

# 碳捕集利用与封存技术发展和应用

曹义杰<sup>1,2</sup>, 张建良<sup>1</sup>, 李彦鑫<sup>2</sup>

- (1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083;  
2. 内蒙古包钢低碳产业科技发展有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章系统阐述了不同的碳捕集技术、CO<sub>2</sub> 的利用途径、CO<sub>2</sub> 封存技术、CCUS 示范项目和商业应用以及面临的挑战和方向。介绍了多种碳捕集技术, 包括吸收法、吸附法、膜分离法以及其他新兴技术, 并通过分析它们的原理、优势和缺点, 评估其工业规模应用的可行性; 探讨涵盖化学转化、燃料生产、矿物碳化和农业应用等领域的 CO<sub>2</sub> 利用途径, 讨论不同技术对环境保护和低碳经济的影响。最后对 CO<sub>2</sub> 地下封存和海洋封存等技术进行了阐述。

**关键词:** 碳捕集利用与封存; 减少碳排放; 缓解温室效应

中图分类号: X701

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)04-0019-06

## Development and Applications of Carbon Capture, Utilization and Storage Technologies

Cao Yi-jie<sup>1,2</sup>, Zhang Jian-liang<sup>1</sup>, Li Yan-xin<sup>2</sup>

- (1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia Baotou Steel Low Carbon Industry Science and Technology Development Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this article, the different carbon capture technologies, utilization ways and storage technologies of CO<sub>2</sub>, demonstration projects and commercial applications of CCUS as well as the challenges facing and development directions are systematically elaborated. Moreover, various carbon capture technologies including the absorption method, adsorption method, membrane separation and other emerging technologies are introduced as well as their feasibility of industrial-scale applications is evaluated by analyzing their principles, advantages and disadvantages; the utilization ways of CO<sub>2</sub> covering such fields as the chemical conversion, fuel production, mineral carbonization and agricultural applications as well as the impacts of different technologies on environmental protection and low carbon economy are discussed. Finally, such technologies as underground storage and ocean storage of CO<sub>2</sub> are elaborated.

**Key words:** carbon capture, utilization and storage; reduce carbon emissions; mitigation of greenhouse effect

气候变化是当前全球面临的最严峻挑战之一<sup>[1]</sup>。随着工业化和人口增长, 温室气体的排放不

断增加, 导致地球的气候发生了重大变化。二氧化碳(CO<sub>2</sub>)作为主要的温室气体, 对全球气候变化起

着关键作用。过量的 CO<sub>2</sub> 排放导致了气温升高、极端天气事件增多以及海平面上升等问题,对人类社会、经济和环境造成了严重影响<sup>[2]</sup>。在解决气候变化问题的过程中,减少温室气体的排放是首要任务。然而,由于能源需求的增长和对传统能源的依赖,减排面临许多挑战和限制。因此,必须寻找创新的解决方案来降低 CO<sub>2</sub> 的排放,并同时满足能源需求。

碳捕集利用与封存(CCUS)作为应对气候变化的关键技术之一,提供了一种可行的途径<sup>[3]</sup>。CCUS 包括三个关键步骤:碳捕集、利用和封存<sup>[4]</sup>。首先,碳捕集是将 CO<sub>2</sub> 从工业排放源、发电厂或空气捕集出来的过程。它涉及各种技术,如化学吸收、物理吸收、吸附和膜分离等。这些技术可以有效地捕集 CO<sub>2</sub>,并减少其进入大气的量。其次,利用被捕集的 CO<sub>2</sub> 是 CCUS 的另一个重要环节。利用方式包括化学转化、燃料生产、矿物碳化和农业应用等。通过这些利用途径,CO<sub>2</sub> 可以被转化为有价值的化学品、燃料以及用于增强石油采出等。第三,CO<sub>2</sub> 封存是将捕集的 CO<sub>2</sub> 储存到地下或海洋中<sup>[5]</sup>,防止其再次释放到大气中。地下封存主要涉及盖层岩封存和盖层与储层协同封存,而海洋封存则包括深海封存和海底沉积物封存。

