

[1]刘硕,张志璐,高志豪,等.二氧化碳利用产业发展技术路线研究:以宁夏为例[J/OL].洁净煤技术,1-16[2024-11-19].https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CN23090101.

二氧化碳利用产业发展技术路线研究:以宁夏为例

刘 硕^{1,2}, 张志璐², 高志豪³, 夏菡佑^{3*}, 叶知远³, 梁 希³

(1.宁夏回族自治区电力设计院有限公司, 宁夏 银川 750011; 2.宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处, 宁夏 银川 750001; 3.广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东 广州 510440)

摘要: 二氧化碳资源化利用是促进循环经济发展和碳减排的关键技术,也是实现碳中和的重要途径。宁夏是全国首个开展区域碳利用产业规划研究的省份。本文总结和提炼了宁夏在探索二氧化碳利用技术路线和产业规划方面的经验,构建了碳利用技术评价指标体系,旨在为其他地区开展碳利用产业规划提供借鉴。调研显示,多项碳利用技术已经进入中试、示范和商业化阶段,部分技术已初步具备经济效益,产业化布局时机接近成熟。在进行区域碳利用产业布局研究时,技术成熟度、产业契合度、经济效益和减排潜力是重要考虑因素。研究结果表明,二氧化碳强化采油、二氧化碳加氢制甲醇、二氧化碳合成碳酸二甲酯、二氧化碳矿化养护混凝土、钢渣固碳以及微藻固碳等技术在综合评价中表现突出,建议宁夏优先发展;二氧化碳合成异氰酸酯、电石渣和磷石膏固碳,以及二氧化碳气肥利用等技术表现良好,建议通过试点示范方式开展前沿技术探索和储备。

关键词: 碳利用; 产业规划; CCUS; 宁夏

中图分类号: X701.7

文献标志码: A

Research on the technological roadmap for the development of carbon utilization industries: a case study of Ningxia

LIU Shuo^{1,2}, ZHANG Zhilu², GAO Zhihao³, XIA Changyou^{3*}, YE Zhiyuan³, LIANG Xi³

(1.Ningxia Hui Autonomous Region Electric Power Design Institute Co., LTD, Ningxia Yinchuan 750011; 2.The Carbon emission reduction Department of the Development and Reform Commission of the Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia Yinchuan 750011; 3. Guangdong CCUS Centre, Guangdong Guangzhou 510440)

Abstract: The utilization of carbon is the key technology to promote the development of circular economy and carbon emission reduction, and it is also one of the important ways to achieve carbon neutrality. Ningxia is the first province in China to carry out research on regional carbon utilization industry planning. This study delves into the research advancements in diverse carbon utilization technologies, formulating evaluation indicators and a comprehensive carbon utilization technology assessment system. By integrating the current state of carbon utilization in Ningxia with future industrial plans, the study identifies pivotal technologies crucial for the deployment of carbon utilization industries in the region. The results indicate that technologies such as carbon dioxide-enhanced oil recovery, carbon dioxide hydrogenation to methanol, carbon dioxide synthesis of dimethyl

收稿日期: XXXX-XX-XX 责任编辑:

作者简介: 刘硕 (1988 年—), 男, 宁夏盐池人, 硕士, 主要研究方向为能源规划及能源领域碳减排路径。E-mail: liushuo365@foxmail.com

通讯作者: 夏菡佑 (1990 年—), 男, 浙江温州人, 博士, 主要研究方向为二氧化碳捕集利用与封存。E-mail: changyou.xia@gdccus.org

carbonate, carbon dioxide carbonization curing of concrete, steel slag mineralization, and cultured microalgae demonstrated outstanding performance in the comprehensive evaluation, suggesting priority development in Ningxia. Technologies such as carbon dioxide synthesis of isocyanates, calcium carbide slag and phosphorous paste mineralization, and carbon dioxide utilization as gas fertilizer showed promising results, recommending further exploration and reserve through pilot demonstrations for frontier technologies in the next steps.

Key words: carbon utilization; industrial planning; CCUS; Ningxia

0 引 言

人类对化石燃料的使用向大气排放了大量的二氧化碳,全球温室效应日趋明显^[1-4],减少碳排放已成为全球重要公共议题^[5]。中国于2020年9月22日在第七十五届联合国大会一般性辩论上首次正式提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的发展目标^[6]。实现“碳达峰、碳中和”需要推动能源和工业体系的深层变革,其中二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)技术能够将CO₂从能源利用、工业过程或大气中分离出来,实现利用或封存,是全球减缓气候变化和实现碳中和目标的关键技术,受到国际社会广泛关注^[7-9]。

根据碳去向、减碳效应等方面的差异,CCUS技术一般可分为碳捕集与封存(CCS)、碳捕集与利用(CCU)两条减排路线。现阶段,在碳市场价格较低的情况下,开展CCS投资高、回报低,且存在一定安全性风险^[10]。二氧化碳利用是通过物理、化学或生物方式利用CO₂,在减少CO₂排放的同时,实现能源增产增效、矿产资源增采、化学品转化合成、生物农产品增产和消费品生产等工农业过程,是兼顾环保效益和经济效益的减排技术^[11-13]。CO₂利用的意义不仅在于抵消捕集过程中产生的额外成本,更重要的是将CO₂作为一种有价值的资源,用以创造经济效益。未来,碳利用有望成为一种保障能源安全、减少二氧化碳排放、促进低碳新业态孵化的战略性技术选择^[14-15]。

二氧化碳利用是实现全球气候目标的重要途径,受到多国政府和企业的积极关注^[16-18]。例如,英国预计到2030年,CO₂利用市场规模将达到11.3-62.4万吨/年,占英国温室气体排放总量的约1%,关键利用途径包括CO₂气肥、合成甲醇和燃料、CO₂基聚合物生产、混凝土养护、以及钢渣和水泥废料固碳^[19]。在欧盟,研究显示CO₂制甲醇、微藻养殖以及合成生物燃料技术具备较大的部署潜力^[20]。美国国家学院的相关研究建议,可以在美

国发展CO₂合成可再生燃料和CO₂合成化学品,但强调CO₂必须来源于直接空气捕集、直接海洋捕集或生物质^[21]。日本在2020年发布的《绿色增长战略》政策文件中,强调了三种碳利用技术的应用,包括二氧化碳养护混凝土、二氧化碳生物转化合成燃料以及二氧化碳合成塑料^[22]。

宁夏回族自治区的能源消费格局以煤为主,以能源化工产业为主导,存在明显的高碳排放特征。CCUS在宁夏的应用场景丰富且减排潜力巨大^[23]。根据宁夏相关产业规划,未来宁夏将重点发展“六新六特六优”产业^[24]。其中,“六新”产业包括新型材料、清洁能源、装备制造、数字信息、现代化工、轻工纺织。二氧化碳利用技术与新型材料、现代化工以及轻工纺织等产业结合紧密,因此宁夏是碳利用技术的理想布局和发展区域。

本文以宁夏回族自治区为案例,研究了碳利用技术的发展现状、宁夏的资源条件和产业基础,并建立了碳利用技术的评价指标体系。根据调研和分析结果,形成符合宁夏产业发展需求、具备生态效益和经济效益的二氧化碳利用产业发展技术路线。另外,根据宁夏产业分布特征,提出碳利用技术发展布局建议。

