	规定了 CO ₂ 减排量核算边界界定方法、排放量核算方法及减排量核算方法

4 对构建中国 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系建议

当前，我国生态文明建设进入了以降碳为重点方向、推动减污降碳协同增效的关键时期。结合国外 CO₂ 地质封存攻关技术体系、颁布管理制度、制订技术规范、商业化部署的发展历程，为进一步推动我国 CO₂ 地质封存产业的发展，对构建相应管理制度与技

术标准体系提出以下建议。

4.1 完善政策激励体系，推进 CO₂ 地质封存技术研发及集群示范工程建设

国内 CO₂ 地质封存产业正处于发展关键期，建议尽快研究推出以 CO₂ 地质封存为终端的 CCUS 中长期产业发展规划，明确 CO₂ 地质封存在我国能源绿色低碳转型过程中的定位。借鉴美国 45Q 税收抵免政策，制订并完善税收优惠、补贴政策等激励措施；

完善碳交易市场,探索碳排放企业与地质埋碳企业之间的碳配额补偿与分配机制,推进碳封存产业链相关企业协同发展。成立专项基金或技术创新基金,当前以 CO₂ 地质利用协同减污为研发重点,加大对 CO₂ 驱油封存与工业过程深度耦合技术研发及示范工程建设的支持力度;长远加大对 CO₂ 地质封存与可再生能源深度融合的支持,推进深部咸水层封存、玄武岩矿化封存等大规模产业化集群示范工程建设。

4.2 加快构建 CO₂ 地质封存法律法规与管理制度体系

2006 以来,中国陆续发布的促进 CCUS 项目发展的相关政策,为 CO₂ 地质封存法律框架构建、监管环境建设提供了基础,建议立足于已施行的《地下水管理条例》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国环境影响评价法》以及《建设项目环境保护管理条例》等法律法规,尽快开展法律或条例的修订工作,适时启动诸如 CO₂ 地质封存管理条例等与碳封存相关的专门立法工作。明确适用 CO₂ 地质封存产业的法律条款,确定监管部门,做到产业发展有法可依,减少利益相关方的各种顾虑。与此同时,建立 CO₂ 地质封存许可、信息公开、泄漏风险监测与事故应急等保障项目安全运行的管理制度,明确 CO₂ 地质封存项目实施过程中的权、责、利划分,逐步推动我国 CO₂ 地质封存的法治化管理,提高企业积极性。

4.3 加快制订适宜我国地质条件与环境保护要求的 CO₂ 地质封存全流程技术标准体系

结合 CO₂ 地质封存工程的学科综合性、技术集成性,建议借鉴国外技术指南体系,集中管理部门、企事业单位、高校、科研院所等多方力量,制订科学合理的 CO₂ 地质封存项目建设、运营、监管、终止标准体系。具体而言,协力开展 CO₂ 地质封存泄漏风险评估、注入规程、减排核算等已发布标准的修订和升级,合力推进涵盖封存方案制订、场地选址与表征、建井标准、CO₂ 运移范围与泄漏风险监测、泄漏风险预警与控制、封井与场地维护及闭场、报告等环节的全流程 CO₂ 地质封存国家标准体系,为高质量实现我国“双碳”目标提供可靠有力的支撑。