CCUS 在解决气候变化问题上具有重要意义。首先,它能够显著降低 CO<sub>2</sub> 排放,减缓气候变化的速度。其次,CCUS 还可以实现 CO<sub>2</sub> 的循环利用,将其转化为有用的产品和资源,促进可持续发展和经济增长<sup>[6]</sup>。此外,CCUS 技术也能为传统能源行业提供过渡解决方案,使其向低碳经济转型更加平稳。

## 1 碳捕集利用与封存

### 1.1 碳捕集技术

碳捕集是 CCUS 过程中的关键环节,它涉及将 CO<sub>2</sub> 从工业排放源、发电厂或空气捕集出来。这一部分介绍各种碳捕集技术。

#### 1.1.1 吸收法

吸收法是最常用的碳捕集技术之一<sup>[7]</sup>,它通过将 CO<sub>2</sub> 溶解在溶剂中来实现捕集<sup>[8]</sup>。最常见的溶剂是胺类化合物,如 Mono Ethanol Amine (MEA)。MEA 具有较高的 CO<sub>2</sub> 吸收能力,可以有效地从燃煤发电厂等大规模排放源中捕集 CO<sub>2</sub>。该技术的基本原理是通过将烟气与溶剂接触,使 CO<sub>2</sub> 被吸收并形成可回收的化合物。随后,通过加热和蒸馏等步骤,可以释放出纯净的 CO<sub>2</sub> 并重新利用溶剂。尽管吸

收法在实践中被广泛采用,但它面临着一些挑战,如吸收过程的加热和再生反应需要大量的能源消耗、溶剂的损耗和腐蚀等问题都有待解决<sup>[9]</sup>。

#### 1.1.2 吸附法

吸附法是利用固体吸附剂来捕集 CO<sub>2</sub>。常见的吸附剂包括活性炭、金属有机骨架(MOFs)和多孔介质<sup>[10]</sup>等。这些吸附剂具有较大的表面积和可调控的孔隙结构,能够有效地吸附 CO<sub>2</sub> 分子。在吸附过程中,烟气中的 CO<sub>2</sub> 会与吸附剂表面发生物理或化学吸附反应。通过调节温度和压力等条件,可以实现 CO<sub>2</sub> 分离和回收。吸附法具有许多优点,如低能耗、灵活性和较小的设备尺寸。此外,吸附剂还可以通过再生循环使用,提高了其经济性和可持续性。

#### 1.1.3 膜分离法

膜分离法是利用半透膜来实现 CO<sub>2</sub> 的分离和捕集。半透膜是一种具有特定大小孔隙的材料,可以选择性地允许 CO<sub>2</sub> 分子通过而阻止其他气体分子的传输。膜分离技术根据不同的分离机制可以分为溶液中溶解性物质的分离和差异扩散。前者基于 CO<sub>2</sub> 在膜材料中溶解度的差异,后者则依赖于 CO<sub>2</sub> 与其他气体分子之间速率的差异<sup>[11]</sup>。膜分离法具有简单、紧凑和能耗低的特点,它适用于小规模排放源和空气中的 CO<sub>2</sub> 捕集。然而,膜分离技术在高压、高温和含有其他成分的烟气的应用仍面临一些挑战,如膜的稳定性和选择性。

#### 1.1.4 其他新兴技术

除了传统的碳捕集技术,还有一些新兴技术正在发展和研究中。这些包括电化学 CO<sub>2</sub> 捕集、生物吸收和催化转化等。

电化学 CO<sub>2</sub> 捕集利用电解过程,将 CO<sub>2</sub> 转化为有价值的产物或将其封存。这种技术具有高选择性和低能耗的优势,但目前仍面临着工业规模应用的挑战。

生物吸收利用微生物或植物来吸收和固定 CO<sub>2</sub>。通过调节生物体的代谢途径,可以将 CO<sub>2</sub> 转化为有机物质或沉积为生物质<sup>[12]</sup>。生物吸收技术具有天然、可持续和环境友好的特点,但目前在工业应用方面还需要进一步研究和开发。

催化转化是将 CO<sub>2</sub> 转化为有用化学品或燃料。通过使用催化剂,CO<sub>2</sub> 可以与其他化合物发生反应,形成高附加值的产物。这种技术具有资源回收和碳循环利用的潜力,但当前仍面临催化剂活性和选择性的改进难题。