1 二氧化碳利用技术前沿进展

二氧化碳的利用可以分为地质利用、化工利用、生物利用和物理利用。化工利用可进一步分为CO₂化学合成燃料、CO₂转化制备化学品以及CO₂矿化利用^[25]。根据中国21世纪议程管理中心的研究成果^[26]和课题组的调研情况,图1展示了二氧化碳利用技术的最新研究进展。目前,地质利用方面,CO₂强化采油是我国减碳规模增长最快的碳利用方式,而其他技术主要处于基础研究和中试阶段。化工利用方面,CO₂可以用于合成多种化工产品,其中部分技术仍处于基础研究阶段,而另一部分已进入中试或示范阶段。生物利用方面,CO₂养殖微藻已商业化应用,优良藻种可以带来经济收益。下文将进一步介绍地质利用、化工利用、生物利用方

面的技术进展。值得注意的是，CO₂合成碳酸氢钠、碳酸氢钠和尿素属于成熟技术和传统产业，不在政府鼓励发展的产业范畴之内；此外，CO₂用作灭火

材料、食品保鲜剂、饮料配方和保护气体等属于成熟技术，下文将不作详细介绍。



图 1 碳利用技术进展^{[23][26]}

Fig.1 Progress in CO₂ utilization technology

(1) CO₂地质利用

CO₂强化采油是目前最主要的CO₂利用方式之一。截至2022年末，我国共有9个大型油田已开展二氧化碳驱油，每年注入CO₂超过200万吨，CO₂地质利用驱油技术在我国正逐渐从技术示范进入商业化阶段^[27-29]。

CO₂强化天然气开采目前已在荷兰、德国、加拿大等国家已经开展中试项目，相关技术在我国仍处于基础研究阶段^[25]。

CO₂驱煤层气技术在全球均处于小规模示范应用阶段^[30]。

CO₂地浸采铀是一种用于提取地下铀矿床中铀的方法，通过向地层注入CO₂+O₂溶浸液，使铀化合物溶解成含有铀的溶液，然后将该溶液抽取至地表并分离出铀^[31]。在CO₂地浸采铀技术上，中美两

国最为成熟，且已开展了大规模工业化应用^[32]。

(2) CO₂合成燃料

CO₂加氢制甲醇技术在国内外已进入工业示范阶段，多个示范项目已成功投产^[33-35]。作为里程碑，2020年兰州新区与中科院大连化学物理研究所合作建成全球首个千吨级“液态阳光”二氧化碳加绿氢制甲醇示范项目。

CO₂制备合成气有两种技术路径，一是CO₂与甲烷的高温重整，二是CO₂电还原催化。前者已经由中科院上海高等院、山西潞安矿业公司在山西长治建成示范项目，后者由碳能科技和内蒙古伊泰集团在鄂尔多斯建成示范项目。因此，两种技术路径均已完成示范验证，具备推广应用的基础技术条件。

在CO₂合成汽油领域，我国已进入示范阶段。

中科院大连化学物理研究所研发出具有转化CO₂为C5-C11范围汽油能力的催化剂，并于2020年在山东邹城工业园区建成千吨级中试装置^[36]。同年，由广东省电力设计院设计和管理的全球首个等离激元CO₂转化利用项目——千吨级碳吸收合成汽油中试项目在黑龙江七台河市建成。

在CO₂合成甲烷、一氧化碳燃料领域，国内外目前仍处于实验室基础研究阶段，尚未开展应用示范^[37]。

(3) CO₂转化制备化学品

碳酸二甲酯(DMC)是重要的有机合成中间体，近年来市场需求不断上升^[38]。CO₂酯交换法生产碳酸二甲酯技术已实现商业化应用，代表性项目包括浙江石化20万吨/年DMC生产项目、山东石大胜华化工7.5万吨/年DMC生产项目^[39-41]。

异氰酸酯(MDI)是合成聚氨酯的基础材料。目前巴斯夫、拜耳、三井化学等企业均在积极研发CO₂制备异氰酸酯技术。国内中科院过程工程研究所自2003年开始研究相关技术，已经成功研发苯胺和尿素耦合的CO₂间接合成非光气MDI新技术，并在陕西华县完成百吨级全过程实验和核心单元千吨级验证^[42]。

聚碳酸酯在电子、医疗、建筑、汽车和服装等行业有广泛应用。目前，CO₂制备的碳酸二甲酯能与苯酚反应生产聚碳酸酯，相关技术已经处于工业示范阶段，代表项目包括泸天化集团中蓝国塑10万吨/年聚碳酸酯工业化示范项目、海南华盛新材料科技有限公司2×26万吨/年非光气法PC项目^[25]。

二甲基甲酰胺(DMF)是一种用途广泛的化工原料，也是一种优良溶剂，广泛应用于聚氨酯、腈纶、医药、染料、电子等行业。中科院上海有机化学研究所研发的以二氧化碳、氢气和二甲胺为原料合成DMF技术已进入中试阶段，2019年在山东枣庄建成全球首套CO₂合成DMF中试装置。

四甲苯是重要的精细化工原料，主要用于有机合成。将CO₂和合成气作为原料，在高温高压下可以催化合成四甲苯与粗氢气。在国内，该技术已经完成万吨级工业示范。清华大学与久泰集团合作在鄂尔多斯合作建成万吨级二氧化碳/合成气制芳烃工业试验项目是全球首套CO₂制芳烃工业化项目。

丁二酸广泛应用于医药、食品、合成塑料等行业。山东兰典生物科技的2万吨/年丁二酸生产线是目前国内规模最大的同类型项目。

关于二氧化碳合成可降解塑料技术，中国科学

院长春应用化学所与博大东方新型化工有限公司合作，已在吉林省吉林市建成5万吨级CO₂基生物降解塑料项目。

碳纳米管可用于生产多种产品，如电池材料、电子器件、医疗器械、高强度复合材料等。2019年，绿碳科技在山西大同建成了全球首个煤电碳捕集及转化为碳纳米管全产业链示范系统。该系统每年可捕集并纯化1280吨电厂烟气中的二氧化碳，生产200吨碳纳米管。

(4) CO₂矿化利用

钢渣和电石渣是两类常见的工业废弃物，可以通过固定CO₂转化为稳定的碳酸盐产品，实现资源循环利用^[43-46]。京韵泰博公司已在山东滨州建成钢渣固碳生产大理石建材示范项目，而原初科技公司则在山西大同建成电石渣固碳生产高品质碳酸钙项目。钢渣和电石渣的CO₂固定和矿化利用已进入示范阶段。

CO₂矿化养护过程是在混凝土早期成型阶段注入CO₂，使CO₂与混凝土中的钙、镁组分发生矿化反应，增强混凝土的硬度和耐久性，CO₂也可以被长期、稳定地封存在混凝土内。目前，我国华新水泥和湖南大学已在湖北武穴建成水泥窑烟气生产混凝土制品生产线，强耐新材和浙江大学在河南焦作建成全球首个万吨级CO₂矿化制建材示范项目，相关技术已进入示范和推广阶段。

磷石膏是磷化工产业的固体废弃物，能够与氨水、CO₂反应，生产硫酸铵和碳酸钙，实现对二氧化碳的高效固定。目前我国在四川达州和重庆涪陵已经开展示范项目，率先积累了相关工程技术经验^[47-48]。

(5) 生物利用

微藻固碳技术是利用微生物将二氧化碳转化为生物质的过程^[49-50]。微藻的应用途径较多，可作为食品、饲料、农业肥料、生物燃料和化学品。其中，利用微藻将CO₂转化成食品、饲料相关技术已经进入商业化阶段，能够实现项目盈利^[51]。

