碳捕集利用与封存技术全流程标准体系构建研究

魏一鸣[1,2,3,*]，王蓬涛[2,6,*]，康佳宁[1,2,3]，刘兰翠[4]，
李　琦[5]，田晓曦[1,2,3]，高文桐[6]

1. 北京理工大学 碳中和系统工程北京实验室，北京 100081；
2. 北京理工大学 能源与环境政策研究中心，北京 100081；
3. 北京理工大学 碳中和系统与工程管理国际合作联合实验室（教育部），北京 100081；
4. 北京师范大学 国家安全与应急管理学院，北京 100875；
5. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室，武汉 430071；
6. 华北理工大学 矿业工程学院，唐山 063210

扫码阅读

摘　　要： 碳捕集利用与封存（Carbon Capture，Utilization，and Storage，CCUS）技术是实现碳达峰碳中和目标的关键支撑。当前，中国CCUS技术发展迅速，但标准体系尚不健全，仍处于碎片化状态，且标准不统一、整体滞后，亟须构建统一完善的CCUS技术标准体系。为此，本文系统分析了CCUS技术全流程标准需求，基于捕集、运输、利用与封存的主要环节，结合碳核算的早期工作与低碳技术耦合的未来发展方向，初步设计了包含基础共性与关键环节两大维度的标准体系。其中，基础共性涵盖基础通用，全生命周期管理及量化、核查、监测；关键环节包含碳核算、碳捕集、碳运输、碳利用、碳封存、其他低碳技术耦合、系统和交叉问题。此外，本文从近期、中期、远期分阶段提出路径完善与措施建议，以加快CCUS技术全流程标准体系的建设，促进CCUS产业规模化发展。

关 键 词： CCUS技术；碳达峰碳中和；标准体系；碳捕集；碳利用；碳封存

中图分类号： X701　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 2097-4981(2026)04-0477-12

DOI：10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2026-0030

0 引言

为应对全球气候变化，中国积极投身碳减排工作，并于2020年正式提出碳达峰碳中和（“双碳”）目标，彰显了中国在全球气候治理中的坚定态度。联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出，实现《巴黎协定》温升目标仅靠能源转型与能效提升存在缺口，必须依赖碳捕集利用与封存（Carbon Capture，Utilization，and Storage，CCUS）等关键技术[1]。在未来的全球气候治理中，CCUS将发挥国际气候合作的关键纽带作用[2]。中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋，决定了化石能源在中长期内仍将承担能源安全保障职能[3-5]，而工业碳排放难以通过电气化被替代[6-8]。CCUS作为可实现化石能源大规模低碳利用的关键路径，既能助力钢铁[9]、水泥[10]、化工[11]等高排放行业减排，又能结合燃煤发电平衡新能源波动性[12]，是实现中国“双碳”目标、能源安全及可持续发展的核心技术[13-15]。现有研究显示，中国若要实现碳中和，则需通过CCUS技术实现11亿吨以上的碳减排量[16]，这表明CCUS成为中国实现深度脱碳的可行路径[17]。

当前，中国高度重视CCUS技术发展，已将该技

收稿日期： 2026-05-07；**接受日期：** 2026-06-15

基金项目： 国家自然科学基金基础科学中心项目（72488101）

通讯作者： 魏一鸣（1968—），男，博士，教授，主要研究方向为能源环境系统工程和气候工程管理。E-mail: wei@bit.edu.cn；
王蓬涛（1988—），男，博士，副教授，主要研究方向为清洁能源与碳移除技术。E-mail: wangpt@ncst.edu.cn

引用格式： 魏一鸣, 王蓬涛, 康佳宁, 等. 碳捕集利用与封存技术全流程标准体系构建研究[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(4): 477−488.
WEI Y M, WANG P T, KANG J N, et al. Research on the Construction of a Full-Chain Standard System for Carbon Capture, Utilization, and Storage Technology[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(4): 477−488.

术纳入国家能源战略与科技创新重点领域，并借助相关政策文件明确提出加快CCUS技术研发示范及全流程技术标准体系建设。目前，中国已投运和建设中的CCUS示范项目超50个，形成全流程推进的发展格局[18-19]。例如，国家能源集团泰州电厂的亚洲最大50万吨/年煤电CCUS工程，计划建设0.5 Mt燃煤电厂碳捕集装置，并已于2023年建成投产；中国石油天然气集团有限公司新疆CCUS产业促进中心作为全球首批5个产业促进中心入选“CCUS撬动者计划”，1.0 Mt碳捕集一体化示范项目正在加速建设，并将于2026年11月建成投运。然而，随着CCUS产业从试点示范向规模化应用过渡，技术环节本身的复杂性以及跨行业协同的多样性等要求，使得现有较为分散的标准难以满足全流程管控需求。在上述典型工程实践中，源端捕集设施与汇端利用或封存地空间距离大，跨行业统筹运输标准的缺失导致长距离管网输送的交接责任难以被准确界定；同时，由于当前国家层面在长期地质监测与碳核查方面缺乏统一的基准规范，新疆等地正加速推进的大型CO_2提高原油采收率（CO_2-Enhanced Oil Recovery，CO_2-EOR）示范项目在规模化运营后，将面临实际碳减排效益难以被精准量化、碳资产国际互认受限等潜在风险。

作为新兴技术，CCUS具有较长的技术链条，并且项目风险和经济成本较高，因此构建一套系统科学的标准体系意义重大[20]。对于中国CCUS发展而言，标准化工作不仅能够统一CCUS技术全流程规范，统一各环节的技术接口，以确保安全底线，降低项目开发的不确定性与投资风险，还能够推动项目快速落地，从而推进CCUS技术的大规模商业化，成功实现规模效应。此外，健全的标准体系是政府进行行业监管以及制定激励政策的重要依据。因此，系统分析并加快推进CCUS标准体系建设，是引导中国CCUS技术从示范走向商业化、产业化应用的必然要求和紧迫任务。

1 CCUS 标准化需求分析

与风电、光伏等常规低碳技术相比，CCUS标准体系建设具有高度的特殊性。第一，CCUS将高碳排放源与地质封存深度关联[21]，需要多环节、多行业深度耦合，使得项目更复杂。第二，封存环节高度依赖非均质的地质条件，必须制定专属的地质选址与圈闭评估准则。第三，项目的长期风险管理跨度大[22]，深部地质封存要求实现CO_2长期性安全隔离，其标准体系建设必须涵盖长期泄漏预警等内容。