总结起来,碳捕集技术包括吸收法、吸附法、膜分

离法以及一些新兴技术如电化学 CO<sub>2</sub> 捕集、生物吸收和催化转化等。这些技术各有优势和限制,需要综合考虑经济性、能耗、设备规模 and 环境影响等因素进行选择 and 优化。随着对碳减排需求的不断增加,通过进一步研究和创新,碳捕集技术将在未来发挥更大的作用,并为实现可持续发展目标做出重要贡献。

## 1.2 CO<sub>2</sub> 的利用途径

CO<sub>2</sub> 的利用是 CCUS 过程中的一个重要环节,它涵盖了将捕集到的 CO<sub>2</sub> 转化为有用产品或将其应用于不同领域的技术和方法。本部分将探讨 CO<sub>2</sub> 的化学转化、燃料生产、矿物碳化和农业应用等方面的利用途径。

### 1.2.1 化学转化

CO<sub>2</sub> 在化学转化中可以作为原料参与各种反应,并生成有机化合物和其他高附加值产品。例如,CO<sub>2</sub> 可以与氢气进行催化反应,生成甲酸、甲醇和乙酸等化学品<sup>[13]</sup>。这些化学品可用于制备聚合物、溶剂和化肥等。化学转化还包括电化学 CO<sub>2</sub> 还原,将 CO<sub>2</sub> 通过电解过程转化为有机化合物。这项技术利用电流和催化剂,将 CO<sub>2</sub> 还原为一系列碳基化合物,如甲烷、乙烯和甲醛等,这些有机化合物可以进一步用于化工、能源存储和燃料生产。化学转化为 CO<sub>2</sub> 提供了一种将废弃物转化为有价值产品的途径,同时减少了对传统石油资源的依赖。

### 1.2.2 燃料生产

CO<sub>2</sub> 也可以用作燃料的原料。通过将 CO<sub>2</sub> 与氢气或其他可再生能源反应,可以合成甲烷、乙烯和甲醇等燃料。这些燃料可以用于替代传统石油和天然气燃料,减少对化石燃料的需求。此外,CO<sub>2</sub> 还可以用于制备合成天然气(SNG)和液体天然气(LNG),这些天然气可以在能源生产和供应方面发挥重要作用。利用 CO<sub>2</sub> 生产燃料不仅有助于减少温室气体排放,还可以实现碳循环利用,推动能源可持续发展。

### 1.2.3 矿物碳化

CO<sub>2</sub> 还可以通过与矿物反应形成稳定的碳酸盐类化合物。这种碳酸盐可以用于建筑材料制造、混凝土固化和地质封存等方面<sup>[14]</sup>。例如,CO<sub>2</sub> 可以与氢氧化钙反应生成碳酸钙,然后用于生产水泥、砖块和陶瓷材料。此外,CO<sub>2</sub> 还可以与镁矿反应,形成镁碳酸盐,并用于储能、建筑材料生产和土壤改良等。矿物碳化技术有助于将 CO<sub>2</sub> 永久地封存在矿物中,并将其转化为有用的产品,同时减少了对传统原材料的需求。

### 1.2.4 农业应用

CO<sub>2</sub> 可以在农业领域发挥积极作用。通过将 CO<sub>2</sub> 注入温室或垂直农场,可以增加植物生长的速度和产量。这种技术被称为 CO<sub>2</sub> 施肥<sup>[15]</sup>,可以提高作物的质量和产量,并减少对化学肥料的依赖。此外,CO<sub>2</sub> 还可以用于水培农业和蔬菜种植中,促进植物的光合作用,提高光能转化效率和产量。除了直接应用于农作物生长,CO<sub>2</sub> 还可以通过海藻养殖和林业管理等方式在生态系统中进行利用。海藻具有较高的 CO<sub>2</sub> 吸收能力,可以将大量的 CO<sub>2</sub> 固定为有机物质,并作为食物或肥料进行利用。同时,林业管理包括森林种植和保护,可以通过树木吸收大量的 CO<sub>2</sub>,达到碳汇的目的<sup>[16]</sup>。利用 CO<sub>2</sub> 进行农业应用不仅有助于增加粮食和能源产量,还可以减少对土地和水资源的需求,改善气候和可持续发展。