二氧化碳气肥是一项农业生产增产技术，通过补充农业大棚内的CO₂浓度提升作物生长效率、增加产量。2021年，内蒙古包头在全国率先推广应用CO₂气肥，已在当地土右旗、东河区等地累计示范推广近万亩，平均增产12%。

2 碳利用产业发展技术路线研究方法

2.1 研究框架

针对二氧化碳利用产业发展技术路线的研究，需调研区域的自然资源禀赋、产业发展基础、温室气体减排形势和未来产业转型发展方向。在此基础上，构建技术评价指标体系，对碳利用技术进行系统性的评价和筛选。因此，碳利用产业发展技术路线分析主要包括三方面内容，即碳利用技术分析、碳利用产业发展基础分析、碳利用技术评价指标体系构建（如图 2）。

（1）碳利用技术分析。通过文献调研、网络公开信息调查、专家访谈和工程项目实地调研等方式，系统梳理各类碳利用技术的相关信息，包括技术成熟度、经济性、减排潜力以及产业化前景。技术成熟度可采用美国国家航天局（NASA）普遍采用的技术成熟度评价方法（TRL）进行评估。经济性评估需考虑相关项目的投资成本、运营成本和碳利用产品的售价。减排潜力评估需基于单位碳利用产品的 CO₂ 利用量，并结合产品的市场需求进行评价。产业化前景评估则主要考虑技术的经济效益和市场前景。

（2）碳利用产业发展基础分析方法。为提升产业发展基础分析的准确性与全局性，政府与企业

的积极参与至关重要。在政府层面，采用座谈会形式，对政府各相关职能部门进行访谈，以深入了解研究区域的产业现状、发展规划和政策导向，同时收集温室气体排放相关资料与数据。在企业层面，应走访调研重点控排企业、代表性碳利用企业，结合问卷调研等方式全面了解企业的碳排放规模、减排计划、排放烟气中二氧化碳浓度、碳捕集能力、碳利用情况以及未来 CCUS 发展计划等。以上综合调研工作有助于形成对研究区域碳利用产业发展基础的全面认识。

（3）碳利用技术评价指标体系构建方法。为确保碳利用技术指标评价体系的科学性和可靠性，应考虑以下要求：首先，评价体系应与研究目标相一致，综合考虑多个关键指标。指标的设计必须确保不同技术方案之间的可比性，并保证数据的可获得性。其次，评价指标应具备可持续性，能同时适用于当前技术现状以及未来技术的演化和改进。本研究将技术成熟度、与当地产业发展方向的契合度、经济性情况和减排潜力作为主要评价指标，以满足可比性、可获得性和可持续性的要求。通过建立碳利用技术指标评价体系，本文将对各类碳利用技术在宁夏落地的适宜性进行评价，筛选出适合优先发展的和可进行试点的碳利用技术，为政府和企业决策提供科学依据。

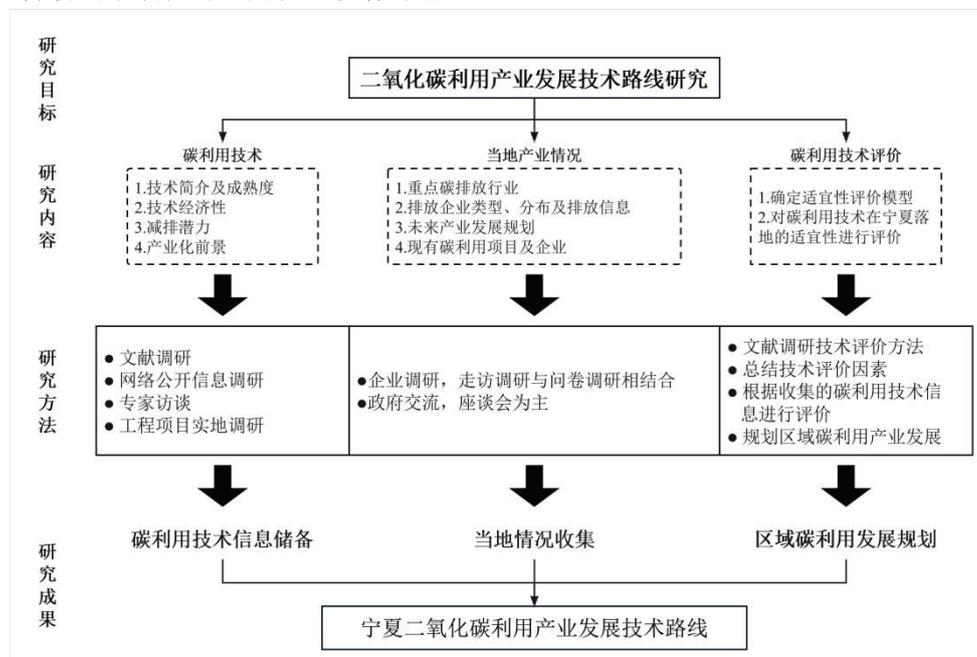


图 2 二氧化碳利用产业发展技术路线研究路径

Fig.2 Research path of CO₂ utilization industry development technology road

2.2 碳利用技术评价指标体系

针对碳利用技术的评价和筛选，主要基于四个

指标：一是技术的成熟度，由于距离实际应用较远，仍处于实验室研究阶段或仅开展小试项目的技术

暂不纳入考量范畴；二是优先选择与本地产业发展方向契合的技术；三是 CO₂ 利用技术经济性情况，碳利用技术能否实现商业化盈利是重要考量因素；四是碳利用技术的减排潜力。按照层次分析法的要

求，组织 5 位行业专家对各因素打分并构造判断矩阵，该矩阵的一致性指标 CI=0.0035<0.1，表明构建的判断矩阵具有较好的一致性（见表 1）。表 2、表 3、表 4、表 5 为各因素指标值。

表 1 碳利用技术比选判断矩阵及权值

Table.1 Judgment matrix and weight of CO₂ utilization technology

	技术成熟度	与当地产业发展方向契合度	经济性情况	减排潜力	权重	CI
技术成熟度	1	1	3	2	0.35	0.0035
与当地产业发展方向契合度	1	1	3	2	0.35	
经济性情况	1/3	1/3	1	1/2	0.11	
减排潜力	1/2	1/2	2	1	0.19	

表 2 技术成熟度指标值

Table.2 Technology maturity index value

	概念阶段	基础研究	中试阶段	工业示范	商业应用
技术成熟度	0	0.2	0.5	0.8	1

表 3 与当地产业契合度指标值

Table.3 Compatibility index value with the local industry

	不契合	较契合	契合
与当地产业契合度	0	0.5	1

表 4 经济性效益指标值

Table.4 Economic efficiency index value.

	难盈利	一定条件下可盈利	较容易实现盈利
经济性情况	0	0.5	1

表 5 减排潜力指标值

Table.5 Emission reduction potential index value.

