

目次

2020~2021年新冠疫情期间南京市PM _{2.5} 化学组成与来源变化特征	华楠, 尚玥, 谢鸣捷	(593)
郑州市大气PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及来源解析	张俊美, 陈仕霖, 王乾恒, 姚森, 杨书中	(602)
太原市PM _{2.5} 浓度的气象特征影响分析及预报	李明明, 王雁, 闫世明, 陈玲, 韩照宇	(611)
黄石市大气PM _{2.5} 中碳氮组分的污染特征及来源解析	王赐晔, 邓萌杰, 陈雨, 王祖武, 成海容	(626)
长三角地区典型PM _{2.5} 污染过程和跨区域传输对宁波污染贡献评估模拟	潘勇, 郑捷, 肖航	(634)
长三角地区2017~2020年非极性有机化合物组成特征及来源	吴长流, 曹芳, 贾小芳, 张煜烟, 谢添, 任磊, 章炎麟	(646)
北京城区不同组分PM _{2.5} 散射特性及来源分析	曹阳, 王陈婧, 景宽, 王琴, 刘保献, 安欣欣	(658)
排放和气象对疫情前后武汉不同类型点位大气污染物的影响	熊江荷, 孔少飞, 郑煌, 肖婉, 刘傲, 朱明铭	(670)
2019~2022年成都市春节期间烟花爆竹燃放对空气质量影响分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅	(680)
北京市城区秋季O ₃ 污染过程VOCs污染特征及反应活性	孙雪松, 张蕊, 王裕, 袁滕	(691)
郑州市多站点大气VOCs变化特征及源解析	王冰, 尹沙沙, 黄爱枝, 张栋, 卢轩, 张瑞芹	(699)
加油站油气处理装置VOCs化学组成及二次污染生成贡献	胡玮, 黄玉虎, 梁文俊, 刘明宇, 杨天昇, 任碧琪	(709)
长三角地区2017~2020年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估	程育恺, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 安静宇, 黄成	(719)
典型农药制造企业废气污染物排放特征及风险评估	翟增秀, 肖成德, 孟洁, 王静, 杨伟华, 李伟芳	(730)
黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素	涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 令狐昌卫, 赵瑞刚, 和成忠	(740)
高寒干旱区地表水与地下水水化学特征及转换关系:以大通河流域为例	易冰, 刘景涛, 吕晓立, 何伟, 朱亮, 张玉玺, 杨明楠	(752)
黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪	李欢玮, 赵广举, 李明, 穆兴民, 田鹏	(761)
长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评价	张志永, 万成炎, 胡红青, 杨中华, 袁玉洁, 朱稳	(770)
鄱阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析	曾欢, 张华, 丁明军, 王鹏, 黄高翔, 彭翔, 秦瑗, 杨越, 邹天娥, 徐欢, 黄鹏	(781)
石期河南南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价	付蓉洁, 辛存林, 于爽, 李笑	(796)
河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价	张千千, 邢锦兵, 王慧玮, 刘景涛, 陈玺	(807)
鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析	田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾	(816)
底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响	张建华, 殷鹏, 张雷, 尹洪斌	(828)
金沙江底栖真核微生物地理分布特征及生态学机制	崔戈, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 张波, 吴程	(839)
西安市景观湖泊水体细菌群落结构分析与代谢功能预测	王敏, 张雨桐, 黄晨, 任杰辉, 万甜, 程文	(847)
三峡水库蓄水对支流浮游植物功能群的影响及与资源利用效率的关系	赵璐, 欧阳添, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴	(857)
施肥和秸秆覆盖对成都平原区农田氮和磷流失的影响	王宏, 姚莉, 张奇, 林超文, 刘海涛, 罗付香, 王谢, 杨璇, 翟丽梅	(868)
O ₃ -SBBR联合工艺深度处理印染工业园生化尾水的效能和机制	罗新浩, 胡勇有, 陈元彩, 程建华, 姚颖, 钱原铭	(878)
低温下磁性载体MBBR系统微生物群落特征和功能预测分析	刘超, 李奇, 宋子洋, 胡鹏, 敬双怡, 李卫平	(889)
基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测	徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 戴强玉, 李欣怡	(900)
基于MGWR的黄河流域土壤有机碳密度和影响因素分析	南富森, 李宗省, 张小平, 崔乔, 李玉辰, 熊雪婷, 杨雪杰, 杨安乐	(912)
土壤功能与环境因素在海拔梯度上的耦合关系:以梅里雪山为例	赵冬辉, 申聪聪, 张志明, 刘四义, 陈保冬, 孙东丽, 王继琛, 葛源	(924)
洞庭湖南缘农田土壤重金属特征及源解析	肖凯琦, 许安, 郭军, 李毅, 卢永兴, 邢新丽, 董好刚	(932)
南京城郊不同土地利用类型农业土壤多环芳烃污染特征及风险评价	张秀秀, 朱昌达, 王飞, 魏宇宸, 潘剑君	(944)
福州滨海地区菜地和果园土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征	侯宁, 黑杰, 金强, 刘旭阳, 黄佳芳, 林少颖, 黄庄, 谢杨阳, 王维奇	(954)
铁修饰生物炭的制备及在砷污染土壤修复中的应用	韦婧, 刘映吟, 涂晨, 邓绍坡, 郝丹丹, 校亮, 毛萌	(965)
锰铝双氧化物改性生物炭减缓土壤重金属对黑麦草的毒性作用	林鹏程, 尹华, 刘晓菲, 刘航, 晏才雅, 戚鑫	(975)
田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险	牛硕, 王天齐, 杨阳, 许群, 王美娥, 陈卫平	(984)
不同性质硅肥影响土壤生物有效态镉的主要元素	黄蕊, 魏维, 谢运河, 柳赛花, 陈豪宇, 彭华, 纪雄辉	(991)
不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响	魏玮, 李平, 周志高, 王兴祥, 丁昌峰	(1003)
pH、钙和磷对砷在水稻土中溶解度的影响及表面络合机制解析	邓迎璇, 翁莉萍, 朱桂芬, 李永涛	(1012)
土壤中磺胺二甲嘧啶赋存对水稻生长的影响	章威, 王沛芳, 金秋彤, 胡斌	(1021)
江苏产区大蒜中邻苯二甲酸酯含量检测及溯源分析	王亚, 肖霞霞, 杨云, 冯发运, 宋立晓, 陈小龙, 孙星, 李勇, 曾晓萍, 马金骏, 余向阳	(1029)
河南省部分市售农用化肥中溶解性离子浓度及同位素组成	张东, 薛天, 秦勇, 刘运涛, 陈昊, 高振朋, 黄兴宇, 麻冰涓	(1040)
控氧热解过程中污染稻草生物炭的组分特性及其重金属累积特征	徐智, 郭朝晖, 徐锐, 肖细元, 谢慧民, 胡玉莲	(1051)
长期施肥对农牧交错带旱地土壤微生物多样性及群落结构的影响	高日平, 段玉, 张君, 任永峰, 梁俊梅, 景宇鹏, 赵沛义	(1063)
化肥减量配施有机肥对柠檬根际/非根际土壤细菌群落结构的影响	邓正昕, 高明, 王莹燕, 谢永红, 熊子怡, 王子芳	(1074)
秸秆还田下不同追氮量对麦田土壤真菌群落结构和生态网络的影响	靳海洋, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 岳俊芹, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰	(1085)
粉垄耕作对耕地土壤细菌群落多样性及微生物网络结构的影响	夏皖豫, 陈彦云	(1095)
基于宏基因组学揭示咸水滴灌对棉田土壤微生物的影响	杜思焱, 陈静, 刘佳炜, 郭晓雯, 闵伟	(1104)
双碳约束下煤化工行业节能降碳减排协同	张鸿宇, 王媛, 郝成亮, 卢亚灵, 金玲, 连超, 蒋洪强, 吴立新, 曹东	(1120)
“双碳”目标下:中国CCUS发展现状、存在问题及建议	赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 王小龙	(1128)
粉煤灰用于碳捕集、利用及封存的研究进展	姜龙, 何川, 李金晶	(1139)
中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力	杨传文, 邢帆, 朱建康, 李荣华, 张增强	(1149)
污水处理过程N ₂ O排放:过程机制与控制策略	郝晓地, 杨振理, 于文波, 刘然彬	(1163)
市政污水厂典型A ² O工艺低碳运行的系统性评估	孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 原建光, 张东	(1174)
城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较	李哲坤, 张立秋, 杜子文, 封莉, 刘永泽	(1181)
基于群决策和层次分析法的长江中游地区农村污水处理技术评价及优选	刘璐, 张文强, 胡飞超, 庞阔, 郭亚丽, 张婷, 李敏	(1191)
《环境科学》征订启事(815)	《环境科学》征稿简则(846)	信息(856, 899, 1028)

“双碳”目标下：中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议

赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 王小龙

(宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 银川 750002)

摘要: 在全球变暖, 气候变化日趋严重的背景下, 碳捕集、利用和封存 (CCUS) 技术逐渐被世界各国公认为是最具潜力的一种碳减排技术。在详细阐述 CCUS 技术的起源、概念、定位和演变过程的基础上, 通过对比国内外 CCUS 技术的政策法规、示范工程和碳排放交易系统发展现状, 系统总结了我国自 2016 年加入《巴黎协定》后, 推动 CCUS 技术发展所做出的巨大努力, 并结合生态文明建设及“碳达峰”“碳中和”目标分析我国 CCUS 技术现存问题, 为进一步推动该技术的发展提出相关参考意见。

关键词: 碳中和; 碳捕集、利用和封存 (CCUS); 碳减排; 政策体系; 绿色发展

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)02-1128-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202203136

Under Goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: Status, Problems, and Suggestions of CCUS in China

ZHAO Zhen-yu, YAO Shun, YANG Shuo-peng, WANG Xiao-long

(Ningxia Survey and Monitoring Institute of Land and Resources, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Under the background of global warming and climate change, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology has gradually been recognized by countries around the world as one of the carbon reduction technologies with the most potential. This study described the origin, concept, positioning, and evolution process of CCUS technology in detail and compared the policies, regulations, demonstration projects, and development status of the carbon trading system of CCUS technology at home and abroad. Simultaneously, we systematically summarized the great efforts made by China to promote the development of CCUS technology since China joined the Paris Agreement in 2016, combined with the construction of ecological civilization and the objectives of “carbon peak” and “carbon neutralization.” In addition, this study analyzed the existing problems of CCUS technology in China and put forward relevant development suggestions for further promoting the discovery of this technology.

