二氧化碳捕集、地质利用与封存项目环境管理研究

宋阳[1,2,3]，何少林[1,2,3*]，薛华[1]，齐志斌[1]，葛雁冰[1]，刘博[1,2,3]，余绩庆[1,2,3]

（1. 中国石油天然气股份有限公司规划总院，北京 100083；2. 国家油页岩生态环境分中心，北京 100083；3. 中国石油环境工程评估中心，北京 100083）

【摘　要】 对于能源密集型行业和难减排工业来说，二氧化碳捕集、地质利用和封存（CCUS）是缓解气候变化不可或缺的关键技术工具，但同时也会带来相应的生态环境问题。目前我国针对CCUS的环境法律法规、生态环境管理技术规范、CO_2监测标准、环境风险管控、核算办法和交易路径等要求仍然相对滞后。本文梳理了国内外CCUS的发展现状和趋势以及环境管理方面的不足。建议在CCUS全过程环境管理的联动衔接、CCUS的环境监测标准规范、基于封存CO_2运移和运输管道泄漏情景的源强定量风险评价模型、减污降碳协同控制、减排量核算方法学及碳交易途径等方面进一步出台科学化管控政策，优化和规范我国CCUS行业的环境管理流程，发挥CCUS项目最大的生态环境和社会经济价值。

【关键词】 CCUS；二氧化碳封存；环境管理；问题与建议

【中图分类号】X324；X24　　【文章编号】1674-6252（2022）05-0028-09

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.05.028

引言

二氧化碳捕集、地质利用和封存（CCUS）是缓解气候变化的关键技术工具，不仅对以化石能源为主要能量来源的行业提供了巨大的温室气体减排量，保持了电力系统的灵活性，还是钢铁、水泥等难减排工业过程的可行技术方案[1,2]。大多数情况下，在需要高热或者存在工艺碳排放的行业，CCUS是首选的脱碳解决方案。世界各国的研究机构对气候与技术、政策的模型研究表明：如果要实现巴黎协定的国际目标，CCUS是减碳技术措施中的必要组成。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）指出，不同路径CCUS的减排量到2030年需要达到1亿～4亿吨/年，到2050年需要达到30亿～68亿吨/年[3]。目前正在运行的CCUS工程的捕集总量为每年4000万吨，因此到2050年其规模要至少扩大100倍。目前全球商业化CCUS项目共135个，其中一半的项目均为2021年新开发和营运。美国在2021年新增CCUS项目36个，其次为英国8个、荷兰5个和比利时4个[4]。美国的经验表明当政策为资本提供足够的投资理由时，就会促进该产业的发展。2021年新增的每年400万吨以上的CO_2捕集量项目如Dave Johnson电厂、G2净零液化天然气厂和Next Decade Rio Grande液化天然气厂均位于美国。

近10年，我国意识到基于自然解决方案（NBS）的农业和林业碳汇有一定的上限。从实现碳中和目标的减排需求看，依照现有技术，2060年需要通过CCUS实现的CO_2减排量为10亿～18亿吨。与其相关的生物质能碳捕集与封存（BECCS）[5]和直接空气碳捕集与封存（DACCS）等负排放技术需要实现减排3亿～6亿吨和2亿～3亿吨CO_2[6]。各级政府部门已经更加积极地理解CCUS在脱碳中的作用，为后续政策制定奠定了基础。在“十四五”规划中明确将CCUS作为重大示范项目进行引导支持[7]。2021年5月，生态环境部与相关部委宣布支持在自由贸易区开展CCUS试点和示范项目。CCUS还被纳入2021年4月发表的《中美应对气候危机联合声明》。2021年6月，国家发展和改革委员会发布通知，要求CCUS提供项目信息，以支持近期的重大计划。

伴随产业政策的推进和利好，引发了中国新一轮大型CCUS示范项目的建设。2021年6月25日，国

资助项目：中国石油集团有限公司重大科技专项“二氧化碳规模化捕集、驱油与埋存全产业链关键技术研究及示范”（2021ZZ01-04）。

作者简介：宋阳（1992—），男，工程师，博士，主要从事石油石化行业环境污染防治和评估，E-mail: songyang666@petrochina.com.cn。

*** 责任作者：**何少林（1977—），男，高级工程师，博士，主要从事石油石化挥发性有机物管控研究、环境工程评估等工作，E-mail: heshaolin0@petrochina.com.cn。

家能源集团锦界电厂 15 万吨 / 年 CCUS 示范项目一次性通过 168 小时试运行，这是目前国内规模最大的燃煤电厂燃烧后 CO_2 捕集项目，试运期间连续生产出纯度 99.5% 的工业级合格液态 CO_2 产品，成功实现了燃煤电厂烟气中 CO_2 大规模捕集。2022 年 1 月 29 日，中国石油化工集团（以下简称中石化）宣布我国首个涵盖了碳捕集、利用和封存全环节的百万吨级 CCUS 项目——齐鲁石化—胜利油田 CCUS 项目全面建成，成为国内最大的 CCUS 全产业链示范基地，为国家推进 CCUS 规模化发展提供了应用案例。目前我国已投运或建设中的 CCUS 示范和商业项目达到 49 个，已建成的 38 个示范项目形成 CO_2 捕集能力 296 万吨 / 年、注入能力 121 万吨 / 年 [6,8]。这些项目以地质利用和封存为主，并且主要用于 CO_2 驱提高油气采收率（EOR）、CO_2 驱替煤层气（ECBM）和咸水层封存（表 1）。因为油气和煤炭行业对衰竭油气藏的结构特征和行为本身有很好的了解，现有的钻井和注入技术可以适用于碳封存的实际应用，并且中国早期 CCUS 示范项目优先采用高浓度 CO_2 排放源与 EOR 相结合的方式产生收益，当市场油价处于高位时，CO_2-EOR 收益不仅可完全抵消 CCUS 成本，并为 CCUS 相关利益方创造额外经济利润。其他还有一些在废弃油气藏、不可开采煤层和深海的 CO_2 封存以及化工和生物利用等仍处于开发前期。

