



广东南方碳捕集与封存产业中心
Guangdong CCUS Centre

宁夏二氧化碳产业发展路径研究报告 (决策者摘要)

广东南方碳捕集与封存产业中心

2023年1月





目录

鸣谢	1
摘要	2
01 项目背景	5
02 宁夏现有二氧化碳利用途径	6
03 二氧化碳利用技术进展	7
04 宁夏碳利用技术路径筛选分析	9
05 宁夏碳利用产业布局建议	11
06 宁夏CCUS集群发展建议	12
07 宁夏二氧化碳产业发展目标建议	13

项目工作组

研究团队

蒋哲文 宁夏回族自治区发展和改革委员会党组成员、副主任
马 骏 宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处原处长，福建省莆田市城厢区委副书记
刘 硕 宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处副处长
张志璐 宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处副处长
王 荣 宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处四级调研员
王 倩 宁夏回族自治区发展和改革委员会碳减排处二级主任科员
李 航 宁夏回族自治区发展和改革委员会产业发展处处长
王消寒 宁东能源化工基地管委会节能与碳减排促进中心主任

范永春 广东南方碳捕集与封存中心主任
梁 希 广东南方碳捕集与封存中心秘书长
朱和平 广东南方碳捕集与封存中心理事
夏菖佑 广东南方碳捕集与封存中心CCUS项目总监
王 莉 广东南方碳捕集与封存中心业务发展总监
刘牧心 广东南方碳捕集与封存中心创新管理总监
罗海中 广东南方碳捕集与封存中心顾问专家
林海周 广东南方碳捕集与封存中心顾问专家
马诗佳 广东南方碳捕集与封存中心碳封存高级工程师
叶知远 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理
高志豪 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理
余晓洁 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理
宋欣珂 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理
黄 冕 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理
王宇迪 广东南方碳捕集与封存中心CCUS研究助理

顾问专家

张九天 中国CCUS专业委员会秘书长、北京师范大学中国绿色发展协同创新中心执行副主任
林干果 中国CCUS产业技术创新战略联盟秘书长、上海交通大学教授
彭 勃 北京市温室气体封存和石油开采利用重点实验室主任、中国石油大学（北京）教授
张明辉 国家能源集团新疆化工有限公司总经理、党委副书记
赵洪涛 中国神华煤制油化工有限公司科技管理部主任
王 亮 中国科学院大连化学物理研究所研究员
柳丽芬 大连理工大学教授

鸣 谢

感谢宁夏自治区发改委支持本研究课题的开展，感谢宁夏工信厅、生态环境厅、科技厅、财政厅、农业农村厅、市场监管厅、地质局、机关事务管理局、宁东能源化工基地管委会、银川市发改委、石嘴山市发改委、中卫市发改委、吴忠市发改委、固原市发改委、中国人民银行银川中心支行对于课题研究工作的参与和支持。

感谢以下企业单位对于本课题研究工作的支持：国家能源集团宁夏煤业有限责任公司、国家能源集团宁夏电力有限公司、中国电建宁夏回族自治区电力设计院有限公司、中国石油天然气股份有限公司宁夏石化分公司、宝丰能源集团股份有限公司、中国石化长城能源化工（宁夏）有限公司、宁夏钢铁（集团）有限责任公司、宁夏电投西夏热电有限公司、吴忠赛马新型建材有限公司、宁夏嘉峰化工有限公司、宁夏青铜峡水泥股份有限公司、宁夏和宁化学有限公司、宁夏贝利特生物科技有限公司、宁夏格瑞精细化工有限公司、宁夏昆仑高科硅制品有限公司、宁夏首朗吉元新能源科技有限公司、宁夏大地循环发展股份有限公司、宁夏德大气体开发科技有限公司、宁夏鼎盛阳光环保科技有限公司、宁夏宁鲁石化有限公司、宁夏新大泽微藻生物科技有限公司、宁夏瀛海天祥建材有限公司、宁夏同辉气体有限公司、宁夏兴尔泰化工集团有限公司、宁夏渝丰化工股份有限公司。

摘要

宁夏是全国重要生态屏障和生态通道，承担着建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区的时代重任。在“双碳”战略目标背景下，宁夏“一煤独大”的能源结构、“倚重倚能”的产业结构面临升级转型挑战，工业行业高浓度排放源积极寻找CO₂资源化、循环化利用途径。在宁夏发展改革委碳减排处指导下，广东南方碳捕集与封存产业中心按照“变废为宝、点碳成金”的思路，开展宁夏二氧化碳产业发展路径研究，通过提出契合产业发展需要、具备生态效益和经济效益的碳产业发展路线图，为宁夏培育碳产业、发展碳经济、促进碳减排提供科学支撑。

研究发现，宁夏化工、石化行业发达，高浓度CO₂排放源丰富，每年80–90%浓度CO₂排放超过1700万吨，90%浓度以上CO₂超过1660万吨，二氧化碳产业发展需求与潜力大。项目组调研发现，宁夏全区目前拥有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，二氧化碳在化工、生物、建材、地质、农业、食品领域已实现广泛应用，初步形成“化工为主、多元利用为辅”的碳产业格局。其中，尿素和碳酸氢铵化肥是宁夏CO₂利用量最大的路径，每年利用二氧化碳约50–80万吨；其次是氰胺材料的生产过程，每年利用二氧化碳超过15万吨。除此之外，CO₂还广泛应用于微藻养殖、发泡生产挤塑板、萃取枸杞籽油、饮料制造、强化采油等领域。