	0-1 万吨/年	1-10 万吨/年	10-50 万吨/年	50-100 万吨/年	>100 万吨/年
减排潜力	0.2	0.4	0.6	0.8	1

3 宁夏碳利用产业基础调研结果

3.1 宁夏碳排放形势及高浓度排放源

宁夏产业结构偏重、能源结构偏煤，化石能源消费占比高于全国平均水平。2020 年宁夏二氧化碳总排放量约 2.5 亿吨，其中约 5000 万吨为外调电力相关碳排放。其中，电力领域碳排放约 1.4 亿吨，工业领域碳排放约 1.0 亿吨（如图 3）；居民生活消费和交通运输的排放较少，每年分别约 100 万吨和 370 万吨。

根据科技部《中国 CCUS 技术发展路线图研究》的标准，排放烟气中 CO₂ 气体浓度在 70% 以上的排放源为高浓度排放源^[53]。相较于中浓度（35-70%）、低浓度（0-35%）排放源，高浓度排放源碳捕集具有捕集能耗低、成本低的优势。化工与石化行业有较多 70% 以上高浓度 CO₂ 排放源^[53]。宁夏宁东能源化工基地是国家重要的大型煤炭生产基地、“西电东送”火电基地、煤化

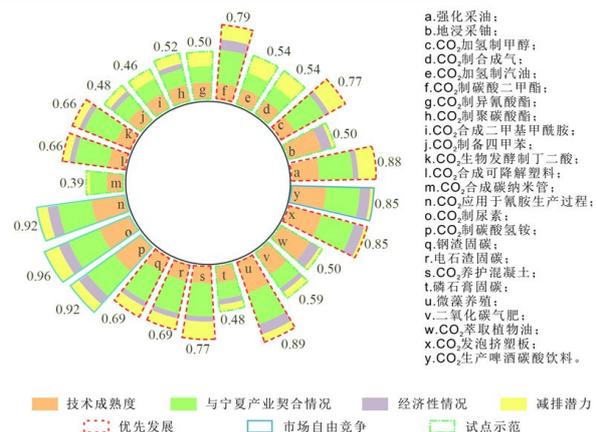


图 3 2020 年宁夏各行业二氧化碳排放量占比情况^[52]
Fig.3 The proportion of CO₂ emissions by various industries in Ningxia in 2020

工产业基础和循环经济示范区，也是宁夏最大的高浓度二氧化碳排放源聚集区。根据宁夏工信厅的调研，2020 年宁东能源化工基地 90% 浓度以上

CO₂排放量超过 1660 万吨。

3.2 宁夏现有二氧化碳产能及利用路径

研究团队调研结果显示，目前宁夏液体二氧化碳的总产能约 36 万吨/年，规划在建产能约 80 万吨/年。工业级二氧化碳是目前宁夏最大的液体二氧化碳需求类型，主要用于增产石油和制取氰胺产品。西北地区的食品级 CO₂ 需求量目前不到 2 万吨/年，主要用于生产碳酸饮料。

宁夏已开展类型较为丰富的二氧化碳利用方式，涵盖地质利用、化工利用、生物利用等领域，在减少 CO₂ 排放的同时，实现建筑材料、化学品、生物产品的绿色低碳生产，部分项目已经实施且具有较好的经济效益。

- (1) **二氧化碳驱油**：“宁夏 300 万吨/年 CCUS 示范项目”由“宁东基地碳源捕集工程”和“长庆油田驱油封存工程”两部分组成，将宁东能源化工基地煤制油项目排放的二氧化碳气体捕集后，通过管道运输至长庆油田进行驱油封存，按照“一次规划、分期建设”的原则分三期实施。2023 年 5 月 19 日，该项目在宁东能源化工基地全面开工。
- (2) **微藻固碳**：宁夏盐碱地面积广，自然光照充足，高浓度 CO₂ 来源丰富，较适合开展微藻培育。目前宁夏吴忠市和石嘴山市已引进多家微藻养殖企业。
- (3) **二氧化碳发泡制造建材**：挤塑板是常见的建筑材料，广泛应用于建筑物保温保湿、地面冻胀控制等方面。传统挤塑板使用氟利昂作为发泡剂，其温室效应是二氧化碳的 2000 倍左右。宁夏鼎盛阳光公司开发了利用二氧化碳发泡生产环保挤塑板技术，实现了对氟利昂的 100% 替代。每条使用二氧化碳发泡的挤塑板生产线每年可减少使用 500 吨氟利昂，相当于减少 80 万吨左右二氧化碳排放。
- (4) **二氧化碳应用于氰胺生产过程**：宁夏氰胺产量占全球市场的 85%，是全球氰胺产业的集聚高地^[54]。传统氰胺制备流程需要消耗大量 CO₂，宁夏企业已开始采用捕获工业尾气中 CO₂ 的方式，替代石灰石煅烧，为双氰胺生产提供碳源。石嘴山市嘉峰化工在宁东基地投资建成二氧化碳捕集项目，每年从当地煤制甲醇项目捕集约 40 万吨二氧化碳，用于生产单氰胺和双氰胺，节约石灰石 20 余万吨，减排二氧化碳约 15 万吨。

- (5) **二氧化碳合成化肥**：碳酸氢铵是一种常见的氮肥。宁夏兴尔泰化工成功研发电石炉尾气的循环利用方法，通过将尾气中的 CO 和水反应转化为 H₂ 和 CO₂，再与氮气生成氨水，最终利用氨水吸收 CO₂ 生成碳酸氢铵。该公司每年生产 15-18 万吨碳酸氢铵，利用 CO₂ 约 8-10 万吨。宁夏坤辉气化公司采用类似的技术路径建成了国内首条回收利用电石尾气循环产业链，每年可生产 5 万吨甲醇、8 万吨碳酸氢铵，利用 CO₂ 约为 11 万吨。除碳酸氢铵外，中国石油宁夏石化分公司每年需要利用 50-60 万吨 CO₂ 生产 80 万吨的尿素。
- (6) **超临界二氧化碳萃取枸杞籽油**：枸杞是宁夏的特色农产品。宁夏百瑞源枸杞公司于 2018 年成功投产国内首条超临界二氧化碳萃取枸杞籽油生产线^[55]。
- (7) **二氧化碳作为饮料添加剂**：宁夏大窑饮品有限责任公司已建成年产 20 万吨的碳酸饮料及果蔬汁生产线，每年需要利用约 800 吨二氧化碳。宁夏西夏嘉酿啤酒公司在酿酒工艺中采用丹麦 UNION 二氧化碳回收系统，将酿造发酵过程中产生的二氧化碳回收提纯液化，并添加到啤酒生产运行中，每年回收利用近 4000 吨二氧化碳。

4 宁夏碳利用产业发展技术路线及布局分析

4.1 二氧化碳利用技术在宁夏落地的适宜性评价

宁夏碳源量大、工业基础完备、地质条件多样，通过对 CO₂ 利用技术及宁夏产业基础、发展布局以及产业发展规划调研，本文揭示了各类碳利用技术在宁夏发展的前景（见表 6）。

在地质利用方面，CO₂ 驱油技术成熟度高且能产生经济效益。宁夏东部地区分布着长庆油田区块，具备进行 CO₂ 强化采油的条件，减排潜力较大。因此，建议宁夏优先发展 CO₂ 驱油利用。CO₂ 强化天然气和煤层气开采技术尚不成熟，经济性不足，建议保持对相关技术进展的关注。CO₂ 地浸采铀技术成熟度较高，但宁夏砂岩型铀矿较少，开发潜力与经济可行性有待进一步评估。

在 CO₂ 合成燃料方面，宁夏拥有丰富的可再生能源资源和制氢产业基础。CO₂ 加氢合成的甲醇、

汽油、合成气等产品市场需求量大。宁夏支持 CO₂ 合成燃料产业链的发展，与宁夏未来发展现代化工的产业布局相契合，市场规模和减排潜力均较为可观。尤其是甲醇产品在宁夏煤化工产业链上的需求巨大。因此，建议优先开展 CO₂ 合成甲醇，并考虑布局 CO₂ 制备汽油与合成气的试点示范项目。