1 CCUS 项目的环境管理现状

尽管 CCUS 作为应对气候变化和减缓 CO_2 排放的重要技术，但由于其前沿的技术体系和巨大的工程规模，引发了社会和公众对于 CCUS 项目环境影响和环境风险的担忧，甚至是反对。从国际经验看，环境影响和环境风险是影响甚至决定 CCUS 项目实施的关键因素之一，也是公众关心的焦点问题，诸多国际大型 CCUS 项目都是由于环境问题而进展受阻 [9]。中国政府也高度重视 CCUS 项目的环境影响和环境风险。

表1　中国主要的CCUS全流程项目

序号	项目	运行状态	启动年份	排放源	捕集技术	运输方式	封存利用方式	产能（万吨 / 年）
1	中石化中原油田 CO_2-EOR 项目	运行	2006	化肥厂合成氨尾气	燃烧前	罐车	EOR	12
2	中石油吉林油田 CO_2-EOR 项目	运行	2007	天然气净化	燃烧前	管道	EOR	35～60
3	中石化胜利油田 CCUS 项目	运行	2010	燃煤电厂	燃烧后	罐车	EOR	4
4	中联煤层气公司 CO_2-ECBM 项目	运行	2010	外购气	—	罐车	ECBM	0.1～0.2
5	国能神华集团煤制油 CO_2 捕集和封存示范	完成	2011	煤制油	燃烧前	罐车	咸水层封存	10
6	延长石油煤化工 CO_2 捕集与驱油示范项目	运行	2013	煤化工	燃烧前	罐车	EOR	5
7	中石油大庆油田 EOR 项目	运行	2014	天然气净化	燃烧前	罐车 + 管道	EOR	20
8	华能绿色煤电 IGCC 电厂捕集利用和封存示范	建设	2015	燃煤电厂	燃烧前	罐车	EOR 及咸水层封存	10
9	克拉玛依敦华石油 CCUS EOR 项目	运行	2015	甲醇厂	燃烧前	罐车	EOR	10
10	中石油长庆油田 EOR 项目	运行	2017	甲醇厂	燃烧前	罐车	EOR	5～10
11	国华锦界电厂 CO_2 捕集与封存全流程示范项目	建设	2019	燃煤电厂	燃烧后	—	—	15
12	国能泰州公司碳捕集及综合利用项目	建设	2020	燃煤电厂	—	—	EOR	50
13	中海油南海离岸 CCUS	运行	2021	天然气净化	—	—	海底咸水封存	30
14	中石化齐鲁石化—胜利油田 EOR 项目	运行	2021	化工厂	—	—	EOR	71～100
15	中石化华东油田 CCUS 全流程示范	建设	2021	化工厂	燃烧前	罐车 + 船运	EOR	50～100

注：①本表未考虑化工和生物利用项目，只考虑捕集和地质利用与封存的全流程项目。IGCC 表示 integrated gasification combine-cycle，整体煤气化联合循环发电。②中石油全称为中国石油天然气集团公司，中海油全称为中国海洋石油有限公司。③中国神华能源股份公司（简称中国神华）及所属陕西国华锦界能源有限责任公司现已并入国家能源投资集团有限责任公司（简称国家能源集团）

2013 年原环境保护部发布的《关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知》中提出“加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作，加强环境影响评价（以下简称“环评”）和环境影响监测，探索建立环境风险防控体系，推动环境标准规范制定，加强基础研究和技术示范，加强能力建设和国际合作”等要求。应此要求，《二氧化碳捕集、利用和封存环境风险评估技术指南（试行）》于 2016 年发布，这是中国第一部针对 CCUS 环境风险制定的技术指南。然而与 CCUS 技术和项目的开发能力与经验方面所取得的飞速进展相比，我国对 CCUS 项目的监管法规、环境影响评价、CO_2 减排核算、碳市场准入和风险评估仍然相对滞后（图 1），对 CCUS 环境影响和风险的不确定客观上制约了其在我国的大规模推广和商业化应用。