项目组针对目前已有中试或示范项目基础的CO₂利用技术进行深度调研，系统分析技术成熟度、示范成效、经济效益以及在宁夏应用的减排潜力和落地方式。基于技术成熟度、与



宁夏产业契合度以及国家产业支持方向，建议“十四五”“十五五”时期宁夏优先发展CO₂强化采油、微藻养殖、发泡制挤塑板、加氢制甲醇、制备合成气、碳酸二甲酯、丁二酸、可降解塑料、养护混凝土以及钢渣固碳，试点示范CO₂合成汽油、异氰酸酯、聚碳酸酯、二甲基甲酰胺、四甲苯、碳纳米管、气肥利用、咸水层封存以及电石渣、磷石膏固碳。对于CO₂应用于氰胺合成、尿素生产、碳酸氢铵生产、萃取植物油和饮料制造等成熟领域，建议不纳入碳产业未来重点发展方向。

研究建议宁夏遵循“碳价引导、有序推进”“统筹发展、重点突破”“先行先试、防范风险”“开放合作，协同联动”四条原则，以企业牵头、政府支持、高校院所支撑的方式稳妥有序推进碳产业发展，打造全国碳利用技术示范和应用中心。研究提出到2025年（预计碳市场价格达到100元/吨），力争宁夏全区建成投运的CO₂捕集与利用能力达到250万吨/年，全面建立覆盖地质利用、化工利用、生物利用多渠道的CO₂利用技术路径；到2030年（预计碳市场价格达到200元/吨），全区CCUS产业集群初步形成，建成投运的CO₂捕集利用和封存能力达到500万吨/年，支撑宁夏顺利实现碳达峰目标；到2035年，（预计碳市场价格达到400元/吨），形成完整的CCUS产业链，全区建成投运的CO₂捕集利用和封存能力达到1000万吨/年，CCUS产业集群规模处于全球领先水平。建议围绕激励政策、行业标准、产业上下游协作机制、技术创新与示范体系、行业发展规划等方面形成宁夏碳产业政策支撑体系，努力推动二氧化碳产业成为宁夏实现双碳目标、打造“六新”产业体系的重要牵引。





01 项目背景

宁夏是“一带一路”国家战略的重要节点，是中国重要的生态屏障和生态通道，承担着建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区的重任。“十三五”期间，宁夏应对气候变化工作成效显著，碳排放强度增长趋势得到扭转，单位地区生产总值能耗降幅完成国家下达目标任务，银川市、吴忠市获批国家低碳城市试点，新能源、新材料等新型工业规模日益壮大，为“十四五”时期进一步节能降碳奠定了良好基础。2022年1月，宁夏回族自治区党委和政府印发《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实施意见》提出：到2025年，宁夏全区单位地区生产总值碳排放比2020年下降16%；到2030年，碳排放量顺利实现达峰，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效；到2060年，顺利实现碳中和目标。2022年10月发布的《宁夏回族自治区碳达峰实施方案》进一步明确，将通过能源绿色低碳转型行动、节能降碳增效行动、工业领域碳达峰行动等“十大行动”，力争2030年前实现碳达峰。

宁夏回族自治区第十三次党代会提出聚力打造“六新六特六优”产业，实施产业振兴战略，开展新型工业强区计划。碳达峰、碳中和是重大战略机遇，对宁夏加快产业结构优化升级、推动形成绿色低碳的产业结构和生产方式、建设人与自然和谐共生的现代化具有重要意义。现代化工、清洁能源、装备制造、新型材料等宁夏“六新”产业有望抓住“双碳”重大战略机遇，优化产业结构和布局，推动产业向高端化、绿色化、智能化、融合化方向发展。

当前宁夏仍处于工业化、城镇化深入发展的历史阶段，传统行业所占比重依然较高，战略性新兴产业、高技术产业尚未成为经济增长的主导力量，能源结构偏煤、能源效率偏低的情况没有得到根本性改变，资源环境约束加剧，碳达峰、碳中和时间窗口偏紧，技术储备不足。在该形势下，宁夏要按时实现碳达峰、碳中和目标，可以说任务艰巨、难度巨大，需要做好顶层设计，确定重点领域，实施倒逼机制，协调各方关系，才能够确保目标如期实现。

为如期实现碳达峰、碳中和目标，加快形成绿色低碳的现代产业体系，在宁夏回族自治区发改委的指导下，广东南方碳捕集与封存产业中心承担开展宁夏二氧化碳产业发展研究。本研究立足于宁夏资源禀赋与产业特征，开展宁夏二氧化碳利用产业发展规划与技术路线图研究。按照“变废为宝、点‘碳’成金”的思路，通过实地调研、文献分析、专家访谈等方式摸清宁夏二氧化碳利用市场需求，明确二氧化碳地质利用、化学利用、生物转化等多种资源化利用方式在宁夏的应用前景、空间布局、发展重点、经济效益、发展时序，结合宁夏实际提出二氧化碳利用产业发展的时间表、路线图，给出技术创新、政策支持、产业协同等方面咨询建议，为宁夏实现碳达峰、碳中和目标提供科技支撑和智力支持。