Key words: carbon neutrality; carbon capture, utilization, and storage (CCUS); carbon reduction; policy system; green development

众所周知, 随着温室气体的爆炸性增长, 引发了干旱、水灾、冰川消融和海平面升高等一系列环境问题, 对农业生产、人类生活和森林植被造成了不可估量的危害, 其中尤以化石燃料产生的 CO_2 巨量排放最为突出, 2020 年全球大气 CO_2 浓度高达 $412 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[1,2], 全球变暖已经成为全球性重大问题。中国作为以煤炭为能源主体结构的全球碳排放大国, 2019 年 CO_2 排放量约占全球碳排放总量的 28%, 位居全球首位^[3-5], 碳减排势在必行且面临着巨大压力与挑战。2016 年, 中国自愿加入《巴黎协定》, 承诺“全球平均气温升高幅度控制在 2°C 以内, 并为升温幅度控制在 1.5°C 以内而努力”。2020 年, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话首次提出“碳达峰”和“碳中和”目标 (“双碳”)^[6]。2021 年, 《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》再次强调“落实 2030 年应对气候变化国家自主贡献目标, 制定 2030 年前碳排放达峰行动方案”^[7]。不难看出, “十四五”时期是中国碳达峰的关键期和窗口期, 中国如何有效减少 CO_2 排放, 推动全面绿色低碳转型, 是应对环境问题, 实现“双碳”目标的当务之急。

“碳达峰”是指在某一个时间点, CO_2 的排放量

达到峰值不再增长, 之后开始逐步回落的过程。“碳中和”最早指交通旅游及个人家庭等通过购买碳信用抵消产生的碳排放^[8], 现指通过全球变暖潜能值 (GWP) 和全球温度潜能值 (GTP) 等衡量温室气体增温能力指标, 核算国家、企业、产品、活动或个人在一定时间内直接或间接产生的 CO_2 或温室气体排放总量, 以及通过植树造林和节能减排等形式, 抵消自身产生 CO_2 或温室气体排放量, 达到温室气体排放稳定, 实现相对“零排放” (正负抵消)^[9]。目前, 国际公认的碳减排途径主要包括少碳、用碳和无碳, 其中“少碳”是指提高现有技术的能源利用效率, 实现源头减排; “用碳”是指通过生物固碳和二氧化碳捕集、利用和封存 (CCUS) 等技术, 实现产生 CO_2 的利用^[10]; “无碳”是指利用清洁能源取代传统化石能源, 实现不产生 CO_2 。其中, CCUS 技术近年来被国际公认为是减少温室气体排放最有效和最具潜力的方法^[11-15]。本文以短期内保障我国实现“双碳”目标最重要的 CCUS 技术为出发点, 结合国内外发展概况, 系统总结中国 CCUS 技术现状, 对现存问

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-05-07

作者简介: 赵震宇 (1988 ~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为能源矿产开发与利用、矿业绿色发展和矿山生态修复, E-mail: 411900152@qq.com

题进行阐述并提出相关意见建议,以期为推动我国生态文明建设提供相关参考。

1 CCUS 概述及研究进展

CCUS 是在碳捕集与封存(CCS)技术基础上,结合中国实际,增加 CO₂ 利用环节后首次提出的技术概念,具体指将碳源排放的低浓度 CO₂ 进行分离捕集,提纯为高浓度 CO₂ 后运输到适宜地方封存或循环利用于制取燃料、化学品、碳酸盐产品等,从而实现碳减排的技术手段^[16~18]。其技术基础 CCS 是指将 CO₂ 从工业或其他排放源中分离出来,并运输到特定地点进行封存,以实现被捕集的 CO₂ 与大气长期隔离,该技术最初受到 CO₂ 驱油技术的启发,于 1989 年由麻省理工学院正式提出^[19]。CCS 技术虽然具有大规模碳减排的优点,但存在投入大且能耗高,简单封存无法盈利等多方面的问题,导致大多数发展中国家难以大范围推广和应用。相反,在当前全球依然以煤、石油和天然气等化石能源为主体的能源体系中,CCUS 技术尽管同样面临着高能耗的技术难点,但通过 CO₂ 的资源化利用极大降低了生产成本,使其可以通过商业化获取盈利。目前,CCUS 技术已经逐步替代了 CCS 技术,成为世界各国应对气候变化和碳减排的重要手段,其主要包括 CO₂ 的捕集、运输、封存和利用 4 个技术环节,以及碳排放交易系统 1 个商业交易方式。

1.1 CO₂ 的捕集

CO₂ 的捕集是指通过相关技术手段将不同排放源的 CO₂ 进行分离和富集的过程^[20],根据技术特点可以分为燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧 3 类:①燃烧前捕集是将碳从未燃烧的燃料中分离出去,从而使燃烧不产生 CO₂,具有纯度高、捕集成本低的优点,但存在捕集设施占地大、设备成本高的缺点^[21~23];②燃烧后捕集是指通过低温分馏法、

化学溶剂吸收法、膜分离法、物理吸附法、低温分离法、变压吸附法和冷冻氨工艺(CAP)等手段^[21,24,25],将 CO₂ 从燃料燃烧后的烟气中分离出来,具有适用性强、纯度高和设备成本低的优点,但存在捕集成本高、能耗高的缺点。目前化学吸收法、物理吸收法和变压吸附法被认为具有良好的应用潜力^[26];③富氧燃烧是指利用高纯度的氧气代替空气作为主要氧化剂进行化石燃料燃烧的技术,具有纯度高、占地小、设备成本低和捕集成本低的优点,但存在技术要求高和制氧成本高的缺点^[27,28]。

1.2 CO₂ 的运输

CO₂ 的运输是 CCUS 捕集、运输和封存利用的中间环节,主要包括陆地、船舶和管道运输 3 种方式:①陆地运输分为公路和铁路罐车两种,具有方便灵活、适应性强、技术简单和成本低的优点,但存在量小、运距短、装卸费时的缺点;②船舶运输具有长距离和大运量的优点,但存在二次运输和装卸费时的缺点;③管道运输包括陆上和海底两种方式,具有运量大、快速、连续、平稳、占地少、建设费用低和自动控制等优点,缺点是技术复杂,包括管道材料、网线设计和压缩技术等,以及日后可能存在泄漏隐患和产业配套规模投资成本高等。目前仅有美国具有相对完善的 CO₂ 管道选型方案、管道模型和运输技术。

1.3 CO₂ 的封存

CO₂ 地质封存是指通过管道技术将超临界状态下的 CO₂ 注入到含油、气、水或者无商业价值煤层的密闭地质构造中,形成长时间或永久性地对 CO₂ 的封存^[29],封存方式通常包括废弃矿井、不可采煤层、枯竭油田、海洋、矿物碳化、油气层、深部咸水层和陆地生态系统封存等。依据封存条件可将封存能力分为理论封存能力、有效封存能力、可实施封存能力和匹配封存能力(表 1)。

表 1 封存能力级别级标准
Table 1 Level standard of CO₂ storage capacity

封存能力级别	定义
理论封存能力	地质低通能接手的物理极限。假定孔隙空间可以全部用来封存 CO ₂ 的全部能力,或在地层流体中以最大饱和状态溶剂,或在整个煤体中以 100% 饱和状态吸附的封存能力
有效封存能力	理论封存能力中满一系列地质和工程标准而得到的部分封存能力
可实施封存能力	通过考虑 CO ₂ 封存技术、法律法规、基础设施和一般经济障碍获得的有效封存能力
匹配封存能力	通过大型固定碳源和地质封存站点进行详细匹配获得的地质封存站点在容量、注入能力和供应速率足以容纳排放源输送来的 CO ₂ 能力

1.4 CO₂ 的利用

CO₂ 依据自身的物理性质和化学性质可分为地质利用、化工利用、生物利用、矿化利用和能源利用这 5 种方式(表 2):①地质利用包括 CO₂ 驱油、

驱煤层气、驱天然气、驱页岩气、驱深部咸水层、驱铀矿和驱地热能技术等;②化工利用是指将 CO₂ 与共反应物生成化学产品的方法,主要包括 CO₂ 制备合成气技术、CO₂ 制备液体燃料或化学用品技

术、CO₂ 合成甲醇技术和合成碳酸二甲酯技术；③生物利用技术是指通过植物固定 CO₂，利用光合作用进行转化利用，目前主要以具有快速生长速率和转化速率的螺旋藻、小球藻和盐藻这 3 种微藻类植物为主，包括微藻转化生物燃料和化学产品技术、微藻转化有机肥料技术、微藻转化添加剂技术和 CO₂ 温室增产利用技术等；④矿化利用技术，主要指利用碱土金属氧化物 (Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等) 与 CO₂ 在一定温压条件下，发生化学反应生成稳定碳酸类化合物的过程，其中我国研发的 CO₂ 固化磷石膏和氯化镁受到各国广泛关注^[30~34]；⑤能源化利用自 20 世纪 40 年代发展至今^[35]，随着储能技术与 CO₂ 减排技术的交叉融合，已不限于 CO₂ 自身能量的物理或化学变化。根据反应原理和实际需要，可实现“耦合储能 CO₂ 电池技术”、“回收能量的 CO₂ 电容器/电池技术”和“深度发电 CO₂ 矿化电池技术”等^[36~46]，这些技术在碳减排和实现煤炭发电清洁利用方面具