1.1 监管法规

目前 CCUS 产业发达的国家大部分已针对这类项目在法律法规层面进行了环境保护规定。澳大利亚于 2006 年颁布《海洋石油与温室气体储存法》[10]，为温室气体离岸注入、运输和地质封存活动提供了法律框架，并于 2009 年通过《海洋石油和温室气体储存（环境）条例》和《二氧化碳捕获与地质储存环境指南》针对环评内容、方法和标准做出规定，着重强调封存选址的重要性。欧盟于 2009 年发布《二氧化碳地质封存指令》（2009/31/EC）[11]，涵盖了从捕集、运输到不同地质构造封存整个生命周期的规定，要求其成员国在 2011 年 6 月前转化为国家法律。荷兰在此基础上通过修改其《矿业法》明确了 CO_2 封存的许可制度 [12]。英国根据其《能源法》于 2010 年颁布《二氧化碳储存（许可）条例》[13] 指出，禁止在水源地颁发 CO_2 封存许可证，在拟定封存场地不存在泄漏、环境损害和人类健康风险的情况下，可以颁发封存许可证 [14]。此外，日本修订了《海洋污染防治法》，也对海洋 CO_2 封存做出规定 [15,16]。美国以《安全饮用水法》为基础形成的《二氧化碳地质封存井的地下灌注控制计划的联邦要求：最终条例》[17] 于 2011 年 1 月 10 日正式生效，其针对以提高油气采收率为目的的 CO_2 注入井列为Ⅱ类井监管；针对长期 CO_2 地质封存项目列为Ⅵ类井管理，在许可程序、现场地质特征、审查区域与纠正措施、经济责任、注入井的施工、运行、机械完整性测试、监测、井堵塞、注入后现场管理、现场封闭的最低技术标准等方面要求更为严格以保护地下水 [18]。

我国 CCUS 的法规监管尚处在起步阶段，虽然与其相关的法律法规较多，但是我国的环境保护制度类和石油矿业权制度类法律法规均没有专门条文应对 CCUS 开发活动的监管。2012 年 3 月 18 日，《中华人民共和国应对气候变化法（草案）》发布，这是我国第一个系统的应对气候变化的法律文本，其中第 65 条指出，政府鼓励和支持 CCUS 和其他应对气候变化技术的发展。但该法案何时正式获得通过具有法律效力还未可知。此外，石油行业内部标准如《盐穴地下储气库安全技术规程》（SY/T 6806—2019）和

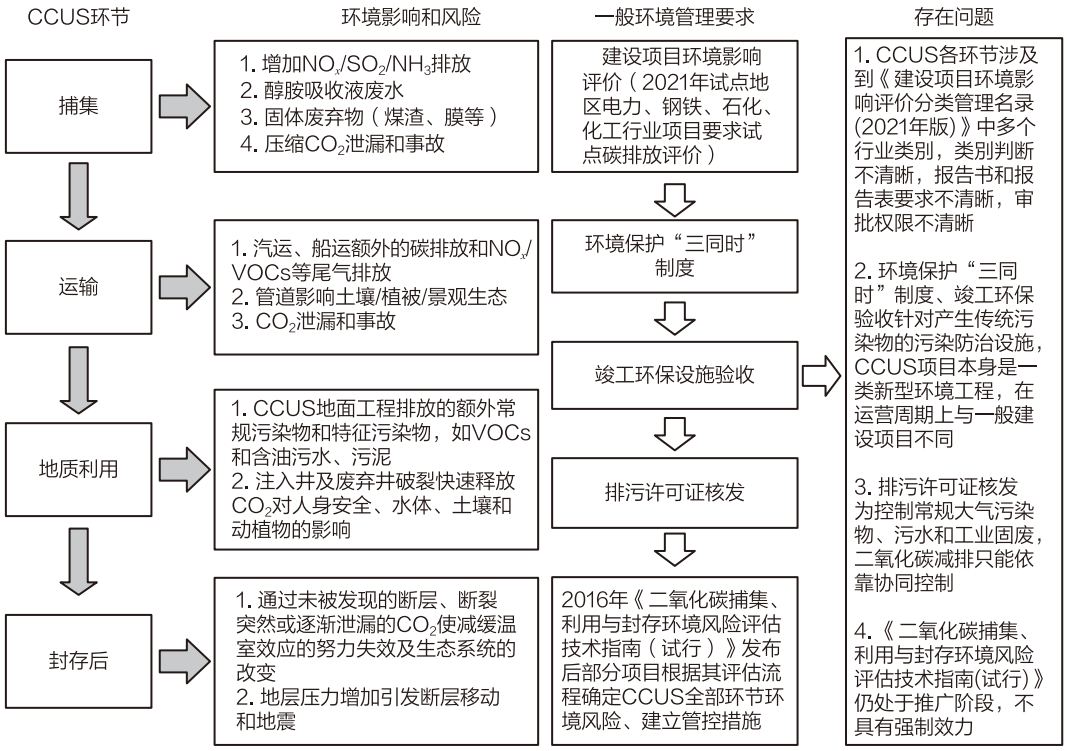

图1　CCUS项目的环境问题及当前管理框架

《油气藏型地下储气库安全技术规程》（SY/T 6805—2017）中部分条款如库址选址和地质评价可供 CCUS 项目封存借鉴，但由于天然气和 CO_2 固有性质的差异，其对 CO_2 长期封存的适用性明显不够。

1.2 生态环境管理技术规范

环评制度在预防和减轻环境污染和生态破坏中发挥着重要作用。我国 CCUS 项目均应依法进行环评。当前我国 CCUS 项目的环评分类、分级审批机制不清晰，现行的环评导则、指南和标准无法完全满足 CCUS 项目的需求（表 2）。一部分导则可以适用于 CCUS 项目的环评，如生态、土壤和地下水导则，其中已经包括土壤和地下水 pH 值、溶解氧、重金属、CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量等 CO_2 泄漏可能导致的环境变化以及动植物等生态系统的变化评价。一部分导则和标准不适用于 CCUS 项目，最突出的问题是，CO_2 并不是我国传统意义上的污染物，因此现行导则对 CCUS 项目的评价等级、评价范围、评价标准和模型预测方法不能完全匹配。现行的规划导则在进行 CCUS 产业（封存）集中区规划时缺少区域 CO_2 源汇现状和预测方面的要求。