02 宁夏现有二氧化碳利用途径

宁夏已经开展类型丰富的二氧化碳利用途径，涵盖地质利用、化工利用、生物利用、食品利用等领域，在减少CO₂排放的同时，实现建筑材料、化学品、生物产品的绿色生产，部分项目已经实施且具有较好的经济效益。宁夏2022年CO₂利用总量约90-100万吨/年，主要集中在化工行业。目前最大的碳利用途径是合成尿素、碳酸氢铵化肥（图1）。

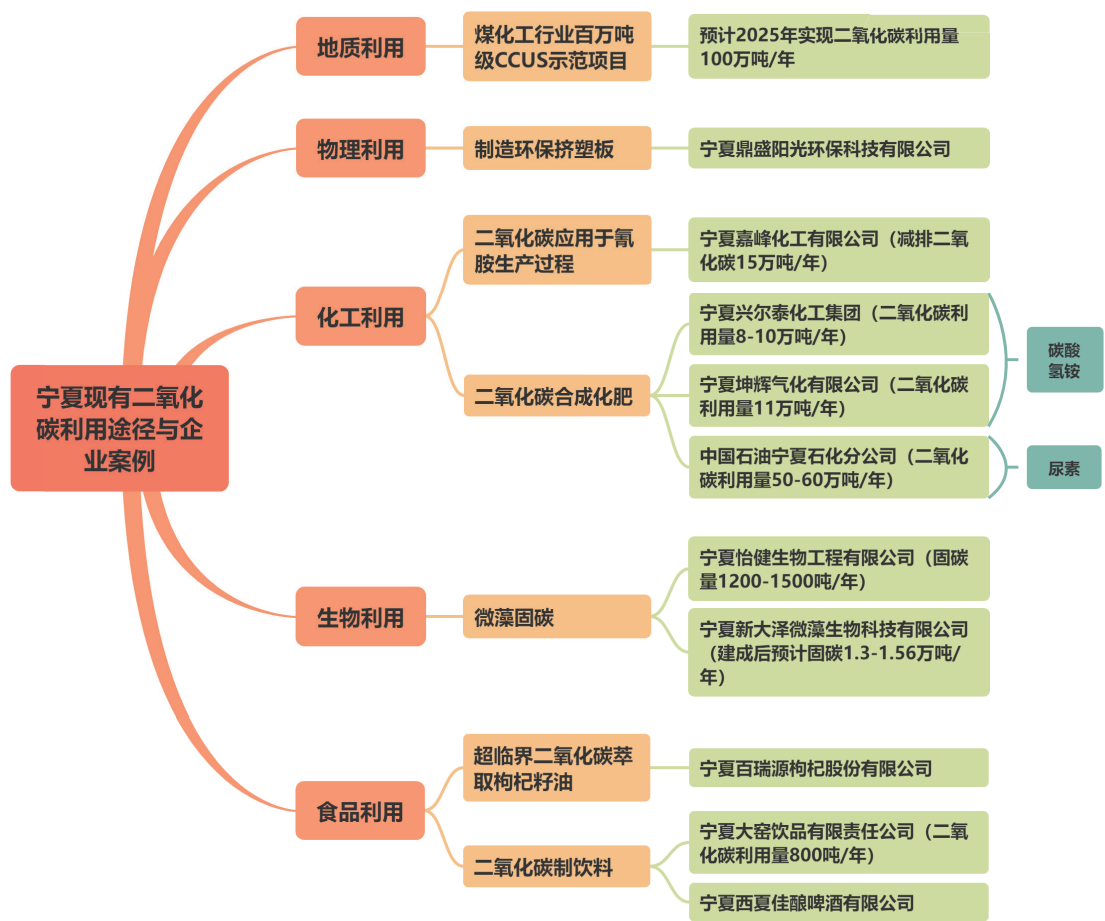


图1 宁夏现有碳利用技术路径与碳利用规模

03 二氧化碳利用技术进展

近年来，全球在二氧化碳利用技术研究领域取得显著进展，我国在相关领域也取得长足进步，二氧化碳利用新技术、新项目层出不穷，工业示范稳步推进，应用潜力日益突出。整体上，我国二氧化碳利用技术水平与发达国家相当，且部分技术处于优势，但也有少数技术存在差距（图 2）。例如，在CO₂地质利用方面，我国在胜利油田已建成百吨级CO₂驱油项目，国内主要陆上油田均已采用CO₂作为提高石油采收率的关键手段；在CO₂合成燃料方面，我国已率先建成二氧化碳制取绿色甲醇、合成汽油、制备合成气中试项目，技术能力在全球较为领先；在CO₂合成化工产品方面，我国已开展CO₂合成碳酸二甲酯、异氰酸酯、二甲基甲酰胺、四甲苯、丁二酸、可降解塑料、碳纳米管等领域中试项目，部分应用技术处于全球领先水平；在CO₂农业应用方面，CO₂合成尿素、碳酸氢铵化肥是成熟产业，CO₂气肥已在部分省份进行重点示范和推广，CO₂培育微藻商业化应用成熟。除此之外，我国科学家率先实现CO₂人工合成淀粉、葡萄糖，在CO₂有机化工领域取得巨大突破。与此同时，我国在部分碳利用技术领域与国际先进水平仍有差距，主要体现在我国在CO₂强化采油、强化天然气开采和生物发酵制丁二酸等应用技术领域和国际领先水平尚有差距，此外，我国在CO₂利用的基础研究领域仍存在较大不足。