在 CO₂ 转化制备化学品方面，碳酸二甲酯市场需求大，CO₂ 合成碳酸二甲酯相关技术已趋于成熟，宁夏具备相关的化工产业基础和原材料供应。因此，建议优先开展 CO₂ 合成碳酸二甲酯的项目。异氰酸酯、聚碳酸酯、二甲基甲酰胺和四甲苯是常见的化工产品，宁夏化工产业链或市场对于相关产品有需求，但目前相关技术的成熟度不足且成本较高，因此建议开展试点示范，做好技术储备。CO₂ 合成丁二酸、可降解材料，与宁夏发展新型材料产业的政策导向相契合，但目前 CO₂ 基可降解塑料的生产成本仍高于传统塑料，且 CO₂ 基塑料在强度、使用温度等方面的性能还存在不足。随着我国禁塑令日趋严格，以及对环境保护工作的重视，CO₂ 基可降解塑料在政策的推动下将逐步具备商业化能力，建议宁夏优先发展相关技术。在 CO₂ 应用于氰胺生产过程、制尿素、制碳酸氢铵方面，相关技术已经完全市场化，建议由市场主导相关技术的应用，政府不参与引导。

在 CO₂ 矿化利用方面，宁夏的石嘴山、中卫等地分布有钢铁厂和电石厂，钢渣、电石渣固碳项目生产的碳酸钙产品在一定的市场条件下具备经济效益，并能解决生产企业的固废问题，实现资源循环利用，因此建议宁夏优先发展钢渣固碳、电石渣固碳项目。宁夏的磷肥生产企业主要位于中卫市，将部分磷石膏用于固碳可以解决磷石膏废渣处理

问题，但目前磷石膏固碳项目的经济性存在短板，权衡之下建议先行开展磷石膏固碳的小规模试点示范项目，充分验证技术的经济性。CO₂ 养护混凝土有望实现经济效益，在宁夏的减排潜力较大，相关技术在水泥企业有应用场景，建议在宁夏中卫、吴忠等地的水泥企业优先发展相关技术。

在 CO₂ 生物利用方面，宁夏的光照充足，盐碱地分布广泛，气温适宜，适合开展微藻养殖，因此建议宁夏优先发展微藻固碳产业。CO₂ 气肥对于不同农作物的促生产效果不同，技术的经济性仍有待验证，建议宁夏以试点示范的方式引入 CO₂ 气肥技术，支持宁夏固原、银川等地农业产业的提质增效发展。

在 CO₂ 物理利用方面，宁夏企业掌握的 CO₂ 发泡制挤塑板技术处于领先水平，建议优先发展 CO₂ 替代氟利昂发泡生产挤塑板产业。CO₂ 用于生产啤酒、碳酸饮料、消防器材已属于成熟技术，建议由市场主导相关技术的应用。

评价结果表明，CO₂ 强化采油、CO₂ 加氢制甲醇、CO₂ 合成碳酸二甲酯、CO₂ 矿化养护混凝土、钢渣固碳以及微藻固碳等技术在技术经济性、与宁夏产业契合度、减排潜力等方面的综合评价中表现突出，建议宁夏优先发展；CO₂ 合成异氰酸酯、聚碳酸酯、四甲苯，电石渣、磷石膏固碳，以及 CO₂ 气肥利用等技术表现良好，建议通过试点示范方式开展前沿技术探索和储备。综合以上 CO₂ 利用途径减排潜力，宁夏二氧化碳利用减排总潜力超过 1000 万吨/年（详见表 6）。这一重要潜力有望推动宁夏率先建立兼具生态效益和经济效益的二氧化碳利用产业，为宁夏的可持续发展注入新的动力。

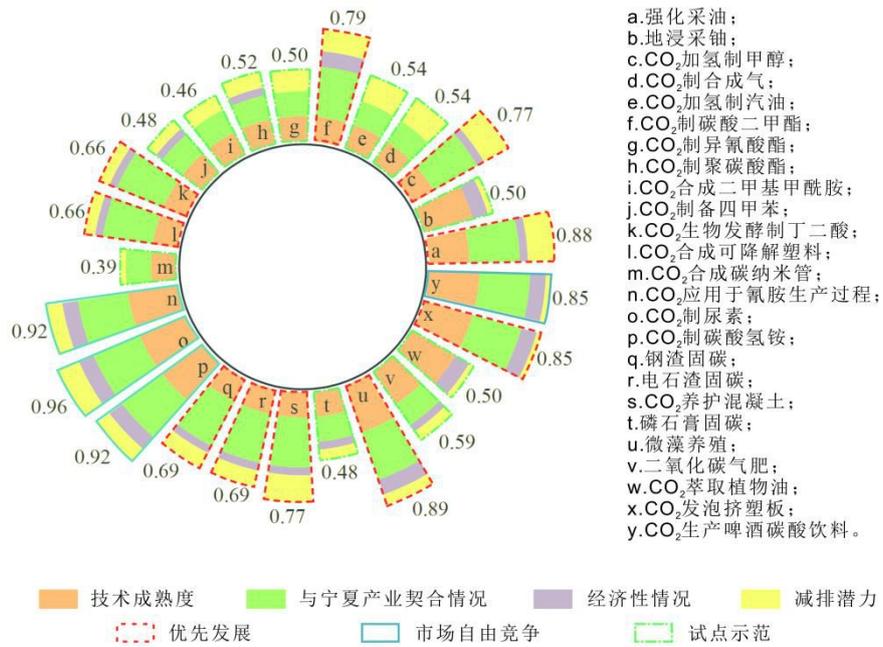


图 4 碳利用技术在宁夏落地的适宜性评价

Fig.4 The suitability assessment of carbon utilization technologies implemented in Ningxia.

表 6 CO₂ 利用技术在宁夏落地的适宜性评价与布局分析

Table.6 Evaluation of the suitability of the CO₂ utilization technology and layout analysis

CO ₂ 利用途径		技术成熟度		与宁夏产业契合情况		经济性情况		减排潜力		总分	发展策略建议	建议可开展试点示范的企业或区域
		成熟度	得分	情况	得分	经济性	得分	减排潜力	得分			
地质利用	强化采油	工业示范	0.8	长庆油田宁夏油区具备驱油潜力和能力	1	在高油价条件下具备经济性	0.5	300-500 万吨/年	1	0.88	优先发展	长庆油田宁夏油区
	地浸采铀	商业化应用	1	宁夏铀矿较少，开发可行性仍在研究当中	0	具备一定经济性	1	减排潜力较小	0.2	0.5	试点示范	鄂尔多斯盆地西缘宁夏段砂岩型铀矿
化工利用	CO ₂ 加氢制甲醇	中试阶段	0.5	宁夏现代化工产业对于甲醇需求量大	1	在高煤价条件下，成本已经接近煤制甲醇	0.5	>100 万吨/年	1	0.77	优先发展	宝丰能源、国能宁煤、和宁化学、庆华能源、长城能化等对于甲醇需求量较大的企业
	CO ₂ 制合成气	中试阶段	0.5	宁夏现代化工产业对于合成气需求量大	0.5	成本较煤制合成气高	0	>100 万吨/年	1	0.54	试点示范	依托宁东能源基地煤化工企业开展技术示范
	CO ₂ 加氢制汽油	中试阶段	0.5	与宁夏化工产业契合度较高	0.5	成本较高	0	>100 万吨/年	1	0.54	试点示范	宁东基地、吴忠市、中卫市、石嘴山市等可再生能源资源丰富、化工产业发达的区域。
	CO ₂ 制碳酸二甲酯	中试阶段	0.5	1.可做电动汽车电池材料，未来市场可观；2.宁夏基础材料丰富	1	具备一定经济性	1	50-100 万吨/年	0.8	0.79	优先发展	煤化工或石化企业先行开展技术示范
	CO ₂ 制异氰酸酯	中试阶段	0.5	与宁夏化工产业契合度较高	0.5	5-10 年有望商业化	0	50-100 万吨/年	0.8	0.5	试点示范	建议依托国能宁煤、宝丰能源、和宁化学、庆华能源、长城能化等煤化工企业开展