目前仅有《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》专门针对 CCUS 项目的环境风险进行定性评估，弥补了《建设项目环境风险评价技术导则》与 CCUS 项目特性的不匹配。指南发布实施近 6 年来，对 CCUS 项目的环境风险评估做出了突出贡献，同时也暴露了几方面的问题需要进一步改进：一是风险分析和风险识别的步骤和指标有待调整明确；二是过于依赖专家打分的定性方法有待深化；三是仅针对土壤、地下水、地表水和环境空气等环境指标进行了规定和影响程度分级，缺少对附近居民健康、动植物和微生物多样性及生产力的 CO_2 浓度阈值和影响分类；四是需加强事故泄漏源强与后果分析的模型构建 [19,20]。

1.3 CCUS 项目 CO_2 环境监测

根据对已有 CCUS 示范项目的研究来看，捕集过程的 CO_2 泄漏量一般不大，且已经完善了监测措施。封存过程和封存后的泄漏风险是环境监测和评估的重点。目前国内多数 CO_2-EOR 项目没有重视对注入井和采出井的 CO_2 泄漏，另外对地表逸散量和地下 CO_2 运移状态的准确性和监测范围都不够明确，严重制约 CCUS 项目的测量、报告和核查（MRV）制度发展 [21]。特别是对地下 CO_2 羽流的准确监测依赖对地质封存体的深度认识。目前油田经过多年勘探、开发，积累了数量众多的钻井及地震、测井和地质研究资料，可以相对方便的观测 CO_2 的羽流状态，而对缺乏地质资料地区的 CO_2 运移模型建构和监测还需要积累和发展。目前我国还未形成完备的 CCUS 封存场地 CO_2 监测标准规范，主要依靠各项目根据自身情况设定。延长靖边油田 CO_2-EOR 项目吸取了加拿大 Weyburn 项目的成功经验，设计了综合地质、地球物理的地下监测系统，同时结合了土壤、水体和地表 CO_2 浓度 [22]。这是我国首次在 CCUS 项目中系统的监测了封存区、地表等范围内 CO_2 浓度变化及迁移规律，取得了良好的效果。但是目前对不同浓度 CO_2 对生态环境和人群健康影响后果仍然研究不足，CCUS 项目普遍缺乏对地下水、土壤和生物多样性的跟踪监测。

1.4 核算办法与交易途径

2021 年 7 月 16 日，各方期待已久的国家碳排放

表 2　与 CCUS 项目相关的环评导则、指南和标准规范

环境影响评价导则、指南和标准	CCUS 项目的适用性
《规划环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 130—2019）	该导则适用于 CCUS 产业规划环评，需要加强 CO_2 源汇现状和预测
《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》（HJ 2.1—2016）	该通用导则适用于所有 CCUS 项目的建设和运行的总体环境影响评价
《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ 169—2018）	该导则不适用于 CCUS 项目，因为 CO_2 不属于其规定的有毒有害污染物或者引起火灾和爆炸的物质，无法认定风险等级
《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》	该指南适用于 CCUS 项目建设和运行的环境风险评价
《环境影响评价技术导则 生态影响》（HJ 19—2011）	该导则适用于 CCUS 项目建设和运行的生态影响评价
《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ 2.2—2018）	该导则不完全适用于 CCUS 运输和封存，CO_2 不属于其中规定的污染物
《环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）》（HJ 964—2018）	该导则适用于 CCUS 项目建设和运行的土壤环境影响评价
《环境影响评价技术导则 地下水环境》（HJ 610—2016）	该导则适用于 CCUS 项目建设和运行的地下水环境影响评价
《环境影响评价技术导则 石油化工建设项目》（HJ/T 89—2003）	该导则适用于石油化工企业 CO_2 捕集工艺设备建设和运行环评
《环境影响评价技术导则 陆地石油天然气开发建设项目》（HJ/T 349—2007）	该导则适用于 CO_2-EOR 等项目的建设和运行环评（新版导则将于近期发布）

交易市场开始运行。虽然目前只覆盖了电力部门，但未来必然会扩展到其他工业部门。对此，全国碳排放标准化技术委员会、全国能源基础与管理标准化委员会、全国环境管理标准化技术委员会联合发起并成立了 CCUS 标准化工作组，开始对 CCUS 这一新型行业开发相关标准。CCUS 减排量的精准确定是其效果评估、参与碳交易市场的关键。当前尚无成熟的基于项目的 CCUS 减排方法学用于“核证自愿减排交易市场”，也无基于行业减排措施的核算方法用于“强制碳交易市场”。此外，CCUS 减排量以何种方式进入碳市场尚未明确。

2 对 CCUS 环境管理的思考与建议

2.1 CCUS 项目的整体监管要求建议

全面系统、完善的国家法律监管框架对 CCUS 的发展和部署至关重要。需要进一步制定明晰、完善的 CCUS 法律法规，减少利益相关方的各种顾虑，确保 CCUS 项目稳健开展。根据发达国家的经验，我国对 CCUS 的监管应该包含封存选址许可、CO_2 运输管道许可，以及环境影响评价和环境监测的最低标准规定，明确环境影响和风险评价结果在 CCUS 工程许可的申请、核准、修改中的地位和作用 [23]。在捕集环节，应要求大型煤电基地和新规划电厂在可行性研究报告中涵盖碳捕集评估的内容。在运输环节，明确 CO_2 纯度、性质和管道材料、运输路线的要求。在封存环节，明确封存地分级选址、地下空间利用、注入井完整性，以及监测报告和风险应急处置的要求。解决 CCUS 项目的责任归属和期限问题，形成权责清晰的法律法规框架。尽快出台 CCUS 项目的环境管理办法。通过试行修改完善，形成 CCUS 建设项目生态环境管理条例。