5 结束语

美国和欧盟 CO₂ 地质封存管理制度与标准体系,以封存许可为核心,以有效管控 CO₂ 泄漏风险、切实保护地下饮用水源为目标,重在规范封存过程中

场地表征、审查区域评估与纠正措施、建井、监测、封井与闭场等环节的方法选择和方案执行。完善的碳封存管理制度与标准体系在美国与欧盟 CCUS 全产业链发展中表现出的引领和促进作用,对中国 CO₂ 地质封存产业发展具有很强的借鉴意义。当前,为适应中国 CO₂ 地质封存标准化、规模化发展的需求,需进一步完善政策激励体系,加快构建碳封存法律法规与管制制度,加快制订适宜我国地质条件与环境保护要求的碳封存全流程技术标准体系,推动 CO₂ 深度减排。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,薛华庆,熊波,等. “碳中和”的内涵、创新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57.
ZOU Caineng, XUE Huaqing, XIONG Bo, et al. Connotation, innovation and vision of "carbon neutral"[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 46-57.
- [2] 卢义玉,周军平,鲜学福,等. 超临界 CO₂ 强化页岩气开采及地质封存一体化研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 60-73.
LU Yiyu, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Research progress and prospect of the integrated supercritical CO₂ enhanced shale gas recovery and geological sequestration[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 60-73.
- [3] 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, 2021.
CAI Bofeng, LI Qi, ZHANG Xian, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021): China CCUS path study[R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2021.
- [4] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 2023.
ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023)[R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, 2023.
- [5] 周爱国,彭勃,宋磊,等. 中国碳捕集、利用与封存商业化蓝皮书(2022)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2023.
ZHOU Aiguo, PENG Bo, SONG Lei, et al. China CCUS commercialization blue paper (2022)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.
- [6] ZAPANTIS A, AL AMER N, HAVERCROFT I, et al. Global status of CCS 2022[R]. Washington DC: Global CCS Institute, 2022.
- [7] 甘志霞,娜孜木·叶鲁拜. 美国区域碳封存联盟对我国推进 CCS 工作的启示[J]. 环境保护, 2014, 42(20): 69-71.
GAN Zhixia, YELUBAI Nazimu. Regional carbon sequestration partnerships' enlightenments to China[J]. Environmental

- Protection, 2014, 42(20): 69-71.
- [8] National Energy Technology Laboratory. Safe geologic storage of captured carbon dioxide: two decades of DOE's carbon storage R&D program in review[R]. Albany: NETL, 2020.
- [9] TURAN G, ZAPANTIS A, KEARNS D, 等. 全球碳捕集与封存现状 2021[R]. 北京: 全球碳捕集与封存研究院, 2021.
TURAN G, ZAPANTIS A, KEARNS D, et al. Global status of CCS 2021[R]. Beijing: Global CCS Institute, 2021.
- [10] 杨术刚, 张坤峰, 陈宏坤, 等. 中国油气田采出水回注发展建议 [J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 106-116.
YANG Shugang, ZHANG Kunfeng, CHEN Hongkun, et al. Suggestions on the development of produced water reinjection in oil and gas fields in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 106-116.
- [11] 王金南, 刘兰翠. 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 项目的环境管理思考 [J]. 低碳世界, 2013(1): 22-25.
WANG Jinnan, LIU Lancui. Consideration on environmental management of carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) project[J]. Low Carbon World, 2013(1): 22-25.
- [12] 刘兰翠, 李琦. 美国关于二氧化碳地质封存井的要求 [J]. 低碳世界, 2013(1): 42-52.
LIU Lancui, LI Qi. Requirements of the United States on carbon dioxide geological storage wells[J]. Low Carbon World, 2013(1): 42-52.
- [13] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well project plan development guidance: EPA 816-R-11-017[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2012.
- [14] 曹默雷, 陈建平. CO₂ 深部咸水层封存选址的地质评价 [J]. 地质学报, 2022, 96(5): 1868-1882.
CAO Molei, CHEN Jianping. The site selection geological evaluation of the CO₂ storage of the deep saline aquifer[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1868-1882.
- [15] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well site characterization guidance: EPA 816-R-13-004[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2013.
- [16] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well area of review evaluation and corrective action guidance: EPA 816-R-13-005[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2013.
- [17] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well construction guidance: EPA 816-R-11-020[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2012.
- [18] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well testing and monitoring guidance: EPA 816-R-13-001[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2013.
- [19] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well plugging, post injection site care, and site closure guidance: EPA 816-R-16-006[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2016.
- [20] EPA. Geologic sequestration of carbon dioxide: Underground injection control (UIC) program class VI well record keeping, reporting, and data management guidance for owners and operators: EPA 816-R-16-005[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2016.
- [21] 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.
- [22] European Commission. Implementation of directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide: Guidance document 1: CO₂ storage life cycle risk management framework[R]. Brussels: European Communities, 2011.
- [23] European Commission. Implementation of directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide: Guidance document 2, characterisation of the storage complex, CO₂ stream composition, monitoring and corrective measures[R]. Brussels: European Communities, 2011.
- [24] 宋新民, 王峰, 马德胜, 等. 中国石油二氧化碳捕集、驱油与封存技术进展及展望 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 206-218.
SONG Xinmin, WANG Feng, MA Desheng, et al. Progress and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in CNPC oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 206-218.

(修改回稿日期 2023-11-10 编辑 陈 嵩)



本文互动