当前，国际、国家、行业及团体等层面已围绕CCUS技术全链条出台部分标准（附表1～附表7[①]）。国际层面以国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）碳捕集利用与封存技术委员会制定的一系列标准为核心，聚焦捕集、运输、封存、跨领域、驱油、船舶运输、矿化封存等7个关键议题，推进全球碳捕集与封存/CCUS标准化工作布局；国家层面现行标准多为与CO_2相关的单一标准，计划在研标准则围绕CCUS项目全流程开展，在跨行业衔接、新型技术规范等方面仍存在一定空白；行业标准则聚焦石油、化工等领域，虽具备行业针对性，但尚未覆盖CCUS全行业、全链条；团体标准内容涵盖CCUS各环节的设计、建设、运营、管理、量化、监测和验证等方面，但范围较窄，有待提升为更具普适性和统筹性的国家标准。

当前，ISO国际标准已形成贯穿全生命周期的系统化框架，中国CCUS领域虽已出台部分基础标准，但从全流程看仍存在一定不足，导致不同企业以及项目前期多环节兼容性较差，项目落地后的运行以及监管缺乏合理依据[23]。因此，系统化构建CCUS技术全流程标准体系，能够为中国CCUS的规范化发展提供支撑，保障项目的环境安全性与经济可行性，也将助力中国在全球CCUS标准制定中抢占话语权。

1.1 CCUS 产业实施的标准需求

目前，CCUS标准体系架构尚不完善。CCUS多环节、多行业的特征显著，技术涉及捕集、运输、利用与封存等多个环节，覆盖电力、钢铁、水泥、化工和有色金属等多个重点行业。由于各环节在工艺流程以及技术实施上存在差异，且不同行业自身已有相对完善的标准规范，现有CCUS标准体系极其

① 因篇幅所限，相关内容详见本刊网站登载的扩展资料中的附录。

分散，缺乏系统性和协调性。这种标准架构的缺失使得CCUS产业项目全流程顺利实施面临挑战，并直接影响产业集群化发展和规模效益形成。

1.2 CCUS技术革新的标准需求

CCUS标准体系的缺失导致关键技术研发与商业化发展受到限制。CCUS技术的发展是推动其成本持续下降的重要因素之一。然而，当前针对关键环节的技术标准仍缺失。在捕集环节，燃烧后捕集、富氧燃烧等技术虽已初步具备示范条件，但仍缺乏公认的能耗、效率及稳定性评价方法，阻碍了CCUS技术进一步商业化推广。在运输、利用与封存环节，关于设备性能、工艺流程及安全控制的标准尚不完善，技术成果评估缺乏统一尺度，CCUS技术难以获得市场广泛认可。针对处于不同发展阶段的技术，标准需求也具有差异性。相对成熟的技术需尽快制定技术后期落地的标准规范，以为CCUS技术大规模应用提供技术依据；而对于新型的前沿技术，则需前瞻性地制定引导性标准，以为CCUS技术的研发和中试验证提供方向指引。

1.3 CCUS工程建设的标准需求

CCUS产业链条长，涵盖捕集、运输、利用与封存多个环节。当前，由于缺乏涵盖多环节的相关标准，项目整体协同难度极大。在项目实施过程中，不同行业在数据接口规范、管网交接气体质量和安全要求等方面存在显著差异，项目上下游的顺利衔接面临较大困难。随着碳捕集技术应用场景的拓展和管网设施的延伸，亟须建立工程建设环节的统一规范。

1.4 CCUS量化核查的标准需求

CCUS管理及量化标准较为缺乏，政策对项目的推动作用难以发挥。当前，CCUS项目运营管理类标准缺失，特别是针对项目碳排放量化和核查的规范并不完善，CCUS项目边界较为模糊，无法准确、科学地量化其环境效益。此类标准的缺位，使得相关的支持政策缺乏规范指引，CCUS项目与市场主体、政府监管部门之间的关系界定存在诸多难题。

1.5 CCUS环境监管的标准需求

随着CCUS项目中碳封存环节的逐步推进，项目长期安全和环境风险成为监管核心。当前，针对CCUS碳封存环节的后期项目监管以及项目风险识别等相关标准缺失，涉及捕集、运输及海底或地下封存过程中的泄漏风险评价规范也尚未全面建立。项目运行环境以及风险相关标准的缺失，不仅会增加项目全流程的隐患，而且会使规模较大的封存项目难以得到有效的风险管控与合理的监管。

2 CCUS标准体系设计

2.1 总体框架

在遵循科学性、全面性以及应用性的原则下，本文通过系统工程的方法，综合考虑涵盖捕集、运输、利用和封存全技术环节以及项目实施的早期评估和后期运行，收集国内外现行以及在研的相关标准，系统分析并设计CCUS标准体系。CCUS标准体系框架如图1所示，主要包括基础共性和关键环节两部分。CCUS基础共性标准包括基础通用标准，全生命周期管理标准以及量化、核查、监测标准，是CCUS关键环节标准的重要支撑。CCUS关键环节标准是实现CCUS各环节落地及应用服务的要求标准，涉及碳核算、碳捕集、碳运输、碳利用、碳封存、其他低碳技术耦合、系统和交叉问题等。该框架清晰地呈现了CCUS全流程各部分的标准需求。

基于CCUS标准体系框架，本文整理分析得出CCUS标准体系结构（图2），其具体包括基础共性和关键环节两部分，呈现了CCUS全流程标准体系的基本组成单元。

2.2 基础共性标准

CCUS基础共性标准子体系如图3所示。CCUS基础共性标准贯穿CCUS全流程标准体系，包括基础通用标准，全生命周期管理标准以及量化、核查、监测标准3部分，主要用于统一CCUS技术及项目中的相关概念，解决CCUS全流程中共性的关键问题。