CO₂制聚碳酸酯	中试阶段	0.5	与宁夏化工产业契合度较高	0.5	可能实现商业盈利	0.5	<50万吨/年	0.6	0.52	试点示范	依托煤化工、石化企业先行开展示范项目，再稳步推进酯交换法合成聚碳酸酯示范项目。
CO₂合成二甲基甲酰胺	中试阶段	0.5	与宁夏化工产业契合度较高	0.5	5-10年有望商业化	0	<20万吨/年	0.6	0.46	试点示范	宁东基地、石嘴山市等地化工企业
CO₂制备四甲苯	中试阶段	0.5	与宁夏化工产业契合度较高	0.5	可能实现商业盈利	0.5	<5万吨/年	0.4	0.48	试点示范	建议在宁东基地依托煤化工企业开展技术示范
CO₂生物发酵制丁二酸	中试阶段	0.5	1.当地发展新材料产业意愿强烈；2.可降解塑料的原材料	1	可能实现商业盈利	0.5	<5万吨/年	0.4	0.66	优先发展	建议在石嘴山市开展技术示范
CO₂合成可降解塑料	示范阶段	0.5	与当地产业发展方向契合度高	1	可能实现商业盈利	0.5	<10万吨/年	0.4	0.66	优先发展	建议在石嘴山市或宁东基地开展技术示范
CO₂合成碳纳米管	中试阶段	0.5	与宁夏新材料产业契合度较高	0.5	5-10年有望商业化	0	<1万吨/年	0.2	0.39	试点示范	建议在石嘴山市或宁东基地开展技术示范
CO₂应用于氰胺生产过程	商业化应用	1	本地氰胺产业发达，对该技术需求度较高	1	可商业盈利	1	约30万吨/年	0.6	0.92	市场竞争	-
CO₂制尿素	商业化应用	1	本地该技术已有较好基础	1	可商业盈利	1	50-70万吨/年	0.8	0.96	市场竞争	-
CO₂制碳酸氢铵	商业化应用	1	本地该技术已有较好基础	1	可商业盈利	1	20-30万吨/年	0.6	0.92	市场竞争	-
钢渣固碳	中试阶段	0.5	适合宁夏钢铁企业废渣处理	1	可能实现商业盈利	0.5	15-20万吨/年	0.6	0.69	优先发展	建议依托建龙特钢、宁夏钢铁开展钢渣固碳示范项目

	电石渣固碳	中试阶段	0.5	适合宁夏电石企业废渣处理	1	可能实现商业盈利	0.5	<50 万吨/年	0.6	0.69	优先发展	建议依托石嘴山、中卫和吴忠等地电石企业开展示范项目
	CO ₂ 养护混凝土	中试阶段	0.5	宁夏有多家水泥厂，发展该项技术的基础较好	1	可能实现商业盈利	0.5	>100 万吨/年	1	0.77	优先发展	建议依托赛马水泥、瀛海天祥、青铜峡水泥等水泥企业开展技术示范项目
	磷石膏固碳	中试阶段	0.5	磷石膏固碳可作为废物处理方式	0.5	可能实现商业盈利	0.5	<10 万吨/年	0.4	0.48	试点示范	建议依托中卫市鲁西化工开始磷石膏固碳项目
生物利用	微藻养殖	商业化应用	1	已有 3 家微藻养殖企业，具有形成产业集群潜力	1	可商业盈利	1	<10 万吨/年	0.4	0.89	优先发展	盐池县、石嘴山市等地
	二氧化碳气肥	工业示范	0.8	技术门槛不高，但该技术对宁夏农业增产效果有待验证	0.5	可能实现商业盈利	0.5	4.19-4.27 万吨/年	0.4	0.59	试点示范	建议在固原、银川等地开展 CO ₂ 气肥技术示范
	CO ₂ 萃取植物油	商业化应用	1	市场接近饱和	0	可商业盈利	1	<1000 吨/年	0.2	0.5	试点示范	-
物理利用	CO ₂ 发泡挤塑板	商业化应用	1	鼎盛阳光具有全球领先的技术水平	1	可商业盈利	1	<1 万吨/年	0.2	0.85	优先发展	宁夏各地均可开展
	CO ₂ 生产啤酒碳酸饮料	商业化应用	1	饮料、啤酒属轻工纺织业，宁夏未来发展重点产业之一	1	可商业盈利	1	<1 万吨/年	0.2	0.85	市场竞争	-

4.2 宁夏碳利用产业布局建议

在前文研究基础上（见表 6），结合宁夏产业集群的分布特点，形成宁夏二氧化碳利用产业布局规划（如图 5）。宁夏的氰胺产能集中在北部的石嘴山市等地区，相关产业可以广泛利用工业捕获的 CO_2 进行氰胺生产。此外，利用 CO_2 合成丁二酸、可降解塑料、碳纳米管，以及开展钢渣、电石渣、磷石膏固碳可服务于当地新型材料产业的发展。

银川市分布有多家啤酒、饮料加工厂，为 CO_2 在轻工产业的应用提供了机会。

宁东能源化工基地作为重要的煤炭、煤电、煤化工产业示范区，拥有大量高浓度 CO_2 烟气来源，具备利用 CO_2 合成化工和燃料产品的产业基础，并对碳利用产品有旺盛

的市场需求。开展 CO_2 合成甲醇、合成气、碳酸二甲酯等碳利用方式能够推动当地现代化工产业的绿色低碳创新发展。

宁夏东部的盐池地区拥有盐碱水、光照充足、温度适宜等自然优势，以及靠近宁东基地、 CO_2 气源充足等地理优势，是发展微藻养殖产业的理想区域，建议以盐池县为基地，稳步推进微藻固碳产业的发展。

宁夏东部的长庆油田宁夏油区黄 138 新区已启动钻探，盐 67 等老区也在同步开展 CCUS，建议加快推进宁东基地煤化工百万吨级 CCUS 项目，将二氧化碳驱油利用和地质封存作为能源化工行业脱碳的重要抓手。