表 2 CO₂ 利用相关技术Table 2 Related CO₂ utilization technology

学科分类	应用领域	技术/产品目标
地质利用	能源	CO ₂ 强化采油 (CO ₂ -EOR)
		CO ₂ 驱替煤层气 (CO ₂ -ECBM)
		CO ₂ 增强产气 (CO ₂ -EGR)
		CO ₂ 增强页岩气开采 (CO ₂ -ESGR)
		CO ₂ 增强地热系统 (CO ₂ -EGS)
	资源	CO ₂ 铀矿浸出增采 (CO ₂ -EUL) CO ₂ 强化深部咸水 (CO ₂ -EWR)
化工利用	材料	CO ₂ 合成可降解聚合物材料 (CO ₂ -CTP)
		CO ₂ 间接非光气合成异氰酸酯/聚氨酯 (CO ₂ -CTU)
		CO ₂ 间接制备聚碳酸酯/聚酯材料 (CO ₂ -CTPC)
		CO ₂ 间接制备乙烯基聚酯 (CO ₂ -CTPET)
		CO ₂ 间接制备聚丁二酸乙二醇酯 (CO ₂ -CTPES)
	能源	CO ₂ 与甲烷重整制备合成气 (CO ₂ -CDR)
		CO ₂ 经一氧化碳制备液体燃料 (CO ₂ -CTL)
	有机化学品	CO ₂ 直接加氢合成甲醇 (CO ₂ -CTM)
		CO ₂ 合成碳酸二甲酯 (CO ₂ -CTD)
		CO ₂ 合成甲酸技术 (CO ₂ -CTF)
生物利用	能源	钢渣直接/间接矿化利用 CO ₂ (CO ₂ -SCU)/(CO ₂ -ISCU)
		微藻固定 CO ₂ 转化为生物燃料和化学品 (CO ₂ -AB)
		微藻固定 CO ₂ 转化为生物肥料 (CO ₂ -AF)
		微藻固定 CO ₂ 转化为食品和饲料添加剂 (CO ₂ -AS)
		CO ₂ 气肥利用 (CO ₂ -GF)
	无机化学品	磷石膏矿化利用 CO ₂ (CO ₂ -PCU) 钾长石加工联合 CO ₂ 矿化 (CO ₂ -PCM)
能源化利用	能源	耦合储能 CO ₂ 电池技术 回收能量的 CO ₂ 电容器/电池技术 深度发电 CO ₂ 矿化电池技术

有广阔前景。

1.5 碳排放交易系统

碳排放交易系统是温室气体排放权交易的统称，具体指在 CO₂ 排放总量控制的前提下，将包括

CO₂ 在内的温室气体排放权作为一种商品进行交易，对 CCUS 商业化推广具有重要意义，是 CCUS 系统工程的重要组成部分。该系统通常由政府制定某行业温室气体排放的总量上限，然后授权或出售给企业有限额规定的排放许可证。在规定期限内，如果企业排放量超出许可证的上限，就必须在碳交易市场上购买排放配额；如果企业排放量低于上限，可以在市场上出售多余的配额。碳交易市场通过设定碳排放价格，用利益调节机制促使企业增强低碳减排的内在动力，同时推动投资者向清洁低碳产业进行投资倾斜，最终实现控制碳排放总量的目的。

2 CCUS 国际发展现状

CCUS 技术作为一项新兴技术，大部分研究仍处于理论、试验和推广阶段，但是世界各国依然从政策、投资、合作和示范工程等方面纷纷加大投入力度，以期掌握技术优势，在未来产业竞争中占得先机。

2.1 政策法规

早期国际上关于 CCUS 相关的法律主要涉及封存安全问题，包括《伦敦公约》(1972 年)、《联合国海洋法公约》(1982 年)、《联合国气候变化框架公约》(1992 年)、《东北大西洋海洋环境保护公约》(1992 年) 和《京都议定书》(1997 年) 等。直到 2007 年，《京都议定书》明确将发展碳封存技术确立为减缓气候变化的方案^[47]。2009 年，欧盟出台了世界上第一部封存法规《CCS 地质封存指令》，为欧盟各成员国制定碳捕集相关法律、制度和技术要求打下基础^[48]；英国修订出台了《能源法》(2008 年)、《规划法》(2008 年) 和《二氧化碳海洋封存许可法令》，将 CCUS 等新技术列入其中，并颁布了世界上第一部《气候变化法》(2008 年)，要求常规电厂必须采用 CCUS 技术^[49]；美国针对环境安全和 CO₂ 驱油等分别签署发布了《地下封存 CO₂ 法规管制议案》(2008 年)、《美国安全碳存储技术行动条例》(2010 年)、《CO₂ 捕集、运输与封存指南》(2008 年)、《二氧化碳地质封存井的地下灌注控制联邦法案》(2009 年)，同时修订了《清洁空气法案》(1990 年)、《安全饮用水法案》(2010 年) 和《美国清洁能源与安全法案》(2009 年)^[50,51]；澳大利亚以《CO₂ 捕集与封存指南》(2005 年) 为基础，分别颁布和修订了《温室气体地质封存法》(2006 年)、《暴露型法案》(2006 年)、《CCS 监管指导原则》和《海洋石油法》(2006 年)^[52,53]；加拿大出台了《CSA Z741 CO₂ 地质封存》(2012 年)、《碳捕集与封存条例修正法》(2010 年) 和《碳封存任期规定》(2010 年)；日本针

对海洋封存风险,于 2009 年修订了《海洋污染防治法》^[54](表 3)。

表 3 全球主要国家 CCUS 政策法规

Table 3 CCUS policies and regulations in major countries		
国家	相关法律法规	现状
欧盟	《CCS 地质封存指令》(2009 年)	制定
	《气候行动与可再生能源政策》(2008 年)	制定
	《欧盟碳排放交易机制》(2008 年)	制定
英国	《二氧化碳海洋封存许可法令》(2009 年)	制定
	《气候变化法》(2008 年)	修订
	《能源法》(2008 年)	修订
	《能源白皮书》(2010 年)	制定
美国	《地下封存 CO ₂ 法规管制议案》	制定
	《CO ₂ 捕集、运输与封存指南》(2008 年)	制定
	《二氧化碳地质封存井的地下灌注控制联邦法案》(2009 年)	制定
	《美国安全碳存储技术行动条例》(2010 年)	制定
	《CO ₂ 封存法案纳入法律条款的提案》(2010 年)	制定
	《美国气候变化技术计划》(2006 年)	制定
	《清洁空气法案》(1990 年)	修订
	《安全饮用水法案》(2010 年)	修订
	《美国清洁能源与安全法案》(2009 年)	修订
	《温室气体地质封存法》(2006 年)	修订
	《CCS 监管指导原则》	修订
	《海洋石油法》(2006 年)	修订
澳大利亚	《暴露型法案》(2006 年)	修订
	《CO ₂ 捕集与封存指南》	制定
	《海洋污染防治法》	修订
日本	《CSA Z74 CO ₂ 地质封存》(2012 年)	制定
加拿大	《碳捕集与封存条例修正法》(2010 年)	制定
	《碳封存任期规定》(2010 年)	制定

2.2 示范工程

截至 2021 年,全球正在建设和运行中的商业化 CCUS 项目约为 135 个,相比 2020 年增加一倍以上,全部建成后可捕集 CO₂ 约 1.5 亿 t·a⁻¹,主要分布在美国、加拿大、欧洲、中东、中国、澳大利亚、巴西,较为出名的有美国的 Mountaineer 项目、挪威的 Sleipner 项目、阿尔及利亚和加拿大的 Salah 和 Weyburn 项目等(表 4),目前全球最大的千万吨级 CCUS 产业集群为“休斯顿航道 CCUS 创新区”,预计建成后可在墨西哥湾附近每年封存 1 亿 t CO₂^[55]。

2.3 碳排放交易系统

目前,全球较为成熟的碳排放交易体系主要包括欧盟、美国和韩国。欧盟碳排放交易体系(EU-ETS)属于总量交易模式,具体指在一定区域内,碳排放总量不超过允许排放量或逐年降低的前提下,内部各排放源之间通过货币交换方式调剂排量,达到减排目的。该体系是全球最大跨国碳交易市场,覆盖 27 个主权国家,于 2005 年初始运行,2008 年正式运行,具有开放式和循序渐进的特点^[56]。为了使

表 4 全球主要 CCUS 示范工程

Table 4 Major CCUS demonstration projects in world			
地点	名称	捕集/利用方式	项目阶段
挪威	Sleipner	燃烧前捕集/咸水层封存	运行
	Snøhvit	燃烧前捕集/咸水层封存	运行
阿尔及利亚	Salah	咸水层封存	运行
美国	Frio	咸水层封存	运行
	Mountaineer	燃烧后捕集	运行
加拿大	Feen	驱煤层气	运行
	Weyburn	驱油	运行
荷兰	K12B	驱煤层气	运行
	ROAD	燃烧后捕集/驱气	规划
日本	Yubari	驱煤层气	运行
澳大利亚	Otway	枯竭油田封存	运行
	Corgon	燃烧前捕集/封存	建设
英国	Don Valley Power	烧燃前捕集	规划
	White Rocs	富氧燃烧	规划
	Peterhead	燃烧后捕集	规划
德国	Ketzin	咸水层封存	运行
法国	Lacq	咸水层封存	运行

体系内成员国拥有最大的主决策权,欧盟碳排放交易体系采用分权化治理模式^[57],其目的在于碳减排的同时,兼顾各成员国经济能力、排放权分配、监督交易等方面的差异性,在达到碳排放总量和分量比例的基础目标上,达到平衡各成员国和欧盟之间的利益。相反,美国碳交易体系,没有形成全国性碳交易体系,而是采用区域性碳交易模式,即由各州政府自主开展。目前,通过各州的探索发展,已陆续形成了区域温室气体行动(RGGI)、西部气候倡议(WCI)和加州总量控制交易体系等区域性合作模式,基本涵盖了居民、电力行业、商业、交通燃料和其他工业。韩国在 2012 年通过了全国碳交易体系法案,企业可以买卖碳排放许可或购买联合国清洁机制框架下的碳汇,以满足自身排放需求。目前已有超过 450 家企业参与,并将计划发展成为全球性碳交易市场^[58]。

3 中国 CCUS 发展现状

中国 CCUS 虽起步较晚,但发展迅速,一定程度说明 CCUS 技术的应用潜力符合国情需要,也表明中国对碳减排的坚定决心和对该技术的高度关注,在技术政策、基础研究、资金投入、推广示范和国际合作等方面开展了大量工作。

3.1 国情现状

中国当前正面临“十四五”碳达峰的关键期、窗口期,如何构建清洁低碳安全高效的能源体系、推动绿色低碳技术实现重大突破、抓紧部署低碳前沿技术研究和加快减污降碳技术,成为目前经济社会系统性变革的重中之重。根据有关科研机构分析,预

计 2030 年中国一次能源生产总量可达 43 亿 t 标煤, CO_2 排放量可达 112 亿 t, 实现碳达峰^[5]. 早在 2015 年, IEA 估算中国仅深部咸水层 (1 000 ~ 3 000 m)、深部煤层 (300 ~ 1 500 m) 和油气田的碳封存潜力便达 1871 亿 t^[59]. 截至目前, 中国理论封存潜力约 1.21 ~ 4.13 万亿 t^[60], 即使排除海上封存空间^[61], 中国陆上 CCUS 技术的理论封存能力仍为万亿吨级^[62]. 不仅如此, 中国具有良好的 CO_2 源汇匹配体系, 大型碳源与潜在封存地之间距离少于 160 km 的约占 90%^[63], 极大降低了运输成本, 有利于产业化建设. 另据相关研究表明, 预计 2060 年 CCUS 捕集量可达约 16 亿 t^[64], 仅 CO_2 驱油这一项利用技术, 全国适用该技术的原油便可提高采收率约 15%, 实现增采 19.2 亿 t 原油和封存 CO_2 47 ~ 55 亿 t^[65], 可以看出 CCUS 技术与中国国情十分契合, 潜力巨大.