2.2.1 CCUS基础通用标准

CCUS基础通用标准子体系包括术语定义、规划

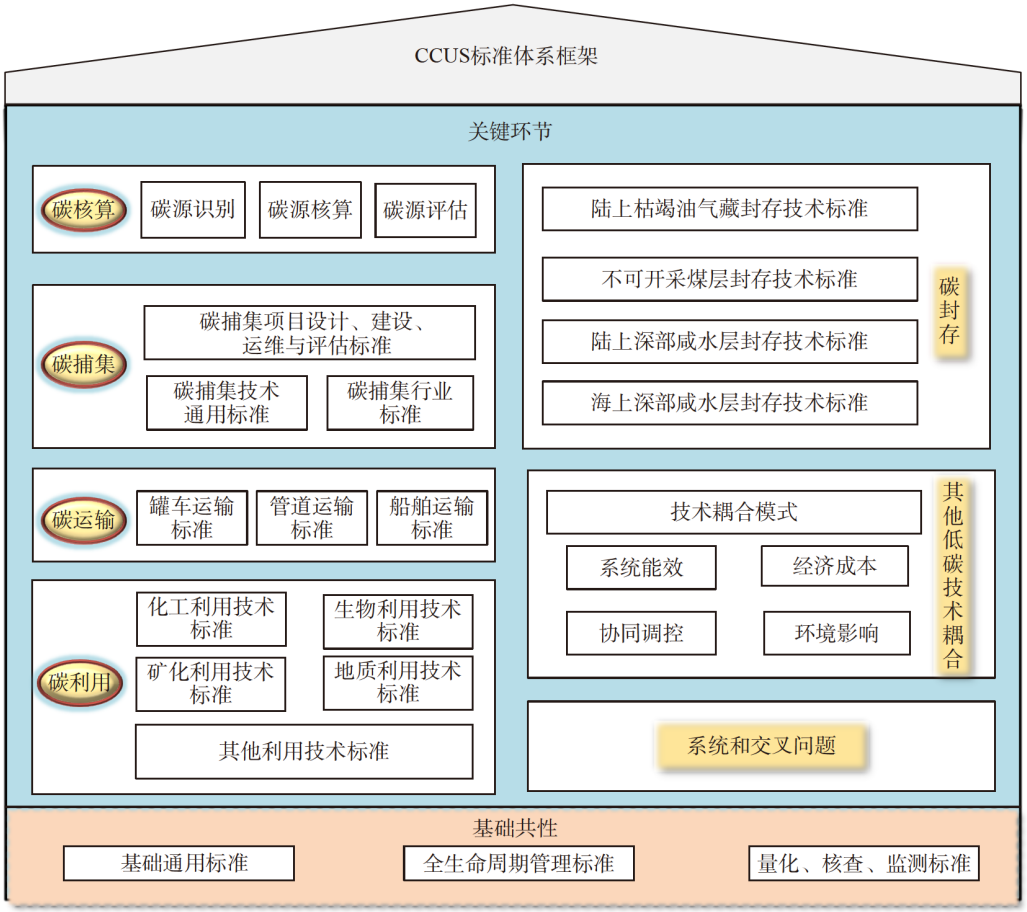


图 1　CCUS 标准体系框架

Fig.1　Framework of the CCUS standard system

模型、通用要求3部分。以上内容在CCUS项目全流程中发挥着重要的基础作用。该部分通过统一核心术语、构建规划模型和提出通用要求，为不同领域的参与主体提供统一便捷的项目语言与顶层设计范式。该子体系的设立直接回应了复杂项目的边界界定与基本准入门槛问题，是各项专有技术与管理标准得以有效衔接的关键。

（1）术语定义标准用于统一CCUS技术、项目相关概念及相应缩略语，帮助理解CCUS技术及项目具体应用场景、相关概念等。该部分包括与捕集、运输、利用、封存环节相关的通用术语定义，与CO_2相关的通用术语定义，与CCUS技术中监测和测量性能相关的通用术语定义，与风险管理相关的通用术语定义，与利益相关方有关的通用术语定义等，为CCUS体系中其他标准的制定提供支撑。

（2）规划模型标准用于构建CCUS领域的数学模型框架。面对CCUS产业环节多且项目整体运行复杂的现状，该模块旨在提供系统性设计范式，以帮助CCUS项目中的各方认识和理解CCUS标准化的对象和边界、CCUS全流程体系结构以及各环节之间的关系等。

（3）通用要求标准旨在规范CCUS全流程中各环节需要满足的基本要求，包括功能要求、性能要求、安全要求、测评要求以及应用要求等。该部分针对CCUS项目运行中存在的基础性、通用性问题，能够为CCUS规模化、统一化提供重要保障。

2.2.2　CCUS 全生命周期管理标准

CCUS全生命周期管理标准子体系主要包括阶段划分与协同管理、全生命周期信息管理、跨环节技术与通用管理要求、全生命周期风险识别与管理4部分。CCUS项目涉及的环节和行业较多，产生跨环节的合作问题及多行业的协同问题是不可避免的。该