宁夏中西部及南部是农业聚集区，可将二氧化碳作为气肥应用于农业产业的增产增效。

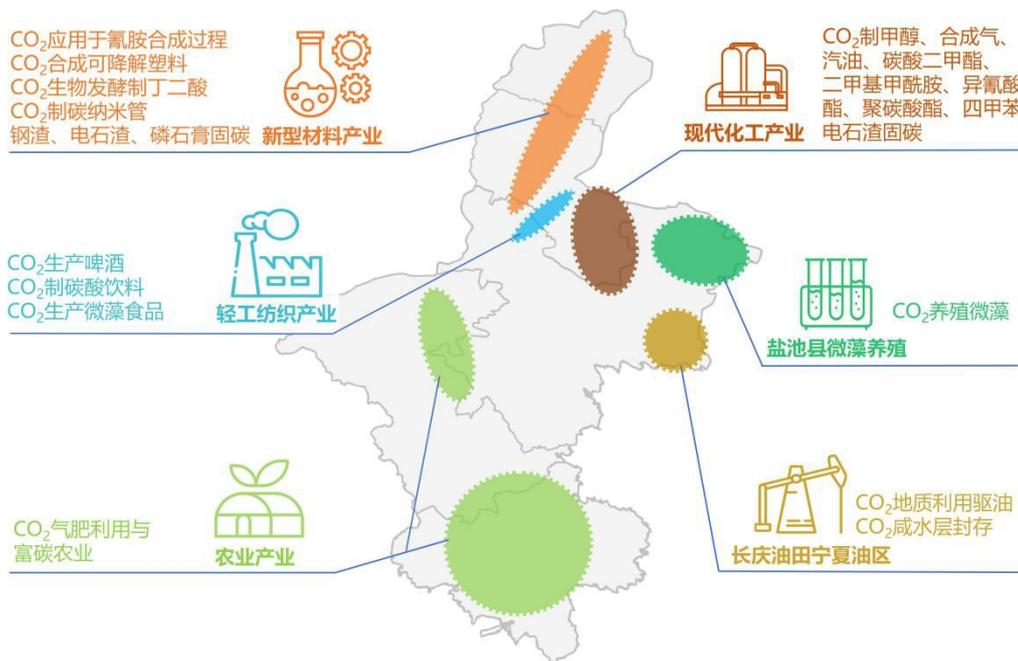


图 5 宁夏二氧化碳利用产业布局建议

Fig.5 Proposal for carbon dioxide utilization industry layout in Ningxia

5 结 论

本文系统梳理了 CO₂ 利用技术发展现状, 构建了碳利用产业发展技术路线分析方法,

建立了考虑技术成熟度、与当地产业契合度、技术经济性以及减排潜力四项指标的碳利用技术指标评价体系。在此基础上, 基于宁夏的资源禀赋、产业基础和未来产业布局规划情况, 形成宁夏碳利用产业发展技术路线及产业布局研究结论, 主要包括以下两点:

1) 对 CO₂ 利用技术在宁夏落地的适宜性评价结果表明, CO₂ 强化采油、CO₂ 加氢制甲醇、CO₂ 合成碳酸二甲酯、CO₂ 矿化养护混凝土、钢渣固碳以及微藻固碳等技术在技术经济性、与宁夏产业契合度、减排潜力等方面的综合评价中表现突出, 适合在宁夏优先发展; CO₂ 合成异氰酸酯、聚碳酸酯、四甲苯, 电石渣、磷石膏固碳, 以及 CO₂ 气肥利用等技术表现良好, 适合通过试点示范的方式开展前沿技术探索和储备。

2) 基于宁夏各地产业基础、未来规划和资源禀赋, 宁夏北部石嘴山市较适合发展 CO₂ 合成可降解塑料、丁二酸、碳纳米管, 开展钢渣、电石渣、磷石膏固碳等项目, 以及将 CO₂ 应用于氰胺合成过程, 相关项目与当地布局的新型材料产业的契合度较高; 在银川市及周边轻工业集聚区, 适合开展利用 CO₂ 制作饮料、啤酒; 在宁东能源化工基地, 凭借扎实的煤化工产业基础, 适合开展利用 CO₂ 合成甲醇、合成气、碳酸二甲酯等化工产品; 宁夏东部的盐池地区和长庆油田宁夏油区分别具备有利于微藻固碳产业以及 CO₂ 驱油和封存产业发展的条件; 宁夏中西部及南部地区作为农业聚集区, 适合开展 CO₂ 气肥利用。以上二氧化碳利用技术布局将有利于更好地促进宁夏能源、化工、材料等行业的绿色发展。

致谢

感谢宁夏回族自治区发展和改革委员会支持本项研究课题的开展, 感谢宁夏工信厅、生态环境厅、科技厅等部门对于课题研究

工作的参与和支持。

参考文献(Reference):

- [1]FENG C, ZHU R, WEI G S, et al. Typical case of carbon capture and utilization in chinese iron and steel enterprises: co₂ emission analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2022,363:132528.
- [2]EDOUARD M N, OKERE C J, EJIKE C, et al. Comparative numerical study on the co-optimization of co₂ storage and utilization in eor, egr, and ewr: implications for ccus project development[J]. Applied Energy,2023,347:121448.
- [3]DO T N, CHUNG H, LEE Y, et al. Optimization-based framework for technical, economic, and environmental performance assessment of co₂ utilization strategies[J]. Ifac-Papersonline, 2022, 55(7):412-417.
- [4]SU X, LIU S, ZHANG L, et al. Wellbore leakage risk management in co₂ geological utilization and storage: a review[J]. Energy Reviews,2023:100049.
- [5]PAREKH A, CHATURVEDI G, DUTTA A. Sustainability analyses of co₂ sequestration and co₂ utilization as competing options for mitigating co₂ emissions[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 55:102942.
- [6]李海峰, 王强. CCUS 中 CO₂ 利用和地质封存研究[J]. 现代化工, 2022, 42(10):86-90. LI Haifeng, WANG Qiang. Study on utilization and geological storage of CO₂ in CCUS[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(10):86-90.
- [7]QIN J Z, ZHONG Q H, TANG Y, et al. Co₂ storage potential assessment of offshore saline aquifers in china[J]. Fuel, 2023, 341:127681.
- [8]GALAN G, MARTIN M, GROSSMANN I E. Systematic comparison of natural and engineering methods of capturing co₂ from the air and its utilization[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 37:78-95.
- [9]LIU Y L, RUI Z H. A storage-driven co₂ eor for a net-zero emission target[J]. Engineering, 2022, 18:79-87.
- [10]中国 21 世纪议程管理中心. 中国二氧化碳利用技术评估报告:《第三次气候变化国家评估报告》特别报告[M]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心,

- 2014.
- [11] SHAH B, SHAH M, SHAH V, et al. An anatomized study on the progress and prospects of CO₂ utilization technology[J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023,8:100381.
- [12] JIANG L, LIU W, WANG R Q, et al. Sorption direct air capture with CO₂ utilization[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023,95:101069.
- [13] FU L, REN Z, SI W, et al. Research progress on CO₂ capture and utilization technology[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 66:102260.
- [14] 许海超, 龚硕锴. 二氧化碳利用技术现状及未来发展趋势[J]. *广州化工*, 2022, 50(23):38-40.
- XU Haichao, GONG Shuokai. Current status and future developmental direction of carbon dioxide utilization[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50(23):38-40.
- [15] BASINI L E, FURESI F, BAUMGÄRTL M, et al. CO₂ capture and utilization (ccu) by integrating water electrolysis, electrified reverse water gas shift (e-rwgs) and methanol synthesis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377:134280.
- [16] IEA. Putting CO₂ to use[R]. Paris: IEA, 2019.
- [17] ZHU Y, LI B, MIAO J, et al. Achieving zero CO₂ emissions from integrated biomass gasification with CO₂ capture and utilization (igccu)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,474:145767.
- [18] ZHAO X, XIAO J, HOU J, et al. Economic and scale prediction of CO₂ capture, utilization and storage technologies in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023,50(3):751-764.
- [19] ALBERICI S, NOOTHOUT P, MIR G U R, et al. Assessing the potential of CO₂ utilisation in the UK[R]. Utrecht: Ecofys, 2017.
- [20] CHAUVY R, De WEIRELD G. CO₂ utilization technologies in Europe: a short review[J]. *Energy Technology*, 2020,8(12):2000627.
- [21] National Academies Of Sciences, Engineering And Medicine. Carbon dioxide utilization markets and infrastructure: status and opportunities: a first report[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2022.
- [22] 経済産業省. 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略[EB/OL]. (2021-06-18)[2023-05-06]. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html.
- [23] 广东南方碳捕集与封存产业中心. 宁夏二氧化碳产业发展路径研究报告[R]. 广州: 广东南方碳捕集与封存产业中心, 2023.
- [24] 人民日报客户端宁夏频道. 聚焦党代会 | 宁夏将聚力打造“六新六特六优”产业[EB/OL]. (2022-06-15)[2023-05-08]. https://dofcom.nx.gov.cn/xwzx_274/tpxw/202206/t20220615_3572090.html.
- [25] 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.
- [26] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)[R]. 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023.
- [27] 计秉玉, 何应付. 中国石化低渗透油藏 CO₂ 驱油实践与认识[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(06):805-811.
- JI Bingyu, HE Yingfu. Practice and understanding about CO₂ flooding in low permeability oil reservoirs by Sinopec[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(06):805-811.
- [28] 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望[J]. *石油勘探与开发*, 2022,49(04):828-834.
- YUAN Yishi, MA Desheng, LI Junshi, et al. Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(04):828-834.
- [29] SUI H, ZHANG F, ZHANG L, et al. Mechanism of CO₂ enhanced oil recovery in kerogen pores and CO₂ sequestration in shale: a molecular dynamics simulation study[J]. *Fuel*, 2023,349:128692.
- [30] GODEC M, KOPERNA G, GALE J. CO₂-EOR: a review of its status and global potential[J]. *Energy Procedia*, 2014,63(C):5858-5869.
- [31] WANG H, ZHANG L, LEI H, et al. Potential for uranium release under geologic CO₂ storage conditions: the impact of Fe(III)[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021,107:103266.
- [32] 刘世奇, 皇凡生, 杜瑞斌, 等. CO₂ 地质封存与利用示范工程进展及典型案例分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2023,51(02):158-174.