总结起来,CO<sub>2</sub> 的利用途径包括化学转化、燃料生产、矿物碳化和农业应用等。这些利用途径可以将 CO<sub>2</sub> 从排放源转化为有用产品,减少温室气体排放,推动可持续发展。随着对碳减排和资源回收需求的增加,通过进一步研究和创新,CO<sub>2</sub> 的利用技术将在未来发挥更大的作用,并为实现低碳经济 and 环境保护做出重要贡献。

## 1.3 CO<sub>2</sub> 封存技术

CO<sub>2</sub> 封存是一种将 CO<sub>2</sub> 永久地储存在地下或海洋中的技术<sup>[17]</sup>。它是应对气候变化和减少温室气体排放的重要手段之一。本部分将探讨 CO<sub>2</sub> 封存的地下封存和海洋封存等方面的技术,并介绍对封存安全性的评估。

### 1.3.1 地下封存

盖层岩封存是将 CO<sub>2</sub> 气体封存在地下盖层岩石中的技术。盖层岩具有较高的渗透性和低透水性<sup>[18]</sup>,可以起到有效的封存作用。在这项技术中,CO<sub>2</sub> 被捕获并压缩后注入到地下的盖层岩中,通过与盖层岩发生物理和化学反应,CO<sub>2</sub> 会转化为稳定的碳酸盐,从而实现长期封存。盖层和储层协同封存是一种结合盖层岩和储层岩来实现 CO<sub>2</sub> 封存的技术。在这种方法中,CO<sub>2</sub> 首先被注入到储层岩石中,然后通过盖层岩的渗透性限制,形成了一个封存系统。这种协同封存可以提高封存容量,并减少 CO<sub>2</sub> 的泄漏风险。

### 1.3.2 海洋封存

深海封存是将 CO<sub>2</sub> 气体封存在海洋深层的技术。在深海中,CO<sub>2</sub> 被输送到特定区域,如海底钻井

孔或地下水层中。由于深海环境的高压和低温,CO<sub>2</sub> 可以以液态或超临界状态存在,并与周围的海水发生溶解和化学反应。随着时间的推移,CO<sub>2</sub> 会逐渐与海水中的矿物质反应形成稳定的碳酸盐,实现长期封存。海底沉积物封存是一种利用海底沉积物储存 CO<sub>2</sub> 的技术,该技术利用地球上丰富的海底沉积物资源,将 CO<sub>2</sub> 直接注入到高孔隙度和多孔介质的沉积物中<sup>[19]</sup>。这些沉积物可以作为 CO<sub>2</sub> 的吸附剂和封存介质,有效降低 CO<sub>2</sub> 的泄漏风险,并实现长期的封存。

### 1.3.3 对封存安全性的评估

(1)封存容量。封存容量是指储层或海洋区域可以安全封存和储存的 CO<sub>2</sub> 量。对封存容量的评估是确保封存项目可行性和长期稳定性的关键。这需要考虑地质储层或海洋区域的特性、渗透性、压力变化以及 CO<sub>2</sub> 与岩石或水相互作用的过程。

(2)地质和环境影响。进行 CO<sub>2</sub> 封存前,需要对地质和环境进行全面评估,以了解封存活动可能产生的影响。这些评估包括地质构造、水文地质条件、岩石渗透性和封存区域周围的环境敏感性等因素。

(3)CO<sub>2</sub> 封存对地下水资源的影响。确保封存项目不会对地下水质量产生不利影响<sup>[20]</sup>,并采取必要的监测和管理措施来保护水资源。

(4)在海洋封存方面,需要考虑海洋生态系统的保护和影响减弱措施。封存活动可能对海洋生物的多样性、鱼类和其他生物群落产生影响。因此,进行全面的环境评估和监测是关键,以确保海洋封存的可持续性和生态平衡。

(5)相应的监管框架和政策支持。建立适当的法规和标准,确保 CO<sub>2</sub> 封存项目符合安全性、可持续性和环境友好的要求<sup>[21]</sup>。同时,也要促进科学研究和技术创新,提高 CO<sub>2</sub> 封存技术的效率和可行性。