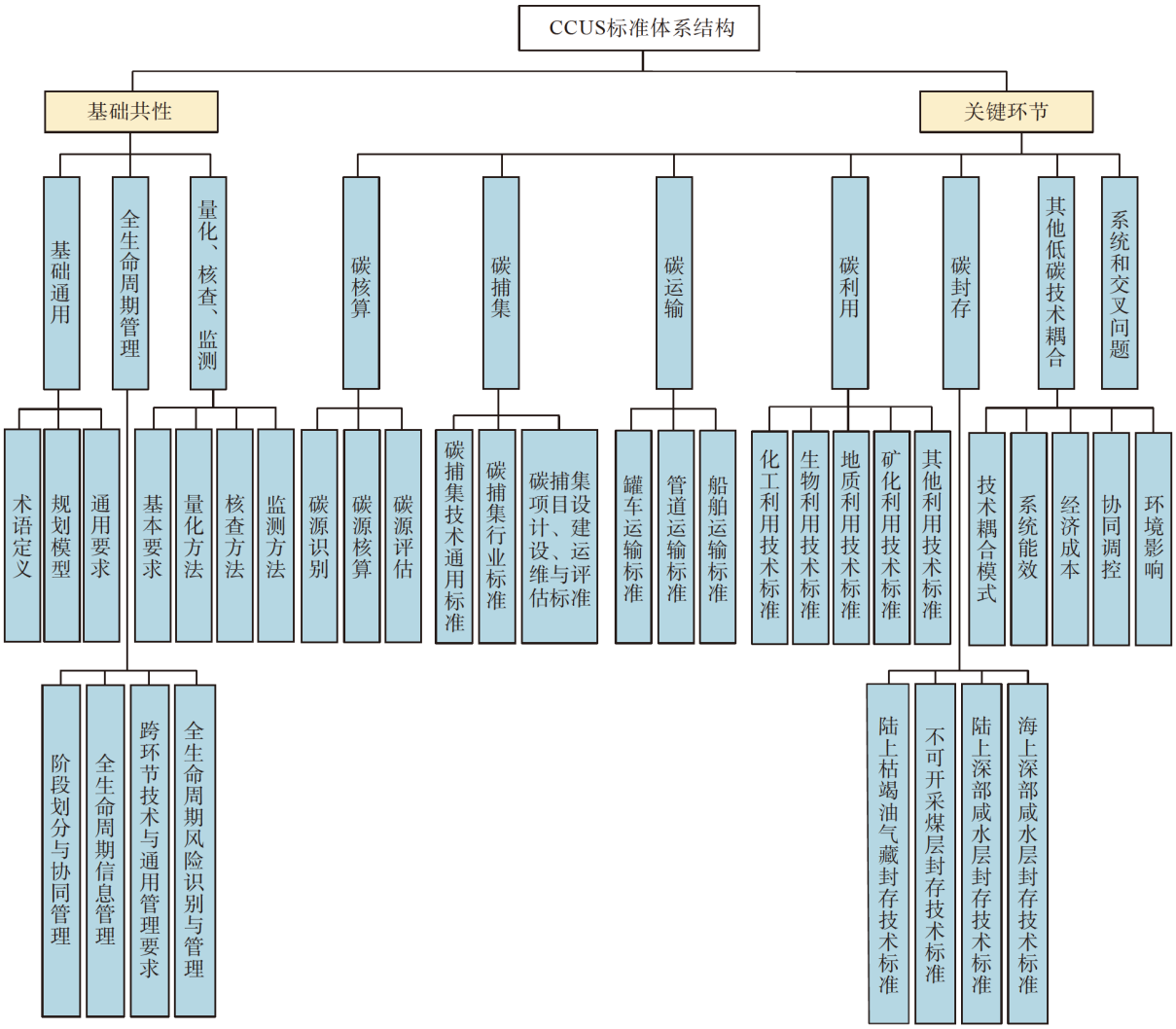


图 2 CCUS 标准体系结构

Fig.2 CCUS standard system architecture

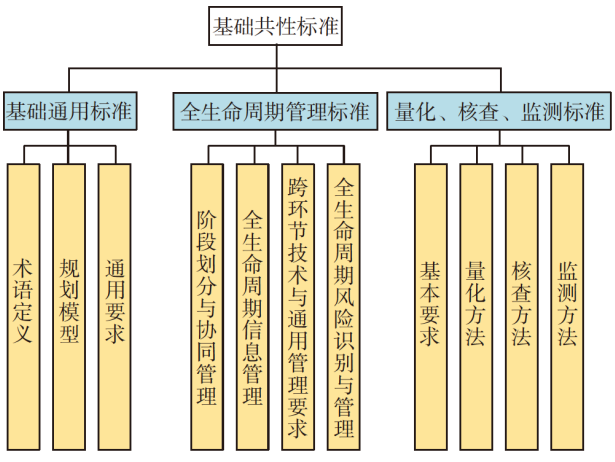


图 3 CCUS 基础共性标准子体系

Fig.3 Subsystem of common foundation standards for CCUS

模块通过规范全生命周期内的项目管理标准，旨在解决CCUS项目多环节、多行业协同难的问题。

（1）阶段划分与协同管理标准用于明确CCUS全生命周期的阶段边界，包括捕集阶段、运输阶段、利用阶段、封存阶段等，规定各阶段间的协同机制，解决项目边界模糊、不同行业主体建设运营协同困难的现实问题。

（2）全生命周期信息管理标准对CCUS全流程信息进行统筹管理，涵盖信息采集、信息存储、信息追溯与共享等内容。

（3）跨环节技术与通用管理标准针对跨阶段场景，提出技术衔接要求和管理协同要求，以实现产业链上下游的交接，避免管理盲区，落实跨环节的

风险共控。

（4）全生命周期风险识别与管理标准识别CCUS项目生命周期内总体性和跨领域性风险，建立CCUS项目全生命周期一体化通用风险体系，包含风险研判、评级与防控、应急管理方案，是CCUS项目在现实条件下长期严守环境安全底线的核心监管依据。

2.2.3 CCUS系统量化、核查、监测标准

CCUS系统量化、核查、监测标准子体系包括基本要求、量化方法、核查方法、监测方法4部分。针对产业发展中碳减排量难以确定、碳市场评估依据不足等迫切需求，该模块确立了科学规则体系。

（1）基本要求标准规定CCUS量化、核查与监测的适用范围，全面覆盖捕集、运输、利用和封存全生命周期；界定实施企业、第三方机构及监管单位等主体的资质与权责；确立数据真实准确性原则，保证数据能够被追溯；规范准备、编制、实施以及归档的通用流程，明确全流程中实际碳减排量的归属，从而为后续工作提供统一的基础性框架。

（2）量化方法标准涵盖捕集、运输、利用和封存全链条的源项识别以及标准化、一般化的计算模型应用。量化结果应表征基准线情景与实际情景的净碳减排量，并给出不确定性分析，最终明确CCUS项目各环节温室气体排放量、减排量与清除量的核算规则与技术路径。

（3）核查方法标准要求通过独立、系统的评估程序，确认CCUS项目量化结果的准确性与可信度。核查重点包括数据来源的可靠性、数据计算方法使用的合理性、质量保证与控制措施的有效性以及碳减排量归属的正确性。核查报告应对量化的契合度、是否存在实质性偏差作出结论，为项目提供具有公信力的核查结果。

（4）监测方法标准规定CCUS项目应针对量化与核查所需的数据提供采集方案与操作规范。监测计划应具有可操作性，确保数据的连续性、精度与完整性，定期评估监测策略的有效性并适时调整优化，为政府部门开展执法监管、守住生态安全底线提供具有可操作性的实证依据。

2.3 关键环节标准

CCUS技术关键环节标准用于规范CCUS技术各环节运行过程中的关键技术要求，主要包括碳核算、碳捕集、碳运输、碳利用、碳封存、其他低碳技术耦合、系统和交叉问题7部分。CCUS技术关键环节标准子体系如图4所示。

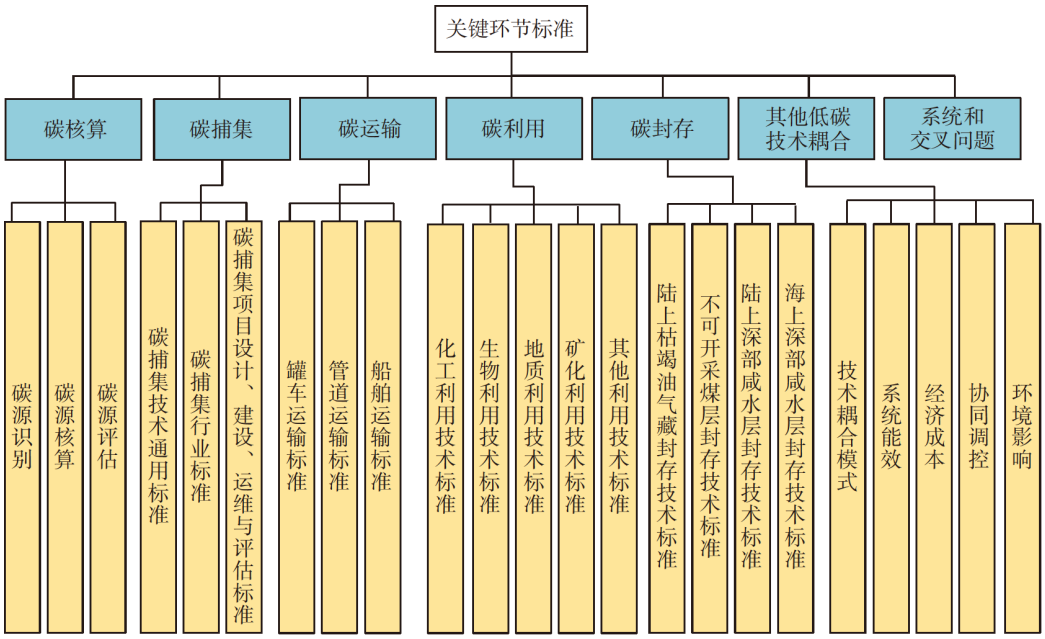


图 4 CCUS 技术关键环节标准子体系

Fig.4 Subsystem of key step standards for CCUS technology

2.3.1 碳核算标准

碳核算标准能够为CCUS项目碳源识别与碳减排潜力提供精准量化依据，是支撑CCUS项目合理实施的基础。碳核算标准主要规范碳源识别、碳源核算与碳源评估3部分，其子体系如图5所示。