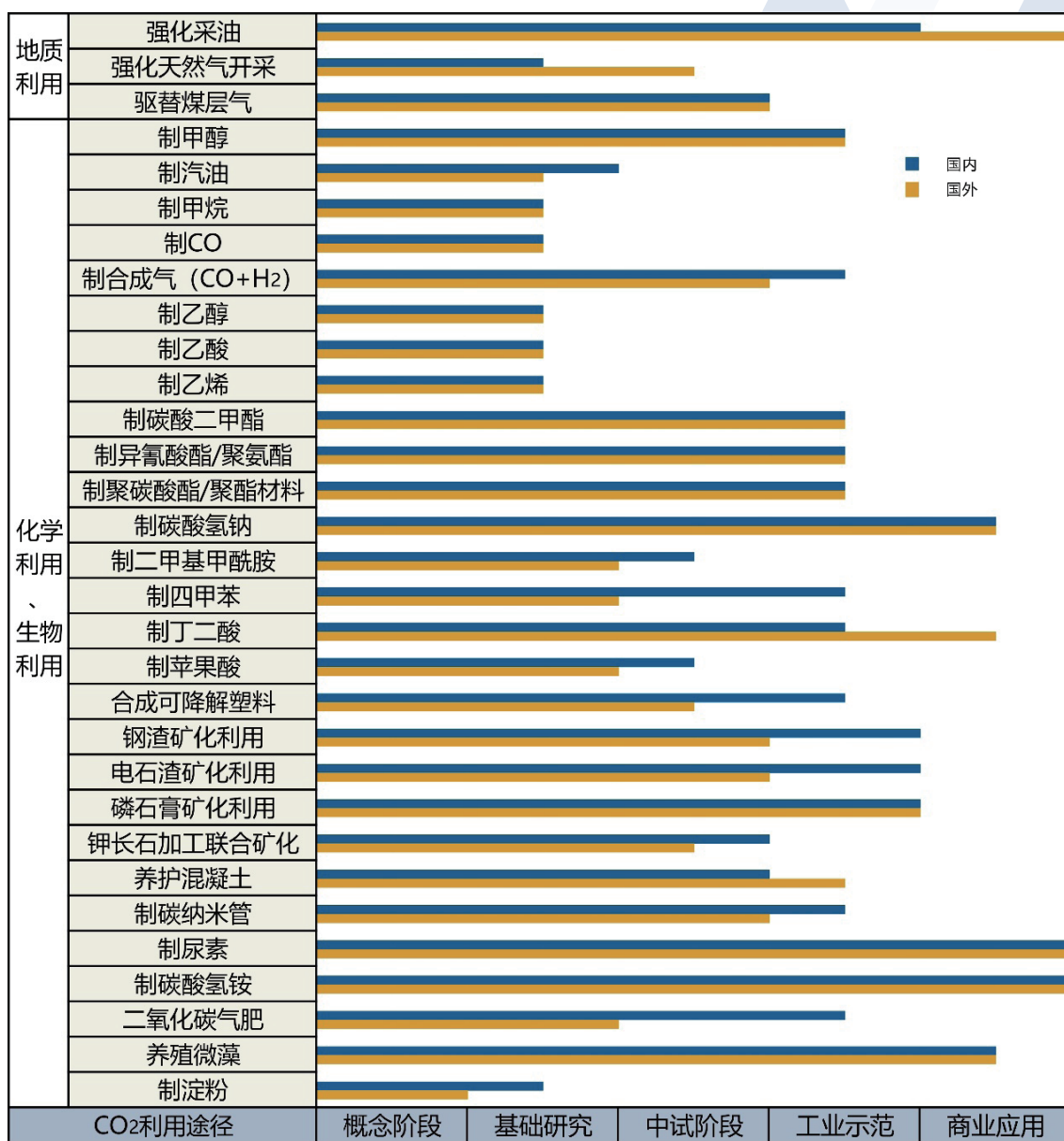


图2 2022年全球二氧化碳利用技术进展情况¹

1 技术信息主要基于课题组调研、《中国碳捕集利用与封存技术评估报告》以及国家科技部中国21世纪议程管理中心资料。

04 宁夏碳利用技术路径筛选分析

针对宁夏的碳利用技术筛选分析主要基于三方面考虑：一是技术的成熟度，尚处于实验室研究阶段或仅开展小试项目的技术暂不纳入重点考量范畴；二是与宁夏产业的契合度，优先选择与宁夏煤炭、风光资源、化工和农业产业契合度较高的技术；三是利用路径需符合清洁低碳、绿色循环的产业发展方向，对于国家产业政策限制类的碳利用不予重点考虑。

在CO₂地质利用方面，CO₂强化采油的技术成熟度最高、减碳规模最大，建议“十四五”、“十五五”时期优先发展CO₂驱油利用。CO₂强化天然气开采、驱替煤层气技术尚不成熟，短期内暂不推荐开展规模化应用。CO₂地质封存是实现“碳中和”目标的托底技术，建议关注相关技术的示范和储备。

在CO₂合成燃料方面，甲醇、汽油、合成气在宁夏本地有旺盛的市场需求，且能解决宁夏风光储能问题，因此建议重点关注。尤其是CO₂与绿氢耦合发展对于宁夏化工产业的脱碳至关重要，推荐优先开展CO₂加氢制甲醇技术示范。CO₂合成燃料甲烷、一氧化碳技术仍处于基础研究阶段，尚不具备开展示范项目的技术成熟度条件。