3.2 政策现状

“十一五”和“十二五”期间, 连续出台了相关政策方针, 包括《国家中长期科学技术发展规划纲要》、《国家“十二五”科学和技术发展规划》、《煤炭工业发展“十二五”规划》、《“十二五”控制温室气体排放方案》、《地质矿产保障工程实施方案 (2010 ~ 2020)》、《中国应对气候变化国家方案》、《中国对气候变化的政策与行动》和《中国应对气候变化科技专项行动》等, 明确提出将 CCUS 技术列为

未来国家发展重要规划和重点发展技术^[66,67]. 根据相关进展报告统计, 仅 2011 年关于发展 CCUS 的国家科技计划经费就超过 20 亿人民币, 开展了包括“973”、“863”和国家科技支撑计划等一系列基础性研究课题. 同时, 还出台了包括《关于推动碳捕集、利用和封存试验与示范通知》、《中国碳捕集、利用与封存技术发展路线图研究》和《中国二氧化碳地质储存潜力评价和示范工程》等一系列政策, 用于指导和鼓励国内大型能源企业开展研发示范工程. 当前, 中国在《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》中又明确将 CCUS 技术作为重大示范项目进行引导支持, 并出台了《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》, 要求推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用.

3.3 示范工程

根据科技部统计的中国 CCUS 示范项目, 自 2004 年至今共有 49 个 (已运行和建设) 涉及电力、煤化工、石油化工、水泥和钢铁等领域, 主要为 10 万 t 以下捕集量, 且已有百万吨以上项目开始规划建设, 现已累计封存 200 万 t CO_2 , 形成 CO_2 捕集能力 $296 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 注入能力 $121 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 5)^[20]. 相比 2019 年, 中国共开展 9 个小规模碳捕集示范项目和 12 个地质利用与封存项目, 其中包含 10 个全流程项目^[62], 项目数量增加一倍以上, 表明中国近

表 5 国内研发与示范工程概况

Table 5 Overview of domestic CCUS R & D and demonstration projects

地点	项目名称	捕集/利用方式	运行状态
内蒙古鄂尔多斯	神华煤制油 CO_2 捕集与驱油封存	咸水层封存	运行
胜利油田	中石化胜利油田燃煤电厂 CO_2 捕集与驱油示范	燃烧后捕集/ CO_2 驱油	运行
吉林油田	中石油吉林油田 CO_2 驱油研究与示范项目	富集燃烧/ CO_2 驱油	运行
北京高碑店	华能北京热电厂捕集试验项目	燃烧后捕集/化工利用	运行
上海石洞口	华能上海石洞口捕集示范	燃烧后捕集	运行
天津滨海新区	华能天津 IGCC 示范电站	燃烧前捕集/ CO_2 驱油	运行
重庆合川	中电投重庆双槐电厂碳捕集	燃烧后捕集	运行
山西沁水盆地	中联煤 CO_2 强化煤层气开采项目	CO_2 驱煤层气	运行
内蒙古达拉特旗	新奥集团微藻固碳生物能源示范	CO_2 生物利用	运行
江苏泰兴	中科金龙 CO_2 化工利用	CO_2 化工利用	运行
延安-榆林市	陕西延长石油 CCUS 一体化项目	CO_2 驱油及咸水层封存	运行
海南东方市	中海油 CO_2 制可降解材料	CO_2 化工利用	运行
湖北应城市	华中科技大学 35MWt 富氧燃烧技术研究示范	富氧燃烧/盐矿封存	运行
胜利油田	中石化煤制气 CO_2 捕集和驱油封存示范工程	煤制气捕集/ CO_2 驱油	运行
胜利油田	中石化胜利油田百万吨级 CO_2 捕集和封存驱油示范项目	燃烧后捕集/ CO_2 驱油	运行
天津塘沽区	华能集团 CO_2 捕集和利用示范工程	燃烧后捕集	运行
江苏连云港	连云港清洁煤能源动力研究设施	燃烧前捕集	运行
内蒙古准格尔旗	内蒙古 CO_2 地质储藏项目	咸水层封存	运行
黑龙江大庆市	大唐集团 100 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ CO_2 捕集与利用示范工程	富氧燃烧/封存和驱油	规划
江苏泰州	国家能源集团 50 万 t 级碳捕集及资源化利用项目	新型吸附捕集	规划
新疆哈密	百万吨级 CO_2 捕集与驱油项目	封存和驱油	规划

两年 CCUS 技术发展极快,且向大规模和全流程项目转变。

3.4 CCUS 技术现状

现阶段,中国 CCUS 多个环节的关键技术实现了长足进展,新技术类型不断面世,但在技术经济成本、示范规模与推广和有效性评价等方面仍有待进一步挖掘。CO₂ 捕集技术方面:中国燃烧前捕集技术较为成熟,类似胺基吸收剂、常压富氧燃烧等正开展工业示范的第一代捕集技术,部分已具备商业化能力。燃烧后捕集技术处于示范阶段,特别是燃烧后化学吸收法与国际上商业化应用差距较大,其他包括新型膜分离、新型吸附、增压富氧燃烧和化学链燃烧等第二代捕集技术仍处于研发阶段,预计 2035 年前后实现技术衔接。运输方面:陆地运输及内陆船舶运输技术已经相对成熟,但是配套的陆地输送管道及管网设计仍处于前期阶段,针对海底管道的输送技术发展,则还在概念性雏形阶段。封存方面,还未开展海底封存示范项目,其他封存项目的体量与美国、挪威、日本和巴西等国家相比差距显著。利用方面,目前除了化工与生物利用技术,特别是 CO₂ 合成化学材料技术,已基本实现大规模商业化并产生较好经济效益外,其他利用技术包括强化采油、驱替煤层气、浸采采矿和强化深部咸水层等技术,仍处于小规模工业示范研发阶段^[68]。

3.5 碳排放交易系统

我国自 2011 年起在深圳、广东、北京、上海、天津、湖北、重庆和福建等地进行了碳交易试点,覆盖主体不断拓展,囊括了电力、钢铁、水泥、建筑、交通运输、有色、造纸和石油化工等重点排放企业,部分事业单位、政府部门、外资企业和金融机构也参与其中。2017 年 12 月,中国碳市场正式成立^[69],采取与美国相似的区域性碳交易模式,先行在碳市场机制、配额分配和碳价格这 3 个方面开展探索。其中,配额分配为体系核心,根据各区域碳排放强度基准制定碳排放配额并免费发放,以达到碳市场灵活运行及碳总量减排的目的^[70]。目前,中国以《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》为支点,率先在全国发电行业启动了碳排放权交易试点。截至 2020 年底,各试点碳市场的配额现货交易累计成交 4.45 亿 t(CO₂ 当量),成交额 104.31 亿元,重点排放企业形成自我约束,履约率达 90% 以上,初步建立了有关价格机制、分配机制、交易机制、监管机制和稳定机制等^[71]。2021 年 7 月,全国碳市场线上交易正式启动,由上海环境能源交易所承担系统账户开设和运行维护,湖北碳交易中心负责登记计算。

4 存在问题

尽管我国 CCUS 技术在国家大力推动下,取得了一系列丰硕成果,为日后长期发展打下了坚实的基础,但不可否认仍存在许多难题有待解决。

4.1 尚未完备的法规政策体系

目前,中国在节能减排、清洁和可再生能源等领域均具备相对完善的法律法规,但 CCUS 技术尚处于无法可依的空白状态,例如《环境保护法》、《环境保护行政处罚办法》、《环境影响评价法》和《水污染防治法》等法律法规未将 CCUS 技术相关内容纳入其中,而且尚未出台企业可参考自拟政策措施的 CCUS 法律框架。不仅如此,CCUS 全链涉及不同行业和部门,包括国家、地方、企业、石油、煤炭、电力和化工等,相应的监管制度、统筹协调机制和产业化布局指导政策均未出台,特别是 CCUS 技术在实现碳减排后的经济激励措施,长期的高成本投入与低补偿、低利润回报,势必会造成企业开展大型 CCUS 项目后出现长期盈亏不平衡,导致企业选择开展小型项目甚至不开展 CCUS 项目,极大阻碍了 CCUS 技术在中国的推进。