（1）碳源识别标准规范CO_2排放源的识别标准，主要包括高浓度排放源、低浓度排放源以及碳中性排放源的识别标准。其中，高浓度和低浓度排放源集中于各行业产生CO_2的具体工艺流程。高浓度排放源为排放烟气中CO_2浓度为15%以上的碳排放源，主要来自水泥、钢铁、化工等行业。低浓度排放源主要包括燃煤以及燃气发电等排放烟气中CO_2浓度在15%及以下的碳排放源。碳中性排放源指通过其生命周期评估，能够实现温室气体净零排放或负排放的碳排放源，主要针对直接空气捕集技术和生物质能–碳捕集与封存技术。

（2）碳源核算标准规范CO_2排放量核算过程中的核算边界、核算方法等。其中，核算边界规定碳排放的责任归属，包括直接碳排放、间接碳排放以及其他碳排放；核算方法的选取与应用需明确选用条件与应用方法。

（3）碳源评估标准规范CO_2排放源进行CCUS技术改造的可行性、可靠性以及安全性的评估流程与内容。其中，可行性评估包括工厂剩余生命周期、工艺可行性、生产效益等；可靠性评估包括用于工厂捕集的化学/物理吸收剂的稳定性、耐用性，以及日常捕集作业的操作可靠性等；安全性评估包括腐蚀与防腐、安全生产等。

2.3.2 碳捕集标准

碳捕集标准规范燃烧前、燃烧中、燃烧后等不同捕集技术和不同行业的工艺参数、设备性能、能耗控制及安全要求。碳捕集标准的制定直接影响其他环节标准的制定，是CCUS技术关键环节标准的重要部分。碳捕集标准子体系如图6所示，主要包括碳捕集技术通用标准，碳捕集技术行业标准，碳捕集项目设计、建设、运维与评估标准3部分。

（1）碳捕集技术通用标准规范CO_2吸收技术、CO_2吸附技术、CO_2膜分离与膜吸附技术等捕集技术要求，以及捕集前烟气处理工艺与流程和各类型捕集技术的关键设备要求。其中，CO_2吸收技术包括物理吸收法、化学吸收法、物理化学联合吸收法等；CO_2吸附技术包括中高温吸附和低温吸附等；CO_2膜分离与膜吸附技术包含膜分离材料和膜吸附工艺两部分。

（2）碳捕集技术行业标准规范不同行业实施碳捕集的具体情况，主要包括火电行业、钢铁行业、水泥行业和其他排放行业等，涉及的关键事项包含烟气进入捕集系统的流量设定、烟气中CO_2比例设定、捕集系统捕集率、对应捕集技术所需耗材的使用、耗能技术规范、取水量与耗水量等。不同行业的碳捕集标准需根据国内CCUS项目及行业自身发展情况来制定。

（3）碳捕集项目设计、建设、运维与评估标准规范碳捕集项目的全流程产业过程，包括项目设计、

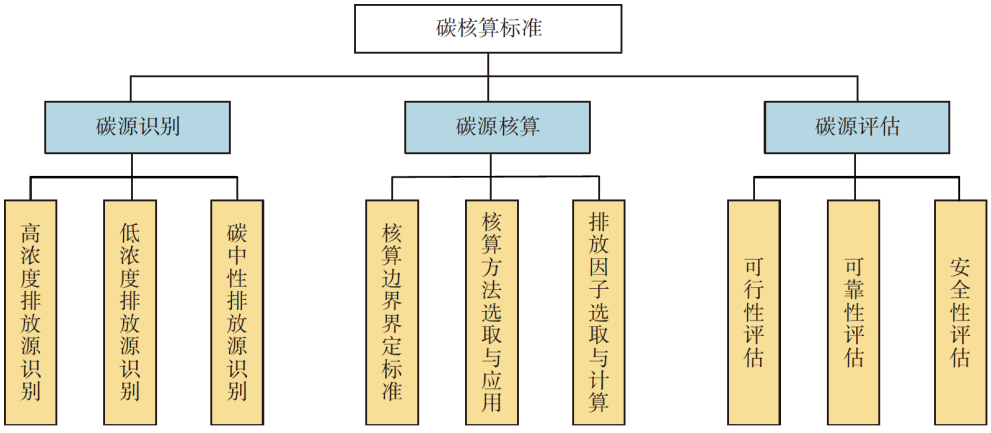


图 5 碳核算标准子体系

Fig.5 Carbon accounting technical standard subsystem

项目建设、项目运维、捕集性能评估、安全与环境评估5部分。

2.3.3 碳运输标准

碳运输标准体系通过明确罐车、管道、船舶等运输方式的技术规范、安全防护、泄漏监测及运维要求，确保捕集后CO_2在跨区域、跨环节转运过程中的安全性、稳定性与经济性，是CCUS项目的重要一环，能为CCUS项目连续性与可靠性提供关键支撑。碳运输标准子体系如图7所示，包括罐车运输标准、管道运输标准、船舶运输标准，以适应CO_2运输过程中面对的不同运输距离以及不同运输场景。

2.3.4 碳利用标准

碳利用技术将CO_2转化为高价值产品以实现碳资源增值，是提升CCUS技术市场化应用潜力的核心赋能技术。碳利用标准分类规范化工利用、生物利用、地质利用、矿化利用及其他利用技术路径的工艺要求、产物质量、环境风险防控措施，将CO_2从待处置污染物转化为具有经济价值的资源，提升CCUS项目综合效益、推动其市场化应用。碳利用标准子体系如图8所示。