综上所述,CO<sub>2</sub> 封存技术通过地下封存和海洋封存的方式,为应对气候变化提供了一种重要的解决方案。通过对封存安全性的评估和环境影响的考虑,可以确保 CO<sub>2</sub> 气体被稳定、安全地封存,并为未来的可持续发展做出贡献。同时,需要进一步的研究和技术创新,以提高 CO<sub>2</sub> 封存技术的效率和可行性,并加强监管和政策支持以推动其广泛应用。

## 2 CCUS 示范项目

### 2.1 国际 CCUS 示范项目概述

在全球范围内,许多国家和地区都致力于开展

CCUS 示范项目<sup>[22]</sup>,以推动该技术的发展。美国拥有许多 CCUS 示范项目,如位于德州的 Petra Nova 项目和位于路易斯安那州的 Boundary Dam 项目;挪威是 CCUS 领域的先驱之一,在其境内有多个示范项目,如 Sleipner 和 Snøhvit 项目;加拿大的示范项目包括 Weyburn - Midale 项目和 Quest 项目。这些项目旨在验证 CCUS 技术的可行性,并减少 CO<sub>2</sub> 排放,为石油和天然气生产提供了可持续解决方案。

### 2.2 CCUS 示范项目商业应用前景

CCUS 技术的商业应用前景广阔。在石油和天然气行业,将 CCUS 技术应用于石油和天然气生产可以实现增效和减排的双重效益<sup>[23]</sup>。例如,通过注入 CO<sub>2</sub> 来提高油田采收率,既能增加能源产量,又能封存 CO<sub>2</sub>。钢铁工业是一个高碳排放行业,CCUS 技术可以帮助其减少碳排放。通过捕集钢厂排放的 CO<sub>2</sub> 并将其封存,可以降低温室气体排放,并为该行业转型提供可持续解决方案。水泥生产也是一个高碳排放行业,通过 CCUS 技术可以减少其碳排放。捕集水泥厂排放的 CO<sub>2</sub> 并将其封存,既可以减少碳排放,又可以为企业创造新的商业机会。

### 2.3 经济和政策因素对 CCUS 应用的影响

经济和政策因素对 CCUS 技术的商业应用起着重要作用。从成本方面来看,CCUS 技术的商业应用面临成本挑战。降低 CCUS 技术的成本是推动其商业化的关键因素。政府和企业可以通过资金支持、研发投入和技术创新来降低 CCUS 项目的成本,并提高其可行性。从政策支持角度来看,政府在能源和环境政策方面的支持对 CCUS 技术的商业应用至关重要。制定相关政策和法规,为示范项目提供财政激励和监管支持,将有助于推动 CCUS 技术的商业化。结合碳交易市场机制,建立健全的碳交易市场机制可以为 CCUS 技术的商业应用提供经济激励。例如,通过碳交易或碳定价机制,将 CO<sub>2</sub> 排放纳入经济考虑,鼓励企业减少排放并寻求 CCUS 技术的商业应用<sup>[24]</sup>。碳交易市场机制可以为 CCUS 项目提供碳信用或碳配额,增加其经济吸引力。当然,国际合作和知识共享也是不可或缺的一部分,国际合作和知识共享对 CCUS 技术的商业应用至关重要。通过合作开展研究、分享最佳实践和经验教训,可以加速 CCUS 技术的发展,并降低相关成本和风险。CCUS 技术的商业应用需要长期的可预测性支持,政策和法规的稳定性,以及长期的资金支持,可以帮助企业在商业化过程中更好地评估风险和回

报,并增强投资者的信心。

总结起来,CCUS 示范项目的重要性在于验证技术的可行性,推动政策和法规的支持,并提高公众对 CCUS 技术的认知和接受程度<sup>[25]</sup>。商业应用方面,CCUS 技术可以在石油和天然气、钢铁、水泥等领域实现减排和增效。经济和政策因素对 CCUS 技术的商业应用起着关键作用,包括成本效益、政策支持、碳交易市场机制、国际合作和长期可预测性。通过综合考虑这些因素,并加大技术研发和知识共享的力度,CCUS 技术有望实现商业化,并为应对气候变化做出重要贡献。