2.2 CCUS 项目全过程环境管理的联动

CCUS 项目涉及多个行业不同环节，虽然将 CCUS 作为独立行业在现阶段实施起来困难巨大，但是可以在环境管理，特别是环评分类上作为一个突破点，将当前 CCUS 项目形成自上而下、自捕集到封存的完备的环境管理制度（表 3）。CCUS 每一个环节涉及《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》多个行业类别，环评要求各不相同。将 CCUS 项目作为整体，可以更好地判断该项目或集群的环境可行性 [24]。在战略环评、规划环评、项目环评到排

表 3　CCUS 整体环境管理路线

环境管理阶段	CO_2 捕集	CO_2 运输	CO_2 地质利用与封存
战略选择（战略环评）	CO_2 减排的可行替代方案（考虑 CCUS、新能源发展和能源效率） 2020—2060 年不同阶段的发展规模以及 2060 年后的运维		
CCUS 产业规划方案（规划环评）	未来情景分析： 1. 未来电力需求 2. 产业发展可行性区域 3. 我国技术成熟度 4. 减排技术发展 5. 捕集工业行业来源和区域位置规划	1. 今后运输方式情景分析（管道、船运、火车和汽车） 2. 运输技术发展和能耗，管材材料的发展 3. CO_2 可能运输路线	1. CO_2 利用和封存方式的选择（陆地、海底） 2. 和其他工业、土地、交通、水利、自然资源开发等规划的相容性 3.“三线一单”相容性
项目方案（建设项目环评）	1. CO_2 捕集技术 2. CO_2 分离技术 3. 工艺流程设计 4. 清洁生产设计 5. 环境污染防治措施 6. 环境监测方案	1. 具体运输路线和生态环境特点管道建设技术 2. 泄漏弥补措施 3. 管道参数（直径、材料、厚度、深度） 4. 与其他设施的兼容 5. 压缩机设计参数 6. 环境风险评估 7. 环境监测方案	1. 准确的地质封存位置 2. 环境敏感目标的位置 3. 封存地点的水文、地质参数 4. CO_2 注入技术 5. 注入井和监测井数量 6. 环境风险预案和管理 7. 环境污染和生态损害防治措施 8. 环境监测方案
运行方案（排污许可证制度）	1. CO_2 捕集速率和效率 2. 污染物排放速率和排放量监测 3. 装置负荷 4. 水耗和能耗监测 5. CO_2 产品浓度、压力和产量监测	1. CO_2 物相选择（气相、液相或超临界态） 2. 气体组成 3. 运输时间 4. CO_2 无组织排放监测与核查报告	1. CO_2 注入速率 2. CO_2 注入压力 3. 封存底层压力 4. CO_2 无组织排放监测与核查报告
封存完成（环境影响跟踪评价和项目后评价）	定期、持续的 CO_2 封存后生态环境监测和风险管理		

污许可的发放和环境影响跟踪评价、项目后评价全链条形成从宏观到细节的差异化管理。尽快出台适合CCUS 建设项目的环境影响评价技术导则、指南和排污许可证申请与核发技术规范等文件规范 CCUS 的环境管理，明确环评分类分级审批的机制，评价范围、评价标准以及环境监测和风险管理的要求。

2.3 完善 CCUS 环境监测标准与规范

关于 CO_2 储存的主要担忧是集中的高浓度 CO_2 的泄漏风险以及可能对环境造成的损害。地质储存的关键是将 CO_2 保存极长一段时间（达到 10^3 年），而不会有任何明显的地表逸散。国外一般要求 CO_2 地质封存的安全期不低于 200 年，模型显示，每年逸散率超过 0.1% 将使 CCUS 控制全球变暖的能力失效 [25]。各文献中报告的年泄漏率范围从 0.000 01% 到 1% 不等 [26]，取决于封存地的地质构造及断层或塌陷的渗透性。现有的 CO_2 监测技术可分为如下几类：微地震监测、地电学方法、重力测量法、遥感、地球化学采样、大气浓度监测、示踪剂示踪、土壤呼吸监测和微生物指示等 [25]。每一类都有其适用的环境条件和范围，需要对监测技术在 CCUS 各环节的可靠性、适用性和敏感性以及监测参数和位置进行测试和评估。并且，CO_2 不同于其他污染物，其浓度基线会根据当地生态、温度和季节等存在较大波动，考验监测标准的科学性。