（1）化工利用技术标准涵盖原料与纯度要求、反应工艺规范、产品质量标准、过程安全与环保4部

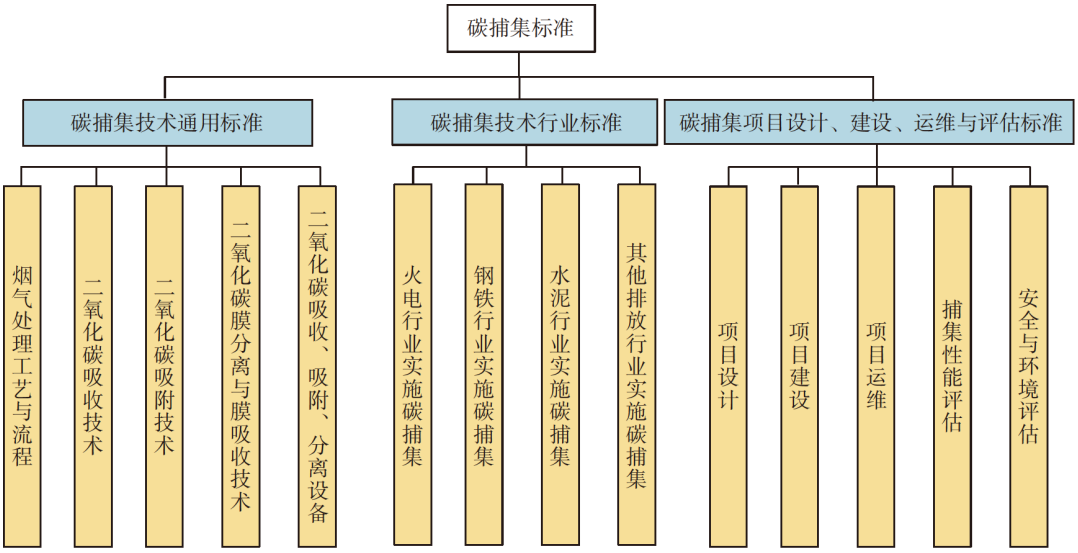


图 6 碳捕集标准子体系

Fig.6 Subsystem of carbon capture standard

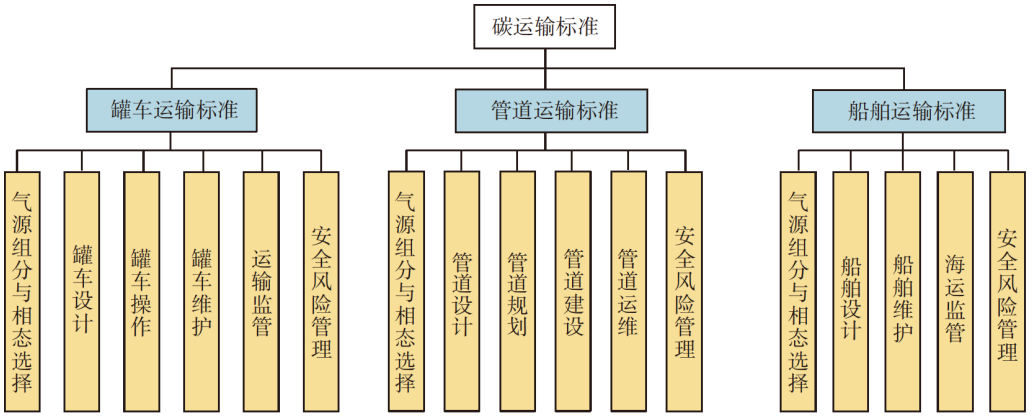


图 7 碳运输标准子体系

Fig.7 Subsystem of carbon transport standard

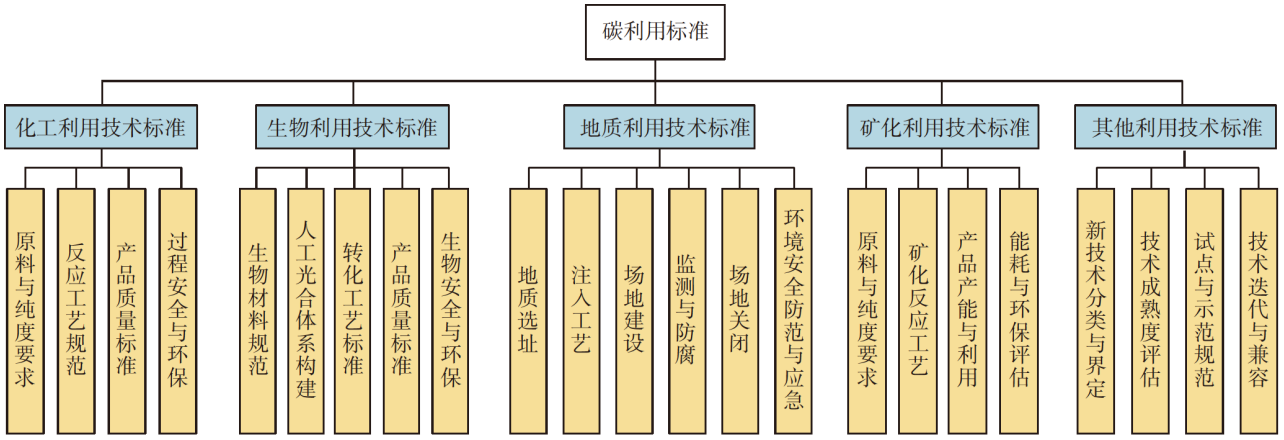


图 8 碳利用标准子体系

Fig.8 Subsystem of carbon utilization standard

分。该部分内容主要为CO_2的化工利用提供从原料到产品的全过程标准规范，以及为过程中的环境要求和安全检测提供依据。

（2）生物利用技术标准包括生物材料规范、人工光合体系构建、转化工艺标准、产品质量标准、生物安全与环保5部分。

（3）地质利用技术标准包括地质选址、注入工艺、场地建设、监测与防腐、场地关闭、环境安全防范与应急6部分。以CO_2-EOR和CO_2提高煤层气采收率等为代表的强化能源生产和促进资源开采的技术，是目前工程实践最多、经济性最好、已初步实现商业化运行的CO_2终端利用技术。

（4）矿化利用技术标准包含原料与纯度要求、矿化反应工艺、产品产能与利用、能耗与环保评估4部分。该技术通过化学反应将气态CO_2转化为稳定、不可溶的固体矿物，从而实现CO_2的永久封存，既能避免泄漏风险，还能将其转化为建材、土壤改良剂等具有经济价值的产品。

（5）其他利用技术标准指除上述4种CO_2利用方式外，将CO_2作为产品加以利用的其他方式的规范。该部分标准内容包括新技术分类与界定、技术成熟度评估、试点与示范规范、技术迭代与兼容等方面。