在CO₂合成化工产品和材料方面，CO₂制备碳酸二甲酯、异氰酸酯、二甲基甲酰胺、四甲苯已经开展一定规模的中试或示范项目，且与宁夏化工产业契合度较高，能够实现产业链延伸与增强。CO₂制备丁二酸、可降解塑料、碳纳米管与宁夏新型材料产业契合度高，且国内已经开展示范项目，技术相对成熟，也是本课题重点考察的碳利用方向。

在工业废渣固碳与CO₂生产绿色建材方面，CO₂发泡生产挤塑板在宁夏已有产业基础，建议未来持续扩大应用规模。钢渣、电石渣、磷石膏固碳和CO₂养护混凝土在国内已经开展示范项目，技术比较成熟，且部分示范项目已经实现盈利，因此“十四五”期间应重点关注相关技术的应用。此外，钾长石加工过程中产生的提钾废渣也可与CO₂反应生产碳酸钙等产品，但宁夏地区的钾长石矿资源较少，相关产业不集中，提钾废渣产量低，因此提钾废渣固碳技术不在推荐技术清单之列。

在CO₂农业与食品利用方面，CO₂制尿素和碳酸氢铵属于传统产业，不应纳入未来碳利用产业的重点支持方向。CO₂养殖微藻在宁夏已经有产业基础，未来建议稳步扩大产业规模。CO₂气肥利用在内蒙古自治区已经开展示范应用，建议宁夏长期关注技术示范的成效，因地制宜将CO₂气肥应用于增产经济效益较好的农作物栽培过程。CO₂生产啤酒和碳酸饮料等市场已经高度成熟，因此不纳入碳利用产业未来的重点发展方向。CO₂制淀粉、葡萄糖、脂肪酸等技术仍处于早期实验室研究阶段，尚无法预见其应用前景，因此不在本课题推荐的碳利用技术清单中。

基于推荐的碳利用技术，研究团队建议从两条路径推进宁夏二氧化碳产业发展（图3），一是对于宁夏既有的、潜力大的CO₂利用方式，持续扩大CO₂利用规模；二是针对应用前景好、与宁夏资源禀赋、产业特征契合度较高的CO₂利用技术，开展技术引进与技术示范。