CCUS 的监测策略应该包括预注入、注入期间和注入后阶段。对于预注入阶段，应该明确大气 CO_2 基线浓度和土壤通量本底值的监测方法。对于 CO_2 注入阶段，建议对 CO_2 运输管道以及注入设备梳理完整的 CO_2 排放和泄漏清单，识别 CO_2 有组织和无组织排放源，针对设备和管道组件、贮存设施和装卸过程等不同 CO_2 排放源筛选匹配的监测方法，形成“二氧化碳地面工程监测技术规范和标准”。对于 CO_2 注入后埋存阶段，需要重点攻关 CO_2 运移状态、范围和储存体积量的监测，包括井下（地质）、浅层（土壤）以及空中大气三类监测技术。形成“二氧化碳埋存井下羽流监测技术标准”“二氧化碳埋存地表 / 浅层浓度监测技术标准”和“二氧化碳埋存大气浓度监测技术标准”。关于管道和注入井，还需要监测管道和井身的完整性和腐蚀程度，保证其在规定的时间内满足材料质量和性能。此外，应密切监测注入的 CO_2 对周围生态环境和人群健康的环境影响。未来 CCUS 项目的应用必须配有综合的监测制度，包括对空气、地下水、土壤化学和肥力特性等生态环境和地质物理、化学的监测等，建立长期、实时和智能化的 CO_2 监测报告体系平台，系统科学的环境监测是 CCUS 项目能否成功实施和在国际碳交易中把握话语权的重要保证。

2.4 确定 CCUS 减排量与碳交易市场路径

当前制约 CCUS 大规模商业化推广的重要因素是其运行成本过高，降低其成本的关键一方面来自技术发展，另一方面是发展国际认可的减排量计算方法，通过碳价和投融资机制降低其成本 [27]。因此，需要制定一整套“CCUS 二氧化碳监测、报告和核查管理办法”。通过开展捕集、储运、利用和封存各环节源项归类解析研究，针对储罐、装卸过程、封存场以及设备、管道组件和应急排放口等各源项不同情景，研究确定不同情景模式下的 CO_2 排放因子，确定各源项活动水平依据，建立基于行业减排措施的 CCUS 全流程 CO_2 减排量核算方法。通过对项目边界、基准线情景识别和额外性论证、基准线排放、项目排放、泄漏、减排量计算等基准线方法以及监测方法研究，建立基于核证自愿减排量（CCER）项目的 CCUS 全流程 CO_2 减排方法学。此外，碳市场纳入 CCUS 减排量是未来发展趋势，需要超前布局 CCUS 参与方的减排量边界、效益分配机制以及碳交易市场路径研究。以此明确捕集、储运、利用、封存各环节减排量计算边界及权利归属，促进权责清晰的 CCUS 效益管理机制的建立，为 CCUS 减排量核证中各参与方的权利归属及未来纳入碳市场交易奠定坚实基础 [28]。

2.5 CO_2 封存和运输管道泄漏源强和风险定量评价模型

大多数可能的泄漏情景和后果评估缺乏经验基础和长期的实验数据，严重依赖专家判断。尽管目前的方法和技术存在很大的不确定性，为了评估封存泄漏情景发生的可能性及产生后果的严重性，仍然需要对环境单元之间的 CO_2 通量进行建模和估算，并利用计算的通量和源强来定量化评估 CCUS 封存对各种生物和生态系统的潜在影响和事故风险结果，形成完备的风险识别—风险分析—风险评价流程。

另外，目前缺少不同状态 CO_2（如密相 CO_2 和超临界 CO_2，阈值为 31℃和 7.38 MPa）在高压管道运输中泄漏和扩散模型的研究，也导致了 CCUS 项目环境风险评价的准确性无法保证。在高压条件下，每条管道输送的 CO_2 量为几百万吨，管道破裂释放的 CO_2 流量是要明显高于井口泄漏和封存逸散的情景。这种局部高流速更可能对人类和动植物产生急性严重影响。建议进一步制定和完善评估（高压）CO_2 管道环境风

险的指导方针。包括故障类型的定义、应做出的补救方法、统一的暴露阈值和剂量—反应模型，以及最终的 CO_2 管道的安全防护距离。

在以上对运输和封存风险进行定量化评价的基础上，完善《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南》，建立对应的响应机制、监测计划、工作程序和风险应急措施，从源头上把控风险。

2.6 CCUS 与减污降碳协同

在 2030 年实现碳达峰目标之前，需要坚持以美丽中国建设目标和碳达峰目标为双牵引实现污染控制与碳减排的协同 [29]。环境污染物与 CO_2 排放的高度同源性是实现减污降碳协同增效的理论基础。两者在管控思路、管理手段、任务措施等方面高度一致，可统筹谋划、一体推进、协同实施，实现降本增效 [30]。

从捕集过程的捕获效率来看（图 2）：发电厂的燃烧后和燃烧前系统可以捕获产生的 85%～95% 二氧化碳。如果追求更高的捕获效率，需要更大、更耗费能源的分离装置，从而需要 10%～40% 的额外能量。这部分能量相关的 CO_2 排放使得最终捕获 CO_2 效率降低到 80%～90%[31]。富氧燃烧系统原则上能够捕获几乎所有产生的 CO_2，然而需要额外的气体处理系统来去除诸如硫和氮氧化物等污染物，从而将捕获的 CO_2 效率降低到 90%，因此需要进行污染物排放和 CO_2 收集的权衡。

从捕集的最终纯度来看：净化得到的 CO_2 和杂质组分浓度取决于燃料性质、捕集分离和净化工艺（图 2）。对于所有技术，杂质浓度均可以较高捕获成本来降低。此外，醇胺吸收液可同时吸收 SO_2、NO_x 和颗粒物，使其排放量分别减少 40%、0.8% 和 40%[32]，但同时也会排放氨气，产生含胺与重金属的废液。电厂 CO_2 提纯系统也会改变 SO_2、NO_x 和颗粒物等重要大气污染物的排放量，从而改变电厂的环境绩效。对于天然气净化厂捕集的 CO_2 可以残留一定量的轻烃组分，其同样可以用于 EOR 项目。但也不排除部分燃煤电厂为降低成本，将过多的 H_2S、SO_2、NO_x 等污染物和 CO_2 同时注入封存层，导致更大的土壤和地下水的生态环境影响和风险。