2.3.5 碳封存标准

碳封存标准规范地质封存、矿化封存等方式的选址要求、注入工艺、长期监测、稳定性评估及环境安全底线，确保CO_2被安全、永久地封存于特定载体，是实现CCUS技术长期碳减排目标、防范环境风险的技术保障。碳封存标准子体系如图9所示，包括陆上枯竭油气藏封存技术标准、不可开采煤层封存技术标准、陆上深部咸水层封存技术标准、海上深部咸水层封存技术标准4部分。各部分内容涵盖封存潜力评估、封存场地选址、封存场地建设与钻井、注入工艺、封存场地运行与维护、封存场地关闭、封存效果评估监测与防腐、安全防范与应急8项内容。

2.3.6 其他低碳技术耦合标准

与其他低碳技术或能源耦合既是CCUS技术未来发展的趋势，也是破解CCUS技术高能耗难题并推动其与能源系统深度融合、提升CCUS技术综合低碳效能的潜在路径。其他低碳技术耦合标准规范CCUS技术与风电、光伏、生物质能、氢能等低碳技术的耦合模式、协同能效、调控机制及环境兼容性，助力突破高能耗瓶颈并提升能源系统整体低碳水平，是CCUS技术融入“双碳”目标下能源转型的关键纽带。其他低碳技术耦合标准子体系如图10所示，包括技术耦合模式、系统能效、经济成本、协同调控、环境影响5部分。

（1）技术耦合模式规范CCUS技术与风电、光伏、生物质能、氢能等可再生能源在技术层面的耦合技术路径，明确不同能源类型与CCUS耦合的技术可行性要求，包括耦合技术类型界定、系统集成边界与接口标准、技术可行性验证要求。

（2）系统能效规范CCUS耦合可再生能源系统的能效评估指标与方法，涵盖能源转化效率、碳减排

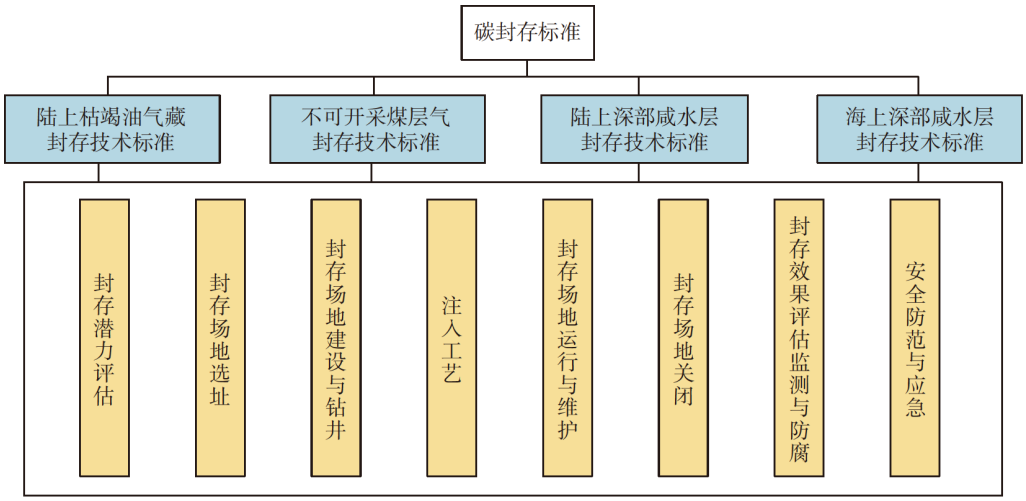


图 9 碳封存标准子体系

Fig.9 Subsystem of carbon storage standard

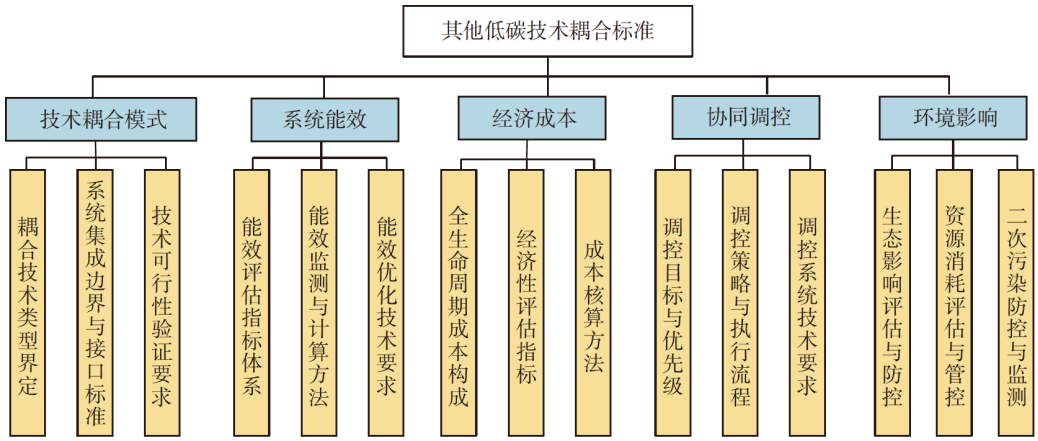


图 10 其他低碳技术耦合标准子体系

Fig.10 Subsystems of other low-carbon technology coupling standards

效率、系统综合能效等维度，包括能效评估指标体系、能效监测与计算方法、能效优化技术要求3部分。

（3）经济成本内容分为全生命周期成本构成、经济性评估指标、成本核算方法3部分，用于规范耦合系统的成本核算框架。

（4）协同调控明确耦合系统中能源供应、各环节的协同调控策略，保障系统稳定高效运行，标准内容包括调控目标与优先级、调控策略与执行流程、调控系统技术要求3部分。

（5）环境影响评估针对耦合系统的生态影响、资源消耗、二次污染等，制定评估指标、评估流程及环境风险防控标准，包括生态影响评估与防控、资源消耗评估与管控、二次污染防控与监测3部分。

2.3.7 系统和交叉问题标准

系统和交叉问题标准的定位是CCUS标准技术体系中具有跨维度协调属性的整合性标准，规范系统层面的协同规则与交叉领域的适配方案，保障CCUS从技术落地到规模化应用的整体高效性、安全性与可持续性，是衔接捕集、运输、利用、封存各环节标准与能源系统、政策体系、社会环境等多领域外部条件的关键纽带。相较而言，其他低碳技术耦合标准聚焦CCUS技术与外部能源技术的耦合，而系统和交叉问题标准聚焦CCUS内部跨环节及与社会经济

政策的交叉。该标准涵盖工程层面的跨环节CO_2成分、CO_2流量保障与衔接问题，风险层面的新型交叉风险防控与安全规范问题，CCUS技术与经济政策体系的衔接问题，CCUS项目与生态保护、社会接受度的协同问题等，其内涵将根据CCUS产业发展的实际需求和现实问题而不断扩充。