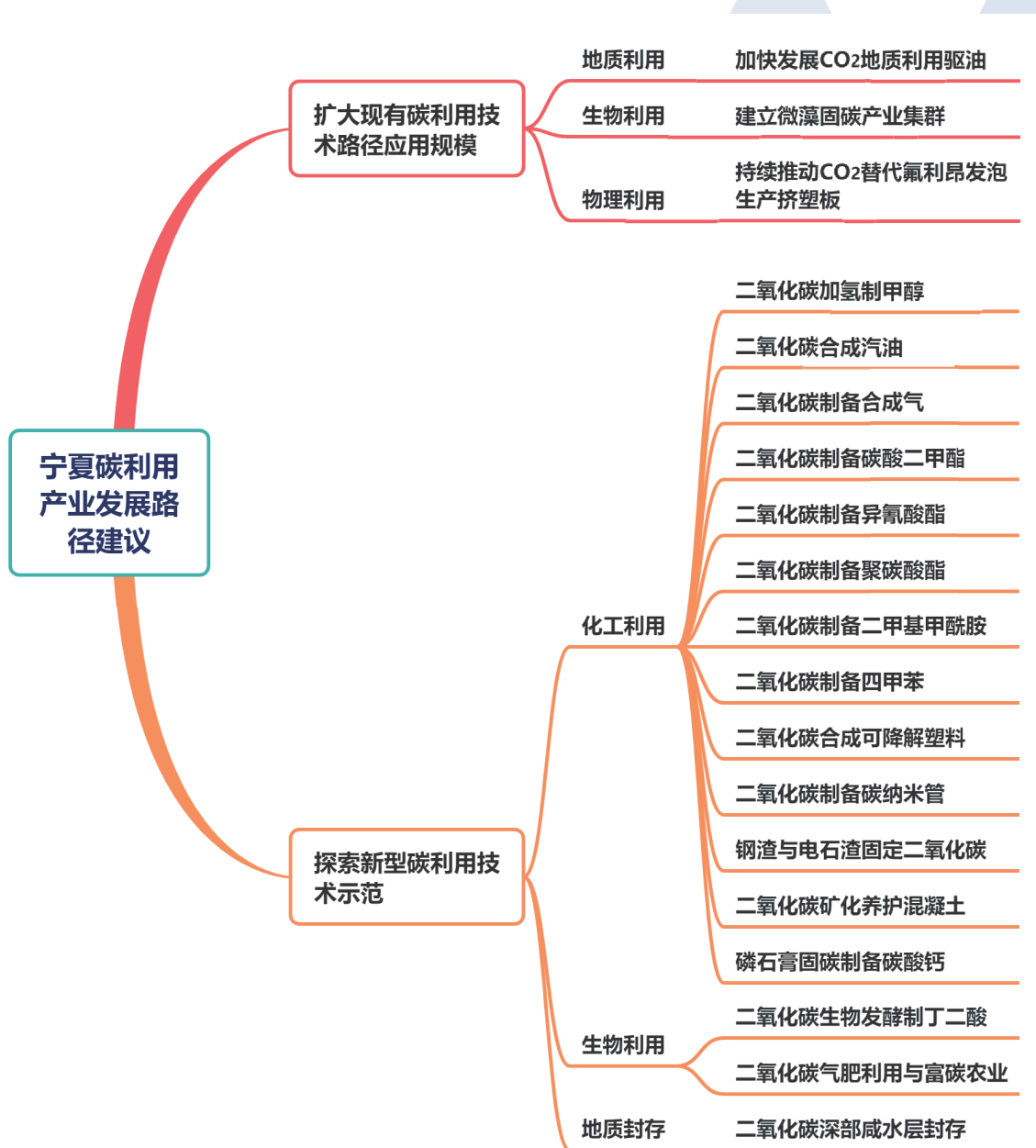


图3 宁夏二氧化碳利用产业发展路径建议

05 宁夏碳利用产业布局建议

多项CO₂化工、地质和生物利用技术在宁夏均有应用场景，有望推动宁夏在全国率先形成具备生态效益、经济效益的二氧化碳产业。其中，“十四五”“十五五”时期建议优先发展CO₂强化采油、微藻养殖、发泡制挤塑板、加氢制甲醇、制备合成气、碳酸二甲酯、丁二酸、可降解塑料、养护混凝土以及钢渣固碳，试点示范CO₂合成汽油、异氰酸酯、聚碳酸酯、二甲基甲酰胺、四甲苯、碳纳米管、气肥利用、咸水层封存以及电石渣、磷石膏固碳。二氧化碳利用将重点与宁夏现代化工产业、新型材料产业和轻工纺织产业深度结合（图4），促进业优化升级和高质量发展。

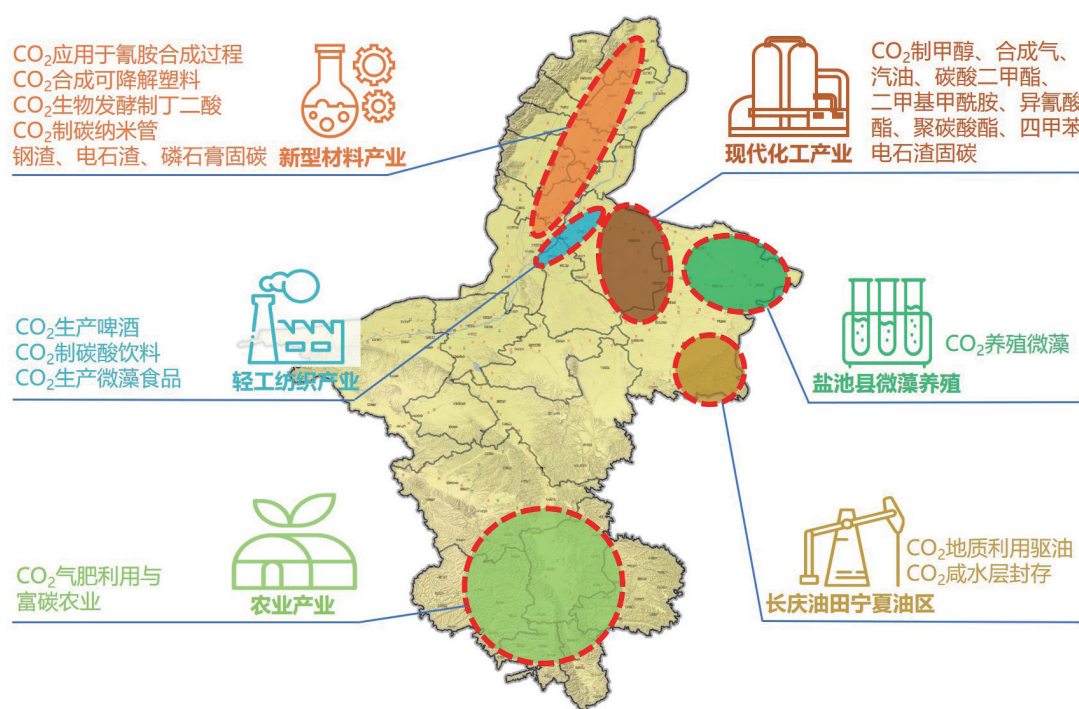


图4 宁夏二氧化碳产业发展布局建议

06 宁夏CCUS集群发展建议

CCUS集群是指区域内排放源企业先后开展碳捕集项目、共同参与碳运输和碳封存基础设施规划与建设，具有基础设施共享、能量资源交互利用、工业示范与商业应用衔接紧密等优势，是一种低成本、高效率、广覆盖、体系化的CCUS发展途径。根据宁夏大型排放源地理分布特征与行政区划，可考虑在宁夏区域内规划四个CCUS集群，分别是银川-吴忠集群、宁东集群、石嘴山集群、中卫集群。该划分方式具有行政管理高效、地理分布集中、基础设施统一的优点。每个CCUS集群未来可根据宁夏全区二氧化碳地质封存选址研究工程的成果，匹配相应的CO₂地质封存地点，形成宁夏全域CCUS源汇匹配与发展规划。