4.2 高成本和高能耗压力

当前,中国的 CCUS 应用主要以国家投资的示范工程为主,但利用 CCUS 技术形成的产品竞争力低、总体经济性差,无法分担高昂的投资成本,加之技术融资难,能耗高,仅靠企业难以维持。相关工程经验表明:能耗方面,石油化工有限公司、电力行业、水泥行业和煤化工行业捕集能耗(以 CO₂ 计)分别约 0.65、1.6~3.25、6.35 和 0.7~2.55 GJ·t⁻¹,基本反映了 CO₂ 浓度和捕集能耗成反比的规律^[19];成本方面(以 CO₂ 计),燃烧后捕集成本约 29~51 美元·t⁻¹,新建煤气化联合循环发电系统燃烧前捕集成本为 CO₂ 约 13~37 美元·t⁻¹,而 CCUS 项目的商业化运行成本约为 40~70 美元·t⁻¹,仅 CO₂ 的捕集和提纯便会额外增加 25% 以上成本,约占全流程成本的 70% 以上^[72],显然 CCUS 技术的高成本、高能耗和低收益特点对于中国推广 CCUS 项目是一个巨大挑战。

4.3 难以预测的安全风险

众所周知,CO₂ 在地层中会与围岩、地下水和岩浆热液等介质发生物化反应,从而破坏地层稳定性,长期封存可能会直接造成地表变形、诱发地震、水质酸化、土壤酸化、地层矿物质溶解、微生态环境和区域空气含量变化等,间接对地方人类和动植物造成危害。中国陆地及海底管道运输仍处于试验和探索阶段,其运输安全性尚未得到保证。因此,

CCUS 在生态环境保护上存在潜在威胁,主要集中在 CO_2 在运输和封存过程中的泄漏,一旦出现则对周边环境乃至生命安全产生严重影响。

4.4 核心技术有待提高

目前,中国 CCUS 在单纯的捕集和利用技术上与发达国家相差不大,但在商业化运作、全链工程、运输管道的材料、管网设计和安全监测等核心技术上与发达国家仍存在较大差距。这种差距主要表现在 CCUS 全流程示范工程规模化程度低,覆盖行业面窄,难以复制和缺乏经济效益等。例如现有 CCUS 示范项目主要集中于化工和电力行业,但在水泥和钢铁行业少有加装捕集设备且尚未开展集成化示范项目,相反国外则已在水泥和钢铁等难减排行业开展了类似阿联酋从钢铁厂排放的烟气中捕集 CO_2 并用于驱油的示范项目。不仅如此,中国看似幅员辽阔,封存潜力巨大,但地质结构复杂,人口稠密,因此存在技术标准和安全措施要求更高的难点。

4.5 碳交易系统尚需完善

尽管中国已经开始了碳排放权交易系统建设工作,但相比于欧盟等成熟碳交易市场,中国碳交易仍处于部分试点省份参与为主,其他地区碳市场未全部纳入全国碳交易系统的状态。同时,由于金融化程度和市场参与度不足,规模小且交易品种少,政策配套体系不够完善,缺乏具体的全行业指导政策,导致碳排放交易在全国其他行业推进缓慢,变相制约了中国 CCUS 商业化推广。不仅如此,在总量核定、碳定价和配额分配等碳交易核心机制方面尚不完善,各地方之间的经济总量、资源比重、工业程度、区域地质环境条件、管理水平和项目探索经验等差异明显,造成尚不能统筹全国碳市场的现状。总体而言,中国碳交易体系正处于初步发展阶段,对于激发市场活力,发挥碳减排抓手作用需尽快成熟。

5 意见与建议

当前中国 CCUS 从国内工程经验积累、技术研发加快、应用前景广阔、国际投资持续加大和研究广泛开展的情况来看,CCUS 技术作为中国今后应对温室效应的主要方向,已具备大规模推广的条件。因此逐步解决现存问题,建立系统的可复制、能推广的长效机制,CCUS 一定会迎来蓬勃发展,形成绿色发展新常态。

5.1 建立针对 CCUS 的完善法律法规和政策体系

政府部门制定的法律法规、行业标准、产业政策、规划设计对宏观指导 CCUS 推广发展中发挥着指挥棒作用。因此建议:①加快建立 CCUS 法律框架,在完善现有政策的基础上,制定 CCUS 相关产业

试行政策法规,例如封存选址用地办法、开发利用方案模板、台账管理制度、生态补偿办法与标准、生态环境监测目标、环境治理任务和资金保障、风险预警机制、紧急事故处理预案和安全事故责任认定与追责(包括跨界责任认定)等,一方面为项目建设运行提供约束和依据,另一方面为其提供法律基础经验,使 CCUS 技术法制化发展;②通过示范工程经验先行出台社会团体标准、地方标准和行业标准,让企业在 CO_2 捕集方式、捕集纯度、利用方式、管网设计、管道输送量、封存选址和封闭方式等方面有法可依,最终形成国家标准,使 CCUS 技术标准化发展;③建立项目审批和许可制度,明确项目的申请门槛,将全流程技术环节涉及到的内容统一纳入同一监管平台,将许可制度贯穿整个项目周期,使 CCUS 技术规范化发展;④参考发达国家出台的鼓励措施,例如美国的 45Q 法案,结合我国各地实际情况,制定条理清晰的优惠推进政策,包括优先投放建设用地指标、财政补贴专项基金、税费减免(所得税、增值税、设备购置税等)和多样化贷款融资渠道等,以此降低成本,减轻企业负担,使 CCUS 技术商业化发展。

5.2 建立跨部门、跨行业合作平台

CCUS 全流程项目涉及多个技术环节和行业部门,类似于中国在矿业领域推进的绿色矿山建设,仅靠某一部门或者企业、团体和高校,无法全面、有效和科学地进行监督管理和研发运行,因此应建立跨部门、跨行业合作平台进行协调与沟通。具体包括:①企业方面,作为实施 CCUS 工程的主体,特别是大型国有能源企业应将碳中和战略目标纳入企业中长期规划,在先行推广阶段主动投入,以宝贵的示范工程积累技术、商业和管理经验,并积极探索建立可以共享经验及成果的合作交流平台,例如技术工艺、减排效果、环境影响、经济效益、运行流程、风险监测和管控效果等,为其他相关企业提供借鉴,进而为国家制定相关政策提供依据;②政府方面,结合“双碳”目标,梳理各部门职能作用和范围,借鉴国外先进监管措施,取长补短加快推进制定空气、土壤、地下水、生态系统和安全风险等方面的监管体系,形成联席会制度,加强业务交叉沟通,形成合力共同提高监管效率、力度和覆盖面;③社会方面,积极鼓励社会团体和高校加入合作平台,主要负责开展校企合作和技术攻关,理论指导实践,实践反馈问题,实现理论与实践的相互验证、补充,形成全面的产学研深度融合。另外,在合作平台的基础上,还应建立可量化的评估体系,例如参照《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》

(2016~2018 年)^[73],分别对不同评价指标和不同技术进行量化赋分,各项评分结果不仅有助于政府部门进行针对性的奖励和惩罚,而且可以快速为企业和社会机构提供改进方向。

5.3 完善碳交易系统

借鉴欧盟、美国和韩国的碳交易系统,从实际国情出发,加快完善中国碳交易体系,具体包括:①完善碳交易市场顶层设计. 政府部门统筹开展全国能源行业碳排放总量核查工作,通过总量交易与区域交易相结合的方式,从地区经济、行业差异、技术措施、生产状态等方面合理确定配额分配比例,适时引入有偿配额发放机制,探索市场化运营和碳定价机制;②加强监管,激发内生动力. 一方面,对碳排放权划转、交易备案、供求信息、年度总量指标完成情况进行监督管理,形成问责机制,规范碳交易规则. 另一方面,出台激励政策,包括碳基金、抵押贷款、绿色融资等. 同时,扩大碳交易覆盖面,借鉴土地增减挂钩跨省交易模式,将西北地区植被换算成可供跨省交易的碳排放配额,既产生生态效益又丰富交易品种,从而引导各地区积极探索碳交易供给形式,激发市场活力。

5.4 建立环境影响评价机制

尽管 CCUS 技术的减排效果显著,但具有不确定性风险,其中最大隐患在于 CO₂ 封存和运输过程中的泄漏,可通过现有不同类型的示范工程经验,建立数字模型和分析处理系统,对各工程所在地的空气、植被、地形、土壤、水资源、储层温压、CO₂ 羽流状态(体积、温度、压力和逃逸)、生态系统和居民健康等进行监测,一方面为我国设计全面立体的环境监测机制提供探索经验,另一方面为我国建立 CCUS 环境风险防范体系和事故应急预案提供依据。

5.5 统筹发展,加强技术研发与国际合作

实现“碳达峰”和“碳中和”战略目标,CCUS 技术仅仅是其中的一项技术措施,同时还包括清洁能源发展、提高行业能效、源头减排和绿色经济转型等多个方面内容. 中国需立足实际国情,从可行性、持续性、经济性、技术性和安全性等角度综合考虑 CCUS 工程的战略布局和资源配置,因此①紧抓经济转型、产业升级和供给侧结构性改革的机遇,利用 CCUS 技术对水泥、钢铁、燃煤电厂和合成氨厂等现有设备进行加装改造,在因地制宜节约成本的基础上延缓设备使用寿命,同时调整能源结构,强化节能减排措施和绿色低碳的清洁能源技术,从源头减少碳排放量;②在明确技术路线图、战略定位和发展目标的基础上,继续加强 CCUS 技术研发和

CO₂ 的应用创新,围绕重点研究方向和技术弱点,例如富氧燃烧和管道运输,统筹安排重大科研任务和示范工程,探索形成 CCUS 与能效提升、终端节能、储能、氢能等交叉组合的发展模式,达到降低成本、降低污染、提高效率、增加收益的根本目的,从而掌握核心竞争力;③时刻关注、把握国际 CCUS 技术发展趋势,加强国际交流,将人才引进与国际化培养相结合,扩大国际企业建设准入,通过合作完善全流程示范经验、成熟碳交易系统和先行政策法规,加快推进中国 CCUS 技术发展;④向国际社会积极展示我国碳减排的责任担当和实际行动,以此促进 CCUS 纳入多边和双边合作机制,例如《京都议定书》的 CDM 合作机制^[74],协同推动构建人类命运共同体。

5.6 正确引导,大力宣传

CCUS 项目的推进过程实际是绿色发展理念的一种传播与推广. 建议充分利用“互联网+”理念,通过政策法规、文明标语和新闻媒体等不同平台和媒介,在国内正确宣传 CCUS 技术的目标、远景、经验和成效,引导各级政府、企业、群众认识到绿色转型发展是科学、持续、长久的过程,不能脱离国情实际,跃进式发展. 在此基础上,成立相应的行业中介组织,对各级人员进行相关知识培训和能力建设,发挥以点带面的辐射效应,使广大群众树立绿色发展人人有责,促使 CCUS 技术带来的环境效益、经济效益和品牌效益深入人心,形成良好的生态文明建设氛围。

6 结论

现阶段,尽管我国 CCUS 在政策、技术、示范工程 and 商业化运营中取得了飞跃式发展,但是作为一项新兴且具有重大环境效益潜力的技术,与发达国家相比尚未形成大规模和全行业发展的长效机制. 面对日益严峻的生态问题,只有加强顶层设计,加快高碳排放产业转型和能源结构改革,持续关注和鼓励 CCUS 技术的研究、发展和应用,才能尽早为我国可持续发展和生态文明体制改革提供有效利用手段,如期实现“碳达峰”和“碳中和”,进而有效应对全球环境安全问题。

参考文献:

- [1] IEA. Global energy review: CO₂ Emissions in 2020 [EB/OL]. <https://en.caixin.com/2021-03-03/101669908.html>, 2021-03-02.
- [2] 谢和平, 刘涛, 吴一凡, 等. CO₂ 的能源化利用技术进展与展望[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 145-156.
Xie H P, Liu T, Wu Y F, et al. Progress and prospect of CO₂ energy utilization technology [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 145-156.