3 关于CCUS标准体系建设的建议

构建科学、完整的CCUS标准体系，既是保障CCUS从示范走向规模化落地的基础前提，也是衔接能源转型与低碳发展的关键支撑。为加快构建中国自主CCUS完整标准体系，本文提出以下建议：

（1）强化CCUS相关标准的顶层设计，分阶段解决当前CCUS相关标准体系碎片化问题，构建统筹协同的标准架构。近期应重点建立国家层面的标准化协调机制，以填补量化核查、跨环节协同等空白为首要任务，在此基础上，系统梳理现有标准情况，清理交叉重复的内容。中期需从技术层面形成全链条标准框架，推动成熟团体标准上升为国家标准，解决各环节、各行业间标准割裂问题。远期应结合技术迭代与产业成熟度，融入低碳耦合、数字化等新需求，实现标准体系的动态优化与前瞻性布局，为产业规模化发展提供制度保障。

（2）聚焦CCUS产业关键问题，分时期推动标准落地实施。近期可制定差异化行业指引，针对量化核查标准缺失问题开展示范项目试点，鼓励部分行业企业先行。中期应重点完善量化核查与监管机制，将标准体系与政策工具挂钩，实现政策激励产业发展与标准规范项目实施并行。远期需建立标准实施效果评估与动态调整体系，推动CCUS相关标准与碳市场、绿色金融等市场机制深度融合，通过标准制定促进产业升级、政策适配推动市场发展的良性循环，系统释放CCUS减排潜力。

（3）深化国际标准对接，分阶段提升中国标准话语权，推动CCUS标准国际化协同发展。近期应积极参与国际标准化组织工作，了解国际在研标准动态，推动中国在管道运输、地质封存等领域标准与国际互认。中期需主动牵头国际标准的制定，重点推广中国在项目风险管理、传统设施CCUS改造评估等方面的技术标准成果，与欧盟、美国等主要经济体建立标准合作机制，促进区域标准共识形成。远期应趋向于主导全球CCUS标准框架的构建，推动中国自主标准“走出去”，实质性提升中国在全球气候治理与低碳技术规则制定中的话语权。

参考文献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: Mitigation of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

[2] Wei Y M, Kang J N, Liu L C, et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 ℃ climate target[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(2): 112–118.

[3] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 8–18.

[4] 谢克昌. 面向2035年我国能源发展的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1–7.

[5] Zou C N, Pan S Q, Hao Q. On the connotation, challenge and significance of China’s “energy independence” strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 449–462.

[6] Yang X, Nielsen C P, Song S J, et al. Breaking the hard-to-abate bottleneck in China’s path to carbon neutrality with clean hydrogen[J]. Nature Energy, 2022, 7(10): 955–965.

[7] Fan Z Y, Friedmann S J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy[J]. Joule, 2021, 5(4): 829–862.

[8] Wang Y H, Wen Z G, Xu M, et al. The carbon-energy-water nexus of the carbon capture, utilization, and storage technology deployment schemes: A case study in China’s cement industry [J]. Applied Energy, 2024, 362: 122991.

[9] Wei N, Liu S N, Jiao Z S, et al. A possible contribution of carbon capture, geological utilization, and storage in the Chinese crude steel industry for carbon neutrality[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 133793.

[10] 刘罗茜, 雷涯邻, 支树洁, 等. 中国水泥行业点源层面CCUS技术减排潜力与优化部署[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(4): 56–67.

[11] 魏宁, 刘胜男, 李小春. 中国煤化工行业开展CO_2强化深部咸水开采技术的潜力评价[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 70–78.

[12] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010–1018.

[13] 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.

[14] Wang P T, Xu Q C, Wang F Y, et al. Investigating the impacts of the Dual Carbon Targets on energy and carbon flows in China[J]. Energy, 2024, 313: 133778.

[15] 黄晶, 陈其针, 仲平, 等. 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.

[16] 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.
[17] Wang P T, Zhang Y X, Wang F Y, et al. Carbon capture, utilization, and storage in China's high-emission industries: Optimal deployment under carbon neutrality goals[J]. Energy, 2025, 323: 135774.
[18] 黄晶, 马乔, 史明威, 等. 碳中和视角下CCUS技术发展进程及对策建议[J]. 环境影响评价, 2022, 44(1): 42–47.
[19] 王蓬涛. 碳捕集利用与封存项目源汇匹配方法及其应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
[20] Yang Y M, Zhou L L, Zhang J H. Development and deployment of standards for CCUS[J]. E3S Web of Conferences, 2025, 625: 03025.
[21] Lin K Y, Wei N, Jiang D L, et al. Progress and perspectives in source-sink matching for CCUS: A critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116313.
[22] 何淑娴. 碳中和背景下CCUS环境风险预防及责任承担制度研究[J]. 资源节约与环保, 2024(7): 139–144.
[23] 龙妍, 李小姗, 丁晴, 等. 碳捕集利用与封存标准研究进展与体系构建思考[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 17–28.

Research on the Construction of a Full-Chain Standard System for Carbon Capture, Utilization, and Storage Technology

WEI Yi-Ming[1,2,3,*], WANG Pengtao[2,6,*], KANG Jianing[1,2,3], LIU Lancui[4], LI Qi[5], TIAN Xiaoxi[1,2,3], GAO Wentong[6]

1. Beijing Lab for System Engineering of Carbon Neutrality, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Joint Int. Research Lab of Carbon Neutrality System & Engineering Management (MoE), Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
4. School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
5. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
6. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

Abstract: Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology is a critical pillar in achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. Although CCUS technology has developed rapidly in China, its standard system remains underdeveloped, facing issues such as system fragmentation, lagging standards, and inconsistent testing and accounting methodologies. Therefore, there is an urgent need to establish a unified and comprehensive CCUS technical standard system. To this end, this paper systematically analyzes the standard requirements across the entire CCUS process. Based on the full chain of capture, transport, utilization, and storage, and integrating the prerequisite requirements of carbon accounting with the subsequent requirements of low-carbon technology coupling, we preliminarily design a standard system framework comprising two primary dimensions: basic commonalities and key links. Specifically, the basic commonalities dimension encompasses general basics, life-cycle management, as well as quantification, verification, and monitoring. The key links dimension includes carbon accounting, carbon capture, carbon transport, carbon utilization, carbon storage, coupling with other low-carbon technologies, and systemic and cross-cutting issues. Furthermore, this paper proposes phased improvement pathways and implementation recommendations for the near-, medium-, and long-term, aiming to accelerate the construction of the full-chain CCUS standard system and promote the large-scale development of the CCUS industry.

Key Words: carbon capture, utilization, and storage technology; carbon peaking and carbon neutrality; standard system; carbon capture; carbon utilization; carbon storage