根据过去生命周期评价结果，采用 CCUS 的燃煤电厂、煤气化联合循环发电厂和天然气联合循环电厂其富营养化和酸化趋势比没有 CCUS 的电厂更高。燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧捕集等工艺对环境影响的大小也不尽相同 [33]。所以需要进一步出台文件规定不同捕集工艺排放和封存气体中 CO_2 和其他组分气体的浓度和总量要求，并对 CCUS 项目进行整个生命周期的环境影响分析。国家近期已启动碳排放评价纳入建设项目环境影响评价试点，对于 CCUS 项目，应将碳评价纳入其环境影响评价内容，并分析其整个生命周期的污染物和碳排放（减排），以实现温室气体减排和防治环境污染的双赢目标。

3 总结

本文通过梳理目前 CCUS 在我国的发展现状和环境管理中主要的环境影响评价导则、指南和环境监测标准规范现状，分析了前期 CCUS 示范项目中暴露的环境管理盲点和弱区。目前我国还未在法律法规上对 CCUS 项目的环境保护提出要求，部分生态环境管理

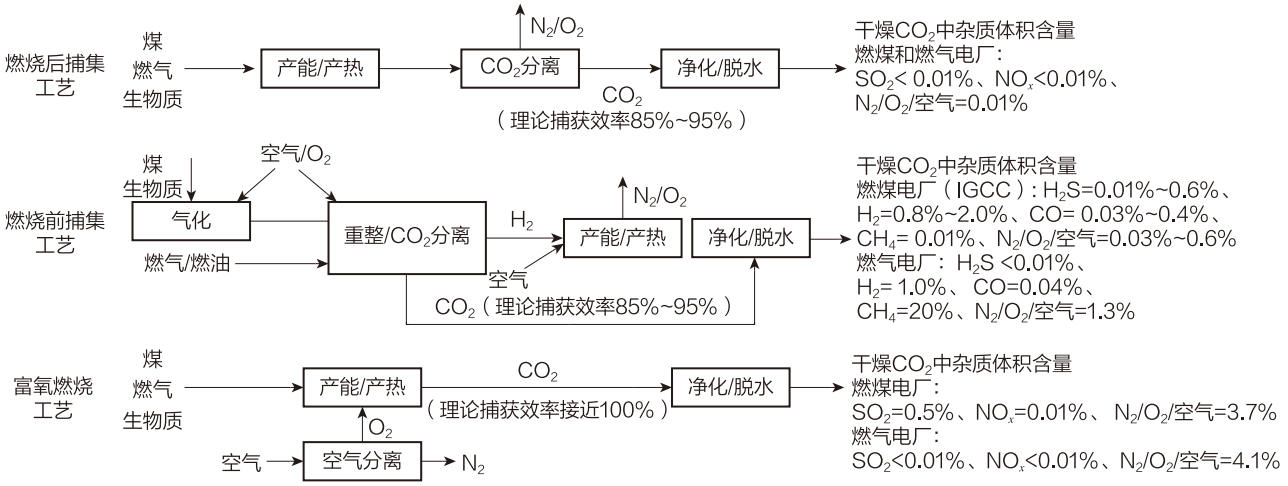

图 2　三种主要 CO_2 捕集工艺的流程、效率和收集纯度

注：为节约捕集成本，富氧燃烧中的 SO_2 和燃烧前捕集中的 H_2S 是人为留存在 CO_2 中。图中杂质体积由含硫量 0.86% 燃煤获得，其排放污染物含量与燃煤中含硫量直接相关

技术规范需要进行修改和完善，存在 CO_2 与传统污染物的定位以及在环境监测基线确定和标准方法欠缺的问题，制约了 CCUS 商业化发展和进入碳市场的可操作性。本文对 CCUS 环境管理提出了完善建议：一是将 CCUS 作为独立行业管理，形成全过程的环境管理制度的联动；二是完善 CCUS 项目的监测方法标准，保证 MRV 制度的贯彻、形成碳市场的准入规范；三是构建 CO_2 运输、封存过程中的源强核算与剂量—效应定量模型，增强环境风险评价的科学性；四是探索 CCUS 项目的减污降碳协同治理思路和方法。

参考文献

[1] 李晋 , 谢璨阳 , 蔡闻佳 , 等 . 碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(1): 48-53.

[2] 张贤 , 郭偲悦 , 孔慧 , 等 . 碳中和愿景的科技需求与技术路径 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 65-70.

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change. 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]. Geneva: IPCC, 2018.

[4] Global CCS Institute. The Global Status of CCS: 2021[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2021.

[5] 李晋 , 蔡闻佳 , 王灿 , 等 . 碳中和愿景下中国电力部门的生物质能源技术部署战略研究 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 59-64.

[6] 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]. 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.

[7] 中华人民共和国中央人民政府 . 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13)[2022-01-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm?pc.

[8] 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.

[9] 蔡博峰 , 庞凌云 , 曹丽斌 , 等 .《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南 (试行) 》实施 2 年 (2016-2018 年) 评估 [J]. 环境工程 , 2019, 37(2): 1-7.