- [3] IEA. Explore energy data by category, indicator, country or region [EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser>, 2021-03-02.
- [4] 许毛, 张贤, 樊静丽, 等. 我国煤制氢与 CCUS 技术集成应用的现状、机遇与挑战[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 659-666.
Xu M, Zhang X, Fan J L, *et al.* Status quo, opportunities and challenges of integrated application of coal-to-hydrogen and CCUS technology in China [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 659-666.
- [5] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.
Sun X D, Zhang L X, Zhang B. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-6.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm, 2020-09-23.
- [7] 梁锋. 碳中和目标下碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展[J]. 能源化工, 2021, 42(5): 19-26.
Liang F. Development of carbon capture, utilization and storage (CCUS) under the carbon neutrality targets [J]. Energy Chemical Industry, 2021, 42(5): 19-26.
- [8] 刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施[J]. 阅江学刊, 2021, 13(2): 48-60.
Liu C S. Scientific connotation, construction path and policy measures of carbon neutrality [J]. Yuejiang Academic Journal, 2021, 13(2): 48-60.
- [9] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [10] 谢和平, 谢凌志, 王昱飞, 等. 全球二氧化碳减排不应是 CCS, 应是 CCU [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 1-5.
Xie H P, Xie L Z, Wang Y F, *et al.* CCU: a more feasible and economic strategy than CCS for reducing CO₂ emissions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 1-5.
- [11] 谢和平, 刘虹, 吴刚. 中国未来二氧化碳减排技术应向 CCU 方向发展[J]. 中国能源, 2012, 34(10): 15-18.
Xie H P, Liu H, Wu G. China's carbon dioxide emissions technology should be developed in the direction of CCU [J]. Energy of China, 2012, 34(10): 15-18.
- [12] 刘燕华, 葛全胜, 何凡能, 等. 应对国际 CO₂ 减排压力的途径及我国减排潜力分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 675-682.
Liu Y H, Ge Q S, He F N, *et al.* Countermeasures against international pressure of reducing CO₂ emissions and analysis on China's potential of CO₂ emission reduction [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 675-682.
- [13] 张雷, 黄园渐, 李艳梅, 等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 211-217.
Zhang L, Huang Y X, Li Y M, *et al.* An investigation on spatial Changing pattern of CO₂ emissions in China [J]. Resources Science, 2010, 32(2): 211-217.
- [14] 韩文科, 杨玉峰, 苗韧, 等. 当前全球碳捕集与封存(CCS)技术进展及面临的主要问题[J]. 中国能源, 2009, 31(10): 5-6, 45.
Han W K, Yang Y F, Miao R, *et al.* The progress and main problems of the present global Carbon Capture and Storage(CCS) technology [J]. Energy of China, 2009, 31(10): 5-6, 45.
- [15] 张慧明, 周德群, 曹杰, 等. 温室气体减排技术研究进展[J]. 中国科技论坛, 2011, (9): 104-109, 120.
Zhang H M, Zhou D Q, Cao J, *et al.* Research progress of reducing greenhouse gas emissions [J]. Forum on Science and Technology in China, 2011, (9): 104-109, 120.
- [16] Xie H P, Wang Y F, Chu W, *et al.* Mineralization of flue gas CO₂ with coproduction of valuable magnesium carbonate by means of magnesium chloride [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(23): 2882-2889.
- [17] Xie H P, Liu T, Hou Z M, *et al.* Using electrochemical process to mineralize CO₂ and separate Ca²⁺/Mg²⁺ ions from hard water to produce high value-added carbonates [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 6881-6890.
- [18] Xie H P, Wang J L, Hou Z M, *et al.* CO₂ sequestration through mineral carbonation of waste phosphogypsum using the technique of membrane electrolysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(17), doi: 10.1007/s12665-016-6009-3.
- [19] 范英, 朱磊, 张晓兵. 碳捕获和封存技术认知、政策现状与减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 362-369.
Fan Y, Zhu L, Zhang X B. An analysis on carbon capture and storage technology, regulations and its emission reduction potential [J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(5): 362-369.
- [20] 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 X, Li Y, Ma Q, *et al.* Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70-80.
- [21] 韩永嘉, 王树立, 张鹏宇, 等. CO₂ 分离捕集技术的现状与进展[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 79-82.
Han Y J, Wang S L, Zhang P Y, *et al.* Current status and advances in CO₂ separation and capture technology [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 79-82.
- [22] 田贺永, 王万福, 王任芳, 等. 二氧化碳捕集技术研究[J]. 能源环境保护, 2012, 26(6): 39-41, 35.
Tian H Y, Wang W F, Wang R F, *et al.* Carbon dioxide capture technology research [J]. Energy Environmental Protection, 2012, 26(6): 39-41, 35.
- [23] 陈新明, 史绍平, 闫姝, 等. 燃烧前 CO₂ 捕集技术在 IGCC 发电中的应用[J]. 化工学报, 2014, 65(8): 3193-3201.
Chen X M, Shi S P, Yan S, *et al.* Application of CO₂ capture technology before burning in IGCC power generation system [J]. CIESC Journal, 2014, 65(8): 3193-3201.
- [24] Bui M, Adjiman C, Bardow A, *et al.* Carbon capture and storage (CCS): the way forward [J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1062-1176.
- [25] 王美霞, 王红. 燃烧后 CO₂ 捕集技术研究[J]. 山西化工, 2014, 34(4): 25-28.
Wang M X, Wang H. Review on post-combustion carbon dioxide capture technologies [J]. Shanxi Chemical Industry, 2014, 34(4): 25-28.
- [26] 高腾飞, 常超, 杨阳, 等. 碳捕集变压吸附技术工艺及吸附材料研究进展[J]. 辽宁化工, 2020, 49(11): 1389-1394.
Gao T F, Chang C, Yang Y, *et al.* Research progress of pressure swing adsorption technology and adsorption materials for carbon capture [J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(11): 1389-1394.
- [27] 翟明洋, 林千果, 马丽, 等. 电力行业碳捕集现状和发展趋势[J]. 环境科技, 2014, 27(2): 65-69.
Qu M Y, Lin Q G, Ma L, *et al.* Current status and development