## 3 CCUS 的挑战与发展方向

### 3.1 技术和工程挑战

目前,CCUS 项目中最大的技术挑战之一是捕集 CO<sub>2</sub> 的成本和效率<sup>[26]</sup>。开发更低成本且高效的捕集技术是关键,以提高 CCUS 项目的经济性。其次是封存技术的安全和持久性。封存 CO<sub>2</sub> 需要选择适当的地下储存层,并确保封存过程的安全和持久性。研究和监测封存地点的地质条件、流体动力学等因素非常重要,以减少潜在的环境风险。还需要重点关注转化和利用技术的发展,将捕集的 CO<sub>2</sub> 转化为有价值的产品或能源也面临着技术挑战。开发创新的转化和利用技术,如碳化混凝土、合成燃料等,可以提高 CCUS 项目的经济性和可持续性。

### 3.2 经济和可持续性挑战

CCUS 项目需要大量的投资和资金支持,降低 CCUS 技术的成本是实现商业化的关键,同时需要寻求国际合作和创新的资金模式,以吸引更多的投资。同时,不能忽视 CCUS 的可持续性和环境影响,CCUS 技术在减少排放方面具有巨大潜力,但也需要考虑其对环境的影响。确保 CCUS 项目的可持续性,包括减少能源消耗、优化资源利用和处理副产品等,是一个重要的挑战。另外需要结合当下碳交易市场机制的发展,建立健全稳定的碳交易市场机制对于推动 CCUS 技术的商业应用至关重要。政府和国际组织应根据经济和环境目标,制定相应的碳定价政策,以促进 CCUS 项目的发展。

### 3.3 法规和政策挑战

目前 CCUS 缺乏明确的政策支持,许多国家和地区对 CCUS 技术的政策支持仍然不够明确和稳定。制定长期可预测的政策和法规,为 CCUS 项目提供财政激励,减少风险,并确保项目的顺利运行至

关重要。此外,CCUS 技术的发展需要跨国合作和知识共享<sup>[27]</sup>,通过开展国际合作,建立技术研发中心和共享平台,加强技术交流与创新,可以加速 CCUS 技术的发展和商业应用。

### 3.4 未来发展方向和前景

一是加大技术创新和研发投入。加大对 CCUS 技术的研发投入是推动其发展的关键。通过技术创新,如新型捕集材料、高效封存技术和碳转化利用技术等,可以降低成本并提高效率。

二是加快跨行业合作和整合,CCUS 技术涉及多个行业,包括能源、工业、环境等。促进跨行业合作和整合,打破各行业之间的壁垒,共同推动 CCUS 技术的商业应用和发展。建立跨部门的合作机制<sup>[28]</sup>,并促进不同行业之间的经验交流和知识共享。

三是需要政策和法规支持。加强政府在能源和环境政策方面的支持,为 CCUS 技术提供稳定的政策环境。制定激励措施、减少投资风险以及建立碳交易市场机制都可以为 CCUS 技术的商业化提供重要支持。

四是要提高公众认知和接受程度。CCUS 技术的成功商业化需要公众的广泛认知与接受。加强对 CCUS 技术的宣传与教育,解释其潜在益处和环境价值,有助于建立社会支持并消除公众的疑虑。

五是加强国际合作和知识共享。CCUS 技术是全球性的挑战,需要各国共同努力。加强国际合作、分享最佳实践和共享研究成果,可以加速 CCUS 技术的发展和商业应用。

未来,CCUS 技术将在减少碳排放和实现可持续发展方面发挥重要作用,为构建低碳经济和应对气候变化做出贡献。

## 4 结束语

CCUS 技术是应对气候变化和减少 CO<sub>2</sub> 排放的一项重要解决方案。通过捕集、转化和封存 CO<sub>2</sub>,CCUS 技术能够将大量的温室气体永久地储存于地下,同时将 CO<sub>2</sub> 转化为有价值的产品或能源。然而,CCUS 技术在商业化和广泛应用方面仍面临着一系列挑战。尽管 CCUS 技术面临着技术、经济和政策等方面的挑战,但通过技术创新、政策支持、跨行业合作和国际合作,可以克服这些挑战,并推动 CCUS 技术的商业化和广泛应用。未来,CCUS 技术将在减少碳排放和实现可持续发展方面发挥重要作