[10] Federal Register of Legislation. Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act 2006[EB/OL]. (2008-11-22)[2022-01-12]. https://www.legislation.gov.au/Details/C2013C00302.

[11] European Parliament and Council. 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[Z]. Official Journal of the European Union, 2009, L140: 114-135.

[12] Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency. Carbon capture and storage: Legal and regulatory review - edition 5[R]. Paris: IEA, 2016.

[13] Department for Energy and Climate Change. The Storage of Carbon Dioxide (Licensing etc.) Regulations 2010[EB/OL]. (2010-10-01)[2022-01-12]. https://www.legislation.gov.uk/uksi/2010/2221/pdfs/uksi_20102221_en.pdf.

[14] CAI B F, LI Q Z, LIU G C, et al. Environmental concern-based site screening of carbon dioxide geological storage in China[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 7598.

[15] LIU L C, LI Q, ZHANG J T, et al. Toward a framework of environmental risk management for CO_2 geological storage in China: gaps and suggestions for future regulations[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2016, 21(2): 191-207.

[16] Japan's legal and regulatory framework for CCS[EB/OL]. (2016-04-16)[2022-01-12]. https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/japans-legal-and-regulatory-framework-for-ccs/.

[17] United States Environmental Protection Agency. Federal requirements under the underground injection control (UIC) program for carbon dioxide (CO_2) geologic sequestration (GS) wells final rule[EB/OL]. [2022-01-20]. https://www.epa.gov/uic/federal-requirements-under-underground-injection-control-uic-program-carbon-dioxide-co2-geologic.

[18] 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.

[19] 周颖 , 蔡博峰 , 曹丽斌 , 等 . 中国碳封存项目的环境应急管理研究 [J]. 环境工程 , 2018, 36(2): 1-5.

[20] 李琦 , 蔡博峰 , 陈帆 , 等 . 二氧化碳地质封存的环境风险评价方法研究综述 [J]. 环境工程 , 2019, 37(2): 13-21.

[21] 马劲风 , 杨杨 , 蔡博峰 , 等 . 不同类型二氧化碳地质封存项目的环境监测问题与监测范围 [J]. 环境工程 , 2018, 36(2): 10-14.

[22] MA J F, WANG X Z, GAO R M, et al. Monitoring the safety of CO_2 sequestration in Jingbian Field, China[J]. Energy procedia, 2013, 37: 3469-3478.

[23] 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.

[24] 郭扬 , 吕一铮 , 严坤 , 等 . 中国工业园区低碳发展路径研究 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 49-58.

[25] AMINU M D, NABAVI S A, ROCHELLE C A, et al. A review of developments in carbon dioxide storage[J]. Applied energy, 2017, 208: 1389-1419.

[26] LEUNG D Y C, CARAMANNA G, MAROTO-VALER M M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 39: 426-443.

[27] 宋欣珂 , 张九天 , 王灿 . 碳捕集、利用与封存技术商业模式分析 [J]. 中国环境管理 , 2022, 14(1): 38-47.

[28] 张跃军 , 刘景月 . 我国碳交易制度巩固脱贫攻坚成果的问题及对策 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 35-39.

[29] 董战峰 , 周佳 , 毕粉粉 , 等 . 应对气候变化与生态环境保护协同

政策研究 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 25-34.
[30] 王灿 . 碳中和愿景下的低碳转型之路 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(1): 13-15.
[31] METZ B, DAVIDSON O, DE CONINCK H, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
[32] 刘冬梅 , 陈颖 , 李瑶 . 中国碳捕集、利用与封存项目环境影响评价技术建议 [J]. 环境污染与防治 , 2014, 36(4): 106-109.
[33] CUÉLLAR-FRANCA R M, AZAPAGIC A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts[J]. Journal of CO_2 utilization, 2015, 9: 82-102.

Environmental Management of Carbon Dioxide Capture, Geological Utilization and Storage Projects

SONG Yang[1,2,3], HE Shaolin[1,2,3*], XUE Hua[1], QI Zhibin[1], GE Yanbing[1], LIU Bo[1,2,3], YU Jiqing[1,2,3]
(1. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China; 2. The Ecology and Environment Branch of Center for Research and Development of Oil Shale Exploitation, Beijing 100083, China; 3. CNPC Environmental Engineering Assessment Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Carbon dioxide capture, geological utilization and storage (CCUS) is an indispensable key technological tool to mitigate climate change for energy-intensive industries and hard-to-abate sectors. However, it also brings corresponding ecological and environmental problems and may last for long. At present, the environmental law and regulations, ecological and environmental management guidelines, CO_2 monitoring standards, environmental risk control, accounting method and CO_2 transaction approaches for CCUS projects are still relatively lagging behind in China. This paper elaborated the development status and trend of CCUS at home and abroad, as well as pointed out current deficiencies of environmental management of CCUS in China. It was suggested the scientific regulations including connections of environmental management in the whole process of CCUS project, CO_2 monitoring and measurement standards, quantitative risk assessment models based on sequestered CO_2 migration and pipeline leakage scenarios, synergy in pollution reduction and carbon reduction, emission reduction accounting methodology, and carbon trading approaches should be introduced as soon as possible, so as to further optimize and standardize the environmental management process of China's CCUS industry, and maximize the eco-environmental and socioeconomic values of CCUS projects.
Keywords: CCUS; CO_2 storage; environmental management; problems and suggestions