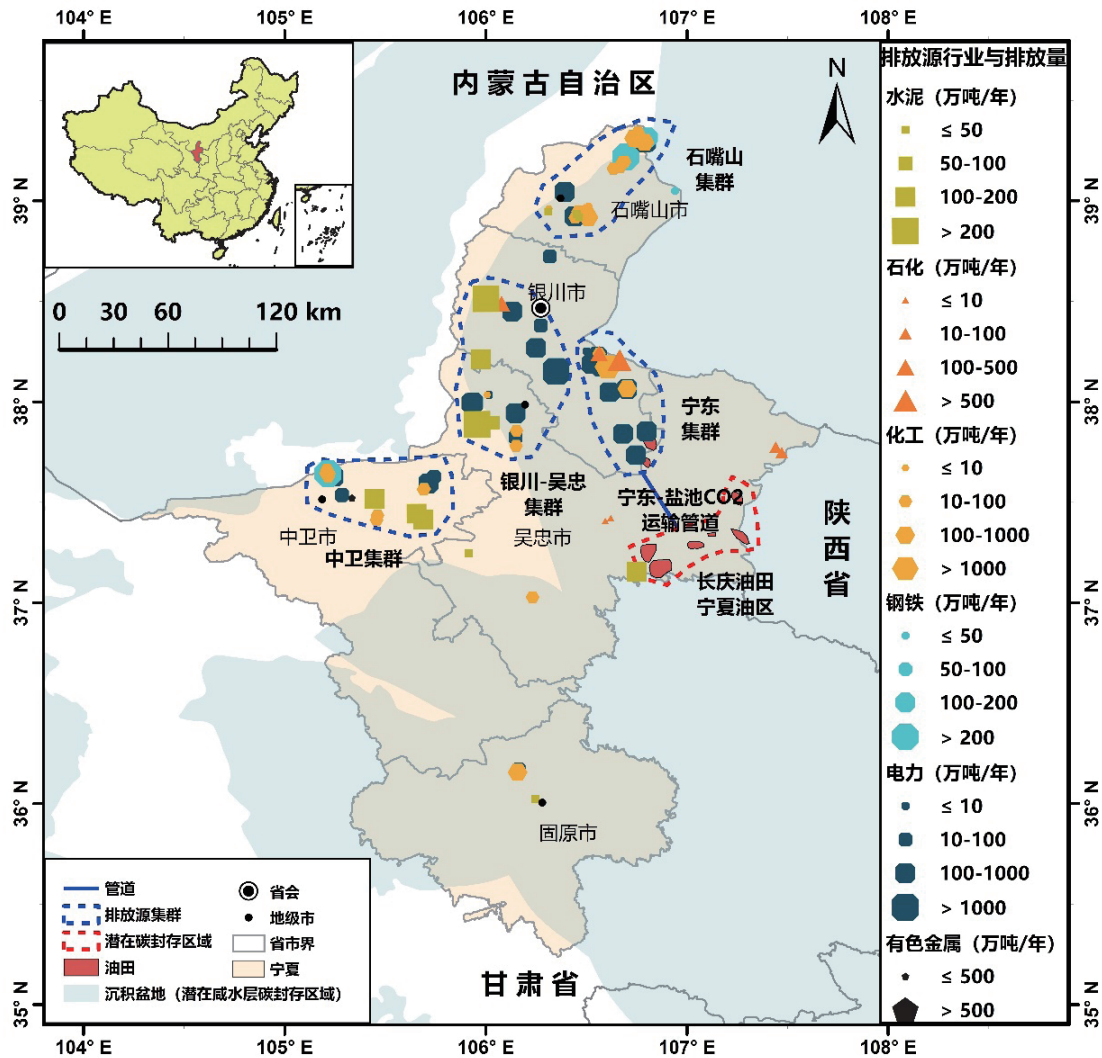


图5 宁夏主要工业排放源与油田、地下咸水层（地质碳汇）分布情况

07 宁夏二氧化碳产业发展目标建议

研究建议宁夏遵循“碳价引导、有序推进”“统筹发展、重点突破”“先行先试、防范风险”“开放合作，协同联动”四条原则，以企业牵头、政府支持、高校院所支撑的方式稳妥有序推进碳产业发展，打造全国碳利用技术示范和应用中心。宁夏二氧化碳产业发展目标建议如图6所示。研究建议：

1. 到2025年（预计碳市场价格达到100元/吨）²，全区建成投运的二氧化碳捕集与利用能力达到250万吨/年，全面建立覆盖地质利用、化工利用、生物利用多渠道的二氧化碳利用技术路径，重点推进二氧化碳强化驱油、加氢制甲醇、工业废渣固碳技术示范；部分现有碳利用技术的利用效率、利用规模显著提升，建成煤化工行业大型全流程CCUS示范项目，二氧化碳地质封存示范项目在选址研究、源汇匹配分析方面取得显著进展，完成全区二氧化碳运输管网初步规划与经济性评估。基本建立CCUS全流程的审批机制、监管机制，建立量化CCUS项目减排量的方法体系。实现CCUS项目减排量纳入碳市场交易。

2. 到2030年（预计碳市场价格达到200元/吨），全区CCUS产业集群初步形成，建成投运的二氧化碳捕集能力达到500万吨/年，二氧化碳利用与封存量同步突破500万吨/年，实现捕集成本和能耗较2020年下降15%–20%，全区大型排放源完成二氧化碳捕集方案与烟气接口预留，CCUS在全区碳达峰过程中起到关键作用，宁夏初步建成中西部地区领先的二氧化碳捕集、利用和技术服务产业体系。

3. 到2035年（预计碳市场价格达到400元/吨），形成完整的CCUS产业链，全区建成投运的二氧化碳捕集能力达到1000万吨/年，二氧化碳利用量突破800万吨/年，封存量突破200万吨/年，CCUS集群规模全球领先。二氧化碳在化工生产过程中广泛应用于有机材料、燃料生产，油田生产全面采用二氧化碳强化驱油，二氧化碳地质封存规模不断扩大，CCUS为实现宁夏自治区碳排放达峰后稳中有降做出重大贡献。宁夏科研机构与高等院校CCUS领域研究实力处于全国领先水平，掌握低能耗、低成本的碳捕集技术，以及安全可靠的碳封存和监测技术，部分研发成果进入商业应用阶段并具备产业化能力。