- of carbon capture in power generation industry [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **27**(2): 65-69.
- [28] 任昕, 张引弟, 刘畅, 等. O_2/CO_2 气氛中水蒸气预混 CH_4 燃烧特性与烟气余热梯级利用方案[J]. *过程工程学报*, 2019, **19**(5): 1047-1056.
- Ren X, Zhang Y D, Liu C, *et al.* Combustion characteristics of steam premixed CH_4 in O_2/CO_2 atmosphere and cascade utilization process of flue gas waste heat[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2019, **19**(5): 1047-1056.
- [29] 薛博, 刘勇, 王沉, 等. 碳捕获、封存与利用技术及煤层封存 CO_2 研究进展[J]. *化学世界*, 2020, **61**(4): 294-297.
- Xue B, Liu Y, Wang C, *et al.* Progress on carbon capture, storage and utilization technology and coal seam CO_2 storage[J]. *Chemical World*, 2020, **61**(4): 294-297.
- [30] 高洁, 赵国彦. 磷石膏再结晶体力学特性试验研究[J]. *矿冶工程*, 2013, **33**(2): 18-21, 26.
- Gao J, Zhao G Y. Experimental research on mechanical properties of recrystallized solid of phosphogypsum[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, **33**(2): 18-21, 26.
- [31] 谢和平, 王昱飞, 储伟, 等. 氯化镁矿化利用低浓度烟气 CO_2 联产碳酸镁[J]. *科学通报*, 2014, **59**(19): 1797-1803.
- Xie H P, Wang Y F, Chu W, *et al.* Mineralization of flue gas CO_2 with coproduction of valuable magnesium carbonate by means of magnesium chloride[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(23): 2882-2889.
- [32] 赵思琪, 马丽萍, 杨杰, 等. CO_2 捕集的研究现状及钙基吸收剂的应用[J]. *硅酸盐通报*, 2017, **36**(11): 3683-3690.
- Zhao S Q, Ma L P, Yang J, *et al.* Review and research status of CO_2 capture technology and the application of calcium-based sorbent[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, **36**(11): 3683-3690.
- [33] 岑可法. 煤炭高效清洁低碳利用研究进展[J]. *科技导报*, 2018, **36**(10): 66-74.
- Cen K F. Research progress on efficient, clean and low carbon utilization of coal[J]. *Science & Technology Review*, 2018, **36**(10): 66-74.
- [34] 赵红涛, 王树民, 刘志江, 等. 磷石膏矿化固定 CO_2 制备高纯高白 $CaCO_3$ [J]. *材料导报*, 2019, **33**(18): 3031-3034, 3042.
- Zhao H T, Wang S M, Liu Z J, *et al.* Preparation of high-purity and high-white $CaCO_3$ by phosphogypsum mineralization for CO_2 Capture[J]. *Materials Reports*, 2019, **33**(18): 3031-3034, 3042.
- [35] Crespi F, Gavagnin G, Sánchez D, *et al.* Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: a review [J]. *Applied Energy*, 2017, **195**: 152-183.
- [36] Takechi K, Shiga T, Asaoka T. A $Li-O_2/CO_2$ battery [J]. *Chemical Communications*, 2011, **47**(12): 3463-3465.
- [37] Lim H K, Lim H D, Park K Y, *et al.* Toward a lithium-“air” battery: the effect of CO_2 on the chemistry of a lithium-oxygen cell[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, **135**(26): 9733-9742.
- [38] Xie Z J, Zhang X, Zhang Z, *et al.* Metal- CO_2 batteries on the road: CO_2 from contamination gas to energy source[J]. *Journal of Technology & Science*, 2017, **29**(15): 693-696.
- [39] Xu S M, Das S K, Archer L A. The $Li-CO_2$ battery: a novel method for CO_2 capture and utilization [J]. *RSC Advances*, 2013, **3**(18): 6656-6660.
- [40] Cai F S, Hu Z, Chou S L. Progress and future perspectives on Li (Na)- CO_2 batteries[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2018, **2**(8-9), doi: 10.1002/adsu.201800060.
- [41] Kim C, Kim J, Joo S, *et al.* Efficient CO_2 utilization via a hybrid Na- CO_2 system based on CO_2 dissolution[J]. *iScience*, 2018, **9**: 278-285.
- [42] Liu Y, Li Y W, Chen Y Z, *et al.* A CO_2/H_2 fuel cell: reducing CO_2 while generating electricity [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, **8**(17): 8329-8336.
- [43] Hamelers H V M, Schaetzle O, Paz-Garcia J M, *et al.* Harvesting energy from CO_2 emissions [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, **1**(1): 31-35.
- [44] Kim T, Logan B E, Gorski C A. A pH-gradient flow cell for converting waste CO_2 into electricity[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2017, **4**(2): 49-53.
- [45] Li K K, Jiang K Q, Jones T W, *et al.* CO_2 regenerative battery for energy harvesting from ammonia-based post-combustion CO_2 capture[J]. *Applied Energy*, 2019, **247**: 417-425.
- [46] Xie H P, Wang Y F, He Y, *et al.* Generation of electricity from CO_2 mineralization: principle and realization[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, **57**(12): 2335-2343.
- [47] 张晓暄. 二氧化碳捕集与封存的国际法律制度研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Zhang X X. A study on the CCS international legal system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [48] 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 F, Li X C, Liu M, *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.
- [49] 宋锡祥, 高大力. 论英国《气候变化法》及其对我国的启示[J]. *上海大学学报(社会科学版)*, 2011, **18**(2): 87-98.
- Song X X, Gao D L. Comment on the climate change law in the UK and its revelation to China [J]. *Journal of Shanghai University (Social Sciences)*, 2011, **18**(2): 87-98.
- [50] 郭基伟, 李琼慧, 周原冰. 《2009 年美国清洁能源与安全法案》及对我国的启示[J]. *能源技术经济*, 2010, **22**(1): 11-14.
- Guo J W, Li Q H, Zhou Y B. The American clean energy and security act of 2009 and its enlightenments to China[J]. *Energy Technology and Economics*, 2010, **22**(1): 11-14.
- [51] 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 X, Huang Y, Liao C P. Review and analysis of CCS policies in domestic and overseas[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2014, **2**(2): 157-163.
- [52] 仲平, 彭斯震, 张九天, 等. 发达国家碳捕集、利用与封存技术及其启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, **22**(4): 25-28.
- Zhong P, Peng S Z, Zhang J T, *et al.* Carbon capture utilization and storage technology development in developed countries and inspirations to China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, **22**(4): 25-28.
- [53] 周洪, 魏凤, 李小春, 等. CCS 工程实施利益相关方间关联性法规剖析[J]. *科技管理研究*, 2014, **34**(18): 206-212.
- Zhou H, Wei F, Li X C, *et al.* Analysis on relevance traits among stakeholders of CCS projects and their regulations[J]. *Science and Technology Management Research*, 2014, **34**(18): 206-212.
- [54] 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.
- [55] GCCSI. Global status of CCS 2021[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2021.

- [56] 李布. 欧盟碳排放交易体系的特征、绩效与启示[J]. 重庆理工大学学报(社会科学版), 2010, **24**(3): 1-5.
Li B. Characteristics, performances and enlightenments of the EU carbon emissions trading scheme[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Social Science), 2010, **24**(3): 1-5.
- [57] 荣佳, 彭勃, 刘琦, 等. 碳市场对碳捕集、利用与封存产业化发展的影响[J]. 热力发电, 2021, **50**(1): 43-46.
Rong J, Peng B, Liu Q, *et al.* Influence of carbon market on carbon capture, utilization and storage industrialization development[J]. Thermal Power Generation, 2021, **50**(1): 43-46.
- [58] 张忠利. 韩国碳排放交易法律及其对我国的启示[J]. 东北亚论坛, 2016, **25**(5): 50-62.
Zhang Z L. Legislation of carbon emission trading in republic of Korea and its inspiration for China[J]. Northeast Asia Forum, 2016, **25**(5): 50-62.
- [59] 程一步, 孟宪玲. 我国碳减排新目标实施和 CCUS 技术发展前景分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2016, **1**(2): 4-11, 23.
Cheng Y B, Meng X L. Prospects of new carbon reduction target and CCUS technology in China [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2016, **1**(2): 4-11, 23.
- [60] 李志清, 顾磊. 我国 CCUS 发展现状研究及国际经验借鉴[J]. 金融纵横, 2021, (10): 49-56.
Li Z Q, Gu L. Development status of CCUS in China and international experience reference [J]. Financial Perspectives Journal, 2021, (10): 49-56.
- [61] 中国二氧化碳地质封存环境风险研究组. 中国二氧化碳地质封存环境风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [62] 姜大霖. 应对气候变化背景下中美煤炭清洁高效利用技术路径对比与合作前景[J]. 中国煤炭, 2020, **46**(11): 128-133.
Jiang D L. Cooperation prospect and technological path comparison on clean and high efficient utilization of coal in China and the United States under the background of responding to climate change[J]. China Coal, 2020, **46**(11): 128-133.
- [63] 王扬. 我国碳捕获、利用与封存(CCUS)法律制度研究[D]. 兰州: 甘肃政法大学, 2017.
Wang Y. Study on carbon capture, utilization and storage (CCUS) legal system in China[D]. Lanzhou: Gansu University of Political Science and Law, 2017.
- [64] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(11): 1-25.
- [65] 沈平平, 江怀友. 温室气体提高采收率的资源化利用及地下埋存[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(5): 54-59.
Shen P P, Jiang H Y. Utilization of greenhouse gas as resource in EOR and storage it underground [J]. Engineering Science, 2009, **11**(5): 54-59.
- [66] 蔡博峰, 李琦, 张贤. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国 CCUS 研究路径[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [67] 秦积舜, 李永亮, 吴德斌, 等. CCUS 全球进展与中国对策建议[J]. 油气地质与采收率, 2020, **27**(1): 20-28.
Qin J S, Li Y L, Wu D B, *et al.* CCUS global progress and China's policy suggestions [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, **27**(1): 20-28.
- [68] 张贤. 碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景[J]. 可持续发展经济导刊, 2020, (12): 22-24.
Zhang X. The application prospect of CCUS in China under the target of carbon neutrality [J]. China Sustainability Tribune, 2020, (12): 22-24.
- [69] 段茂盛, 吴力波, 齐绍洲, 等. 中国碳市场发展报告——从试点走向全国[M]. 北京: 人民出版社, 2018.
- [70] 朱妍. 碳市场基础建设正啃“硬骨头”[N]. 中国能源报, 2018-06-18.
- [71] 陈波. 论我国碳市场金融化的监管困境及其制度完善[J]. 证券市场导报, 2017, (9): 69-78.
Chen B. Dilemma and improvement for the regulation of financialized Chinese carbon market [J]. Securities Market Herald, 2017, (9): 69-78.
- [72] 谢和平, 刘虹, 吴刚. 中国未来二氧化碳减排技术应向 CCU 方向发展[J]. 中国能源, 2012, **34**(10): 15-18.
Xie H P, Liu H, Wu G. China's carbon dioxide emissions technology should be developed in the direction of CCU [J]. Energy of China, 2012, **34**(10): 15-18.
- [73] 刘桂臻, 李琦, 周同, 等. 《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》在胜利油田驱油封存项目上的应用初探[J]. 环境工程, 2018, **36**(2): 42-47, 53.
Liu G Z, Li Q, Zhou J, *et al.* Discussion on application of “technical guideline on environmental risk assessment for carbon dioxide capture, utilization and storage (on trial)” in Sinopec Shengli CO₂-eor project[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(2): 42-47, 53.
- [74] 高帅, 李梦宇, 段茂盛, 等. 《巴黎协定》下的国际碳市场机制: 基本形式和前景展望[J]. 气候变化研究进展, 2019, **15**(3): 222-231.
Gao S, Li M Y, Duan M S, *et al.* International market mechanisms under Paris Agreement: basic form and future prospects[J]. Climate Change Research, 2019, **15**(3): 222-231.