用,为构建低碳经济、应对气候变化做出贡献。随着技术的不断进步和政策的支持,CCUS 技术有望成为一个具有巨大潜力的解决方案,并为未来可持续发展铺平道路。

### 参 考 文 献

- [1] 叶汝求. 中国气候变化问题[J]. 产业与环境(中文版),1995(1):20-22.
- [2] 隋广军,郁清漪,唐丹玲. 全球气候变化治理制度变迁的逻辑:路径、动力和效能[J]. 改革,2023(7):57-72.
- [3] 朱发根,陈磊. 我国 CCUS 发展的现状、前景及障碍[J]. 能源技术经济,2011,23(1):46-49.
- [4] 卢雪梅. CCUS 在油气行业应用进展[J]. 石油与天然气地质,2021,42(4):762.
- [5] Klotzsche, C. Rufer. 碳捕集、利用与封存(CCUS)价值链研究[J]. 中国船检,2022(12):83-89.
- [6] 张所续. 基于能源三难困境指数的中国能源发展选择[J]. 中国国土资源经济,2020,33(5):16-23.
- [7] 邱炆杨,肖立,黄宇,等. 常用二氧化碳移除技术特点及应用[J]. 农业工程,2023,13(1):53-57.
- [8] 惠武卫,姬存民,赵合楠,等. 低浓度 CO<sub>2</sub> 捕集技术研究进展[J]. 天然气化工:CI 化学与化工,2022,47(4):19-24,98.
- [9] 张嘉伟,顾文波,张富龙. 基于化学吸收法的二氧化碳捕集技术研究进展[J]. 低碳化学与化工,2023,48(4):96-106.
- [10] 李禾. 二氧化碳吸附剂材料:为碳中和助力,需进一步扩大应用[N]. 科技日报,2023-05-25(006).
- [11] 杨磊鑫. 二维材料基碳捕集膜的通道构筑、调控及分离性能强化[D]. 天津:天津大学,2022.
- [12] 张行天,宋依伦. 国内外生物基材料减碳调研与技术研究[J]. 造纸装备及材料,2023,52(8):77-79.
- [13] 张明慧,王骁,崔文权. 光催化还原 CO<sub>2</sub> 的研究进展[J]. 广州化工,2023,51(3):52-55.
- [14] 包一翔,李井峰,郭强,等. 二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述[J]. 煤炭科学技术,2022,50(6):84-95.
- [15] 韩勇,邹美林,程婧晔,等. 利用生物技术提振作物生产和应对气候变化:挑战与展望[J]. 长江大学学报(自然科学版),2023,20(5):124-136.
- [16] 陈新建,夏梦瑶. “双碳”目标下林业碳汇项目的开发困境与优化路径[J]. 广西农学报,2023,38(2):56-66.
- [17] 颜开,向勇,陈晓玲. CO<sub>2</sub> 海洋封存系统管道腐蚀特性研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2019,31(6):672-680.
- [18] 田海龙. CO<sub>2</sub>-咸水-岩相互作用对盖层封闭性影响研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [19] 潘栋彬. 海洋天然气水合物射流破碎与注 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 置换联合开采研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
- [20] 付葆春,许媛. CO<sub>2</sub> 地质封存项目环境监测评估体系初步研究[J]. 山西化工,2022,42(8):139-140,143.
- [21] 牛皓,杜琼,许川东,等. 美国二氧化碳强化采油应用情况及对中国 CCUS 应用的启示[J]. 环境影响评价,2023,45(3):50-55,62.
- [22] 李阳,王锐,赵清民,等. 中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望[J]. 石油科学通报,2023,8(4):391-397.
- [23] 李玲. 我国 CCUS 项目建设取得新进展[N]. 中国能源报,2023-05-29(004).
- [24] 林东龙,周大通,李若思,等. 《碳排放权交易管理办法(试行)》对油气企业的启示[J]. 世界石油工业,2021,28(5):6-11.
- [25] 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.
- [26] 林圣华. 新时代我国煤基能源转型发展路径思考[J]. 中国煤炭,2023,49(8):6-13.
- [27] 梁希,夏菡佑,余晓洁,等. CCUS 技术商业化应用面临的挑战和路径建议[J]. 可持续发展经济导刊,2023(6):16-20.
- [28] 秦积舜,李永亮,吴德彬,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.