4. 当国内外气候政策发生重大变化，国内配额或自愿减排量价格达到500元/吨二氧化碳时，CCUS成为宁夏新兴的国民经济支柱产业，创造超过3万个就业机会，电力、钢铁、水泥等高排放行业广泛采用CCUS技术开展温室气体减排，全面建成经济高效、安全可靠的CCUS技术体系和产业集群。CCUS每年为宁夏减排超过1600万吨二氧化碳，为经济社会可持续发展提供技术支撑，为宁夏构建兼具韧性和弹性的能源系统做出巨大贡献。

2 碳价格预测来源：路孚特、2021年中国碳价调查报告、清华大学能源环境与经济研究所张希良团队、美国环保协会等。

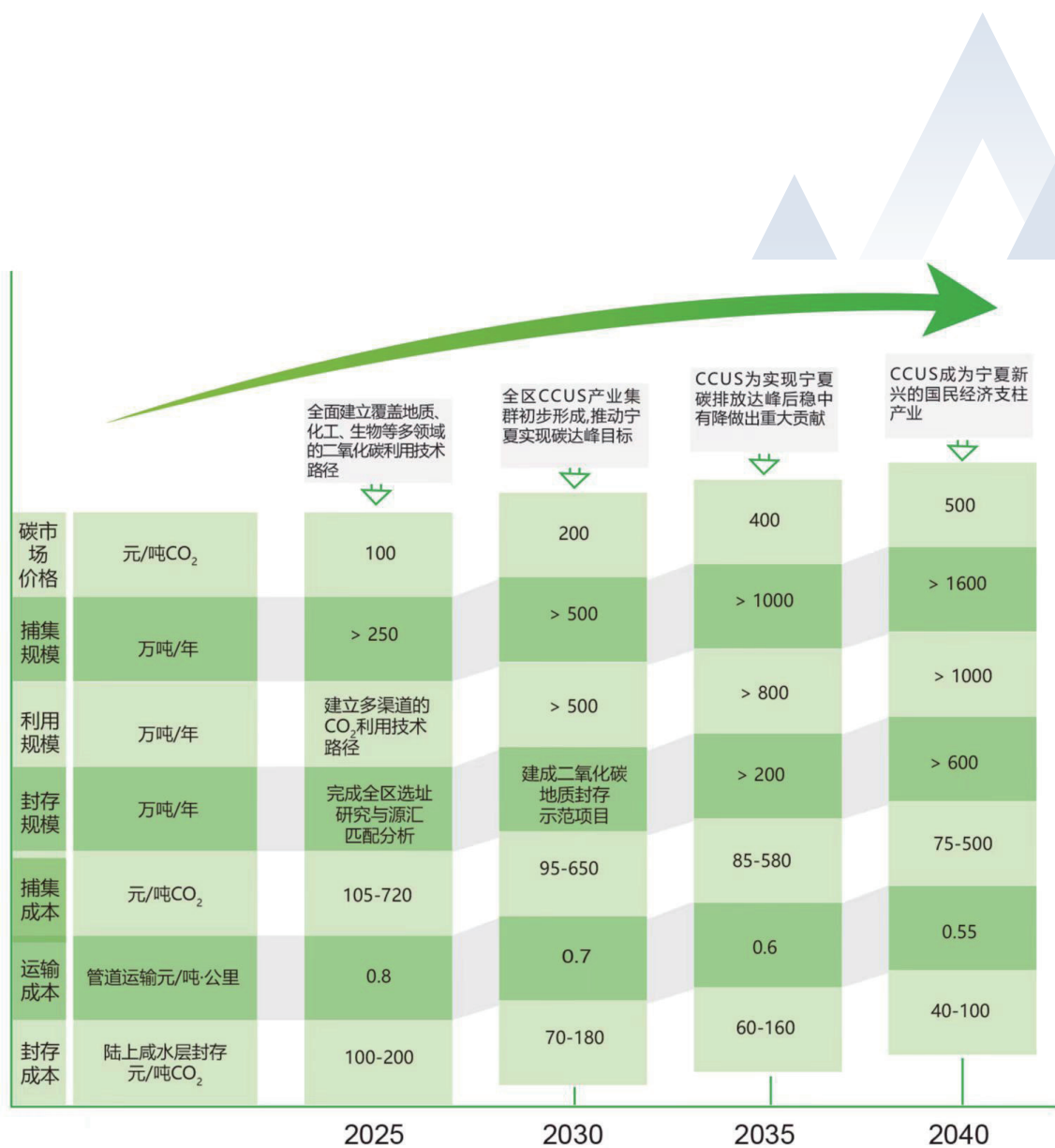


图6 宁夏二氧化碳产业发展总体路线图³

3 捕集成本、运输成本、封存成本引自科技部《中国碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展路线图研究》



广东南方碳捕集与封存产业中心
Guangdong CCUS Centre



宁夏二氧化碳产业发展路径研究报告 (决策者摘要)

广东南方碳捕集与封存产业中心

联系邮箱:

夏菡佑 changyou.xia@gdccus.org

王 莉 li.wang@gdccus.org