- LIU Shiqi, HUANG Fansheng, DU Ruibin, et al. Progress and typical case analysis of demonstration project of geological sequestration and utilization of CO₂[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(02):158-174.
- [33]苏静, 张宗飞, 张大洲. 二氧化碳加氢制甲醇的技术进展及展望[J]. *化肥设计*, 2022, 60(02):6-9.
- SU Jing, ZHANG Zongfei, ZHANG Dazhou. Technical progress and prospects of carbon dioxide hydrogenation to methanol[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2022, 60(02):6-9.
- [34]YANG N, KANG F, ZHANG K, et al. A strategy for CO₂ capture and utilization towards methanol production at industrial scale: an integrated highly efficient process based on multi-criteria assessment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 293:117516.
- [35]WANG S, YANG J, ZHAO N, et al. Mechanistic study on the hydrogenation of CO₂ to methanol over Cu-Mn-La-Zr catalysts prepared by different methods[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2023, 51(7):970-976.
- [36]中国新闻网. 全球首套千吨级二氧化碳加氢制汽油示范装置开车成功[EB/OL]. (2022-03-04)[2023-04-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726356321950604555&wfr=spider&for=pc>.
- [37]LI P, ZHANG S, XIAO Z, et al. Ni-tio₂ catalysts derived from metal-organic framework for efficient photo-thermal CO₂ methanation[J]. *Fuel*, 2024, 357:129817.
- [38]WEI W, WANG Y, YAN Z, et al. One-step dmc synthesis from CO₂ under catalysis of ionic liquids prepared with 1,2-propylene glycol[J]. *Catalysis Today*, 2023, 418:114052.
- [39]GIRARD A, SIMON N, ZANATTA M. Insights on recyclable catalytic system composed of task-specific ionic liquids for the chemical fixation of carbon dioxide[J]. *Green Chemistry*, 2014, 16(5):2815-2825.
- [40]阮佳纬, 叶香珠, 陈立芳, 等. 离子液体和低共熔溶剂催化二氧化碳合成有机碳酸酯的研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(03):1176-1186.
- RUAN Jiawei, YE Xiangzhu, CHEN Lifang, et al. Recent progress in synthesis of organic carbonates from carbon dioxide catalyzed by ionic liquids and deep eutectic solvents[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(03):1176-1186.
- [41]尚丽, 刘双, 沈群, 等. 典型二氧化碳利用技术的低碳成效综合评估[J]. *化工进展*, 2022, 41(03):1199-1208.
- SHANG Li, LIU Shuang, SHEN Qun, et al. Comprehensive evaluation of low carbon performance of typical carbon dioxide utilization technologies[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(03):1199-1208.
- [42]陈东良. 非光气 MDI 绿色化工清洁生产技术研发进展[J]. *山西化工*, 2022, 42(01):37-39.
- CHEN Dongliang. Research progress of non-phosgene MDI green chemical cleaner production technology[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2022, 42(01):37-39.
- [43]LIU J, ZENG C, LI Z, et al. Carbonation of steel slag at low CO₂ concentrations: novel biochar cold-bonded steel slag artificial aggregates[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902:166065.
- [44]FERRARA G, BELLI A, KEULEN A, et al. Testing procedures for CO₂ uptake assessment of accelerated carbonation products: experimental application on basic oxygen furnace steel slag samples[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 406:133384.
- [45]CHENG C, HUANG W, XU H, et al. CO₂ sequestration and CaCO₃ recovery with steel slag by a novel two-step leaching and carbonation method[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 891:164203.
- [46]LIU S, RONG P, ZHANG C, et al. Preparation and carbonation hardening of low calcium CO₂ sequestration materials from waste concrete powder and calcium carbide slag[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 141:105151.
- [47]谢和平, 岳海荣, 朱家骅, 等. 工业废料与天然矿物矿化利用二氧化碳的基础科学与工程应用研究[J]. *Engineering*, 2015, 1(01):299-314.
- XIE Heping, YUE Hairong, ZHU Jiahua, et al. Scientific and engineering progress in CO₂ mineralization using industrial waste and natural minerals[J]. *Engineering*, 2015, 1(01):299-314.
- [48]杨馥宁. 磷石膏矿化二氧化碳生产硫酸铵和碳

酸钙试验探索[J]. 硫酸工业,2022(04):15-17.

YANG Funing. Study on the production of ammonium sulfate and calcium carbonate by mineralizing carbon dioxide with phosphogypsum[J]. Sulphuric Acid Industry,2022(04):15-17.

[49]ESMAEILI A, MOGHADAM H A, GOLZARY A. Application of marine microalgae in biodesalination and CO₂ biofixation: a review[J]. Desalination, 2023, 567:116958.

[50]ZHU C, HU C, WANG J, et al. A precise microalgae farming for CO₂ sequestration: a critical review and perspectives[J]. Science of the Total Environment,2023,901:166013.

[51]马国杰, 常春, 孙绍辉. 能源微藻规模化培养影响因素的研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(12):5323-5329.

MA Guojie, CHANG Chun, SUN Shaohui. Research progress on influencing factors of large scale cultivation of microalgae for energy production[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12):5323-5329.

[52]宁夏回族自治区碳达峰目标研判分析报告[R]. 银川, 2022.

[53]科学技术部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心. 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图研究[R]. 北京, 2018.

[54]政协研究一室. 延伸产业链 提高附加值 唱响“世界氟胺之都” [EB/OL]. (2022-03-16)[2022-06-05].http://www.nxxz.gov.cn/zxgz/sqmy/sqmydsyjwyh/202203/t20220316_521158.html.

[55]崔艳宏. 超临界流体提取宁夏枸杞籽中有效成分研究[D]. 大连理工大学, 2018.