CONTENTS

Variations in PM _{2.5} Composition and Sources During 2020-2021 COVID-19 Epidemic Periods in Nanjing	HUA Nan, SHANG Yue, XIE Ming-jie	(593)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou City	ZHANG Jun-mei, CHEN Shi-lin, WANG Qian-heng, <i>et al.</i>	(602)
Meteorological Characteristics, Influence Analysis and Prediction of PM _{2.5} Concentration in Taiyuan City	LI Ming-ming, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(611)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Carbon and Nitrogen Components in Ambient PM _{2.5} in Huangshi City	WANG Ci-mou, DENG Meng-jie, CHEN Yu, <i>et al.</i>	(626)
Simulation Evaluation of the Contribution of Typical PM _{2.5} Pollution and Trans-regional Transport to Ningbo Pollution in the Yangtze River Delta	PAN Yong, ZHENG Jie, XIAO Hang	(634)
Composition Characteristics and Sources of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} in the Background Atmosphere of Yangtze River Delta	WU Chang-liu, CAO Fang, JIA Xiao-fang, <i>et al.</i>	(646)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} and Its Light-scattering Properties with Different Chemical Compositions in Urban Area of Beijing	CAO Yang, WANG Chen-jing, JING Kuan, <i>et al.</i>	(658)
Impacts of Emission and Meteorological Conditions on Air Pollutants at Various Sites Around the COVID-19 Lockdown in Wuhan	XIONG Jiang-he, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(670)
Analysis of the Impact of Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in Chengdu from 2019 to 2022	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i>	(680)
Ambient VOCs Characteristics and Reactivity During O ₃ Pollution in Autumn in Urban Beijing	SUN Xue-song, ZHANG Rui, WANG Yu, <i>et al.</i>	(691)
Variation Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs at Multi-sites in Zhengzhou	WANG Bing, YIN Sha-sha, HUANG Ai-zhi, <i>et al.</i>	(699)
Chemical Composition of VOCs from Service Stations Vapor Processing Device and Associated Contributions to Secondary Pollution	HU Wei, HUANG Yu-hu, LIANG Wen-jun, <i>et al.</i>	(709)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Population Health Benefit Assessment in the Yangtze River Delta Region from 2017 to 2020	CHENG Yu-kai, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i>	(719)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Gas Pollutants in Typical Pesticide Manufacturing Enterprises	ZHAI Zeng-xiu, XIAO Xian-de, MENG Jie, <i>et al.</i>	(730)
Characteristics and Driving Factors of Hydrochemical Evolution in Tuochangjiang River Basin, Western Guizhou Province	TU Chun-lin, YANG Run-bai, MA Yi-qi, <i>et al.</i>	(740)
Hydrochemical and Isotopic Evidence for Groundwater Conversion of Surface Water in Alpine Arid Areas: A Case Study of the Datong River Basin	YI Bing, LIU Jing-tao, LÜ Xiao-li, <i>et al.</i>	(752)
Identification of Nitrate Source of Surface Water in a Typical Peri-urban Watershed in the Tableland of the Loess Plateau, China	LI Huan-wei, ZHAO Guang-ju, LI Ming, <i>et al.</i>	(761)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Middle and Upper Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(770)
Enrichments, Migrations, and Conversions of Heavy Metal in the Soil/Sediment-Plant System Towards the Lake in Typical Poyang Lake Wetland	ZENG Huan, ZHANG Hua, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(781)
Analysis of Heavy Metal Sources in Groundwater and Assessment of Health Risks: An Example from the Southwest Sub-basin of the Shiqi River	FU Rong-jie, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(796)
Analysis on Contamination Characteristics, Pollution Source Identification and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of Groundwater in a Large Coking Plant Site of Province	ZHANG Qian-qian, XING Jin-bing, WANG Hui-wei, <i>et al.</i>	(807)
Dynamic Monitoring and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Poyang Lake Basin	TIAN Zhi-hui, YIN Chuan-xin, WANG Xiao-lei	(816)
Effects of Sediment Dredging on the Reduction in Sediment Internal Loading of Lake Taihu and the Self-recovery Ability of Benthic Organism	ZHANG Jian-hua, YIN Peng, ZHANG Lei, <i>et al.</i>	(828)
Biogeographic Distribution Patterns and Ecological Mechanisms of Benthic Eukaryotic Microorganisms in Jinsha River	CUI Ge, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i>	(839)
Bacterial Community Structure and the Prediction of Metabolic Function in Landscape Lake Water in Xi'an	WANG Min, ZHANG Yu-tong, HUANG Chen, <i>et al.</i>	(847)
Impounding Impacts of the Three Gorges Reservoir on Phytoplankton Function Groups and Its Relationship with Resource Use Efficiency	ZHAO Lu, OUYANG Tian, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(857)
Effects of Fertilization and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Loss in Chengdu Plain	WANG Hong, YAO Li, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(868)
Efficiency and Mechanism of O ₃ -SBBR Combined Process for Advanced Treatment of Biochemical Effluent from Printing and Dyeing Industrial Park	LUO Xin-hao, HU Yong-you, CHEN Yuan-cai, <i>et al.</i>	(878)
Analysis of Microbial Community Characteristics and Function Prediction of MBBR with Magnetic Biocarriers at Low Temperature	LIU Chao, LI Qi, SONG Zi-yang, <i>et al.</i>	(889)
Detecting Influencing Factor of Vegetation NPP in Southwest China Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, HUANG Wen-ting, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i>	(900)
Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon Density in Yellow River Basin Based on MGWR Model	NAN Fu-sen, LI Zong-xing, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i>	(912)
Coupling Relationship Between Soil Functions and Environmental Factors Along an Altitudinal Gradient: A Case Study of the Meili Mountain	ZHAO Dong-hui, SHEN Cong-cong, ZHANG Zhi-ming, <i>et al.</i>	(924)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil on the South of Dongting Lake	XIAO Kai-qi, XU An, GUO Jun, <i>et al.</i>	(932)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils of Different Land Use Types in Nanjing Suburbs	ZHANG Xiu-xiu, ZHU Chang-da, WANG Fei, <i>et al.</i>	(944)
Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Ecological Stoichiometry in Vegetable Fields and Orchard in the Coastal Area of Fuzhou	HOU Ning, HEI Jie, JIN Qiang, <i>et al.</i>	(954)
Preparation of Iron-modified Biochar and Its Application in Arsenic Contaminated Soil Remediation	WEI Jing, LIU Yi-han, TU Chen, <i>et al.</i>	(965)
Mn/Al-layered Double Oxide-loaded Biochar Reduced the Toxic Effects of Heavy Metals on Ryegrass in Soil	LIN Peng-cheng, YIN Hua, LIU Xiao-fei, <i>et al.</i>	(975)
Effect of Zinc Fertilizer Application on Cadmium Accumulation in Wheat Grain and Its Application Risk	NIU Shuo, WANG Tian-qi, YANG Yang, <i>et al.</i>	(984)
Primary Factors Affecting Soil Bioavailable Cadmium and Arsenic by Different Properties of Silicon Fertilizer	HUANG Rui, WEI Wei, XIE Yun-he, <i>et al.</i>	(991)
Availability Changes in Different Exogenous Selenium Fertilizers in Soil and Their Effects on Selenium Accumulation in Wheat	WEI Wei, LI Ping, ZHOU Zhi-gao, <i>et al.</i>	(1003)
Effects of pH, Calcium, and Phosphate on the Solubility of Arsenic in Paddy Soil Based on Surface Complexation Modeling	DENG Ying-xuan, WENG Li-ping, ZHU Gui-fen, <i>et al.</i>	(1012)
Effects of Sulfamethazine in Soil on Rice Growth	ZHANG Wei, WANG Pei-fang, JIN Qiu-tong, <i>et al.</i>	(1021)
Determination and Traceability Analysis of Phthalic Acid Esters in Garlic (<i>Allium stipum</i> L.) from Jiangsu Province, China	WANG Ya, XIAO Xia-xia, YANG Yun, <i>et al.</i>	(1029)
Dissolved Ion Concentrations and Isotope Values in Agricultural Fertilizer Locally Applied in Henan Province	ZHANG Dong, XUE Tian, QIN Yong, <i>et al.</i>	(1040)
Component Properties and Heavy Metal Accumulation Characteristics of Contaminated Rice Straw Biochar During Oxygen-controlled Pyrolysis	XU Zhi, GUO Zhao-hui, XU Rui, <i>et al.</i>	(1051)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Microbial Diversity and Community Structure in the Agro-pastoral Ecotone	GAO Ri-ping, DUAN Yu, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(1063)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer Application on Bacterial Community Structure in Rhizosphere/Non-Rhizosphere Soil of Lemon	DENG Zheng-xin, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(1074)
Effects of Different Topdressing Nitrogen Rates on Soil Fungal Community Structure and Ecological Network in Wheat Field Under Crop Residue Retention	JIN Hai-yang, YAN Ya-qian, ZHANG De-qi, <i>et al.</i>	(1085)
Effect of Deep Vertical Rotary Tillage on Soil Bacterial Community Diversity and Microbial Network Structure in Cultivated Land	XIA Wan-yu, CHEN Yan-yun	(1095)
Revealing the Effect of Saline Water Drip Irrigation on Soil Microorganisms in Cotton Fields Based on Metagenomics	DU Si-yao, CHEN Jing, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(1104)
Coal-carbon-pollutant Coordinated Control of Coal Chemical Industry Under Carbon Peak and Carbon Neutrality Constraints	ZHANG Hong-yu, WANG Yuan, HAO Cheng-jiang, <i>et al.</i>	(1120)
Under Goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: Status, Problems, and Suggestions of CCUS in China	ZHAO Zhen-yu, YAO Shun, YANG Shuo-peng, <i>et al.</i>	(1128)
Research Progress on CO ₂ Capture, Utilization, and Storage of Fly Ash	JIANG Long, HE Chuan, LI Jin-jing	(1139)
Temporal and Spatial Distribution, Utilization Status, and Carbon Emission Reduction Potential of Straw Resources in China	YANG Chuan-wen, XING Fan, ZHU Jian-chun, <i>et al.</i>	(1149)
N ₂ O Emission from the Processes of Wastewater Treatment: Mechanisms and Control Strategies	HAO Xiao-di, HONG Zhen-li, YU Wen-bo, <i>et al.</i>	(1163)
Systematic Evaluation of Low-carbon Operation of Typical A ² O Processes in Municipal Sewage Plant	MENG Hong-qi, LI Hong-xia, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i>	(1174)
Comparison of Carbon Emissions in Different Treatment and Disposal Process Routes of Municipal Sludge	LI Zhe-kun, ZHANG Li-qiu, DU Zi-wen, <i>et al.</i>	(1181)
Evaluation and Optimization of Rural Sewage Treatment Technologies in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on Group Decision Making and Analytic Hierarchy Process	LIU Lu, ZHANG Wen-qiang, HU Fei-chao, <i>et al.</i>	(1191)