

# “双碳”目标下大型能源化工基地减排路径创新研究——以宁夏宁东300万吨CCUS示范项目为例

丁永平<sup>1</sup> 孙书桩<sup>2</sup> 吴蒙<sup>1</sup> 邱雨声<sup>3</sup>

1 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油化工工程建设指挥部

2 郑州大学 化工学院

3 北方民族大学 化学与化工学院

DOI:10.12238/etd.v6i6.16839

**[摘要]** 2020年,宁夏宁东基地直接碳排放量约1.4亿吨,碳排放强度高达20吨/万元,显著超过全国及全区平均水平,实现“双碳”目标面临严峻挑战。为贯彻落实国家及自治区碳达峰碳中和重大战略决策,完整、准确、全面贯彻新发展理念,在自治区统一部署下,由宁东管委会牵头,联合国家能源集团宁夏煤业有限责任公司和中石油长庆油田两家央企,整合优势资源与源汇匹配条件,共同推动建设300万吨/年CCUS示范项目。该项目计划于“十五五”末期实现300万吨/年的捕集利用规模,分三期推进实施。通过本项目,旨在探索适用于煤化工行业的CCUS可行模式,为大型CCUS工程建设积累经验,为宁东基地乃至全国高碳产业低碳转型提供示范路径。

**[关键词]** CCUS; CO<sub>2</sub>捕集; 液化; 驱油; 综合利用

中图分类号: X701 文献标识码: A

## Innovation in Emission Reduction Pathways for Large-Scale Energy and Chemical Bases under the "Dual Carbon" Goals: A Case Study of the Ningdong 3-Million-Ton CCUS Demonstration Project in Ningxia

Yongping Ding<sup>1</sup> Shuzhuang Sun<sup>2</sup> Meng Wu<sup>1</sup> Yusheng Qiu<sup>3</sup>

1 National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd. Coal-to-Liquids and Chemical Engineering Construction Headquarters

2 School of Chemical Engineering, Zhengzhou University

3 School of Chemistry and Chemical Engineering, North Minzu University

**[Abstract]** In 2020, the Ningdong Base in Ningxia directly generated approximately 140 million tons of carbon emissions, with a carbon emission intensity of 20 tons per 10,000 yuan, significantly exceeding the national and regional averages. This poses severe challenges to achieving the "dual carbon" goals. To implement the national and regional major strategic decisions on carbon peaking and carbon neutrality, and to fully, accurately, and comprehensively adopt the new development philosophy, under the unified deployment of the autonomous region, the Ningdong Management Committee has taken the lead. In collaboration with two central enterprises—China Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd. and PetroChina Changqing Oilfield—advantageous resources and source-sink matching conditions have been integrated to jointly promote the construction of a 3 million ton/year CCUS demonstration project. The project plans to achieve an annual capture and utilization scale of 3 million tons by the end of the "16th Five-Year Plan" period, to be implemented in three phases. Through this project, the aim is to explore feasible CCUS models applicable to the coal chemical industry, accumulate experience for large-scale CCUS project construction, and provide a demonstration pathway for the low-carbon transformation of high-carbon industries in the Ningdong Base and even across the country.

**[Key words]** CCUS; CO<sub>2</sub> capture; liquefaction; oil displacement; comprehensive utilization

我国在第七十五届联合国大会上作出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和,为实现应对气候变化《巴黎协定》确定的目标作出更大努力和贡献。”庄严承诺以来,总书记多次就碳达峰、碳中和作出重要论述<sup>[1-2]</sup>。2021年10月8日,国家发改委、国家能源局印发《关于支持宁夏能源转型发展实施方案》的通知,其中主要任务第12条明确指出“鼓励企业探索利用新能源制氢替代煤制氢,开展碳捕获、利用与封存(CCUS)工程示范,从源头上降低煤炭消耗量和CO<sub>2</sub>排放量”<sup>[3]</sup>。

宁东能源化工基地是国务院确定的国家重点开发区,也是国家重要的大型煤炭生产基地、“西电东送”火电基地、煤化工产业基地、循环经济示范区,与陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯共同构成国家能源“金三角”<sup>[4]</sup>。2020年,宁东基地直接碳排放总量1.4亿吨左右,碳排放强度20吨/万元左右,远高于全国和全区平均水平,“双碳”任务十分艰巨。

宁夏煤业公司是宁夏最大的能源企业,产业结构主要以煤化工为主,能耗方面,能耗总量比例占全区27%,尤其是煤制油项目作为全球单体规模最大的化工项目,对宁夏能耗总量控制影响脚大<sup>[5]</sup>。宁夏煤业公司作为宁夏地区煤化工行业的领先者,肩负着引领煤化工行业落实双碳目标的企业使命和社会责任。

2021年10月8日,国家发改委、国家能源局印发《关于支持宁夏能源转型发展实施方案》的通知,其中主要任务第12条明确指出“鼓励企业探索利用新能源制氢替代煤制氢,开展碳捕获、利用与封存(CCUS)工程示范,从源头上降低煤炭消耗量和CO<sub>2</sub>排放量”。2021年10月24日,党中央、国务院印发《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意见》,10月26日国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,行动方案中明确提出开展CO<sub>2</sub>资源化利用产业发展研究,建设CO<sub>2</sub>捕集利用与封存全流程、集成化、规模化示范项目,促进循环经济发展和碳减排典型技术应用。

### 1 宁夏煤业公司煤制油化工基地碳源现状及特点 (表 1)

一是碳源浓度高,易于低成本开发综合利用。

表1 宁夏煤业公司煤化工基地碳排放组成

| 项目             | 组分 % v          |      |                |                |                         |            |           |                 |                |
|----------------|-----------------|------|----------------|----------------|-------------------------|------------|-----------|-----------------|----------------|
|                | CO <sub>2</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S<br>ppm | COS<br>ppm | ME<br>ppm | CH <sub>4</sub> | O <sub>2</sub> |
| 煤基<br>烯烃<br>项目 | ≥ 95            | 1.02 | 0.01           | 0.05           | 0.05                    | 11.9       | 94.5      | 0.04            | 0.02           |
| 煤制<br>油项目      | ≥ 95            | 0.02 | -              | 0.06           | 3.3                     | 2.3        | 156       | 0.01            | 0.06           |

二是碳源排放集中,易于捕集。

三是碳源可互联互通,全年实现连续、稳定运行,易于规模化、大型化CCS或CCUS。

### 2 主要做法

一是高纯高压CO<sub>2</sub>采用超临界长距离管输和直接液化两种方式,通过管道和车辆运输至油田开采区驱油。

二是高纯高压CO<sub>2</sub>采用吸附、冷凝液化、精馏方式,生产工业级液态CO<sub>2</sub>,通过车辆运输至煤炭矿井井下综合利用,如井下降温和灭火替代成本较高的液氮。

工艺处理过程如图1所示,装置共包含5个单元吸附解析单元、制冷单元、液化单元、精馏单元、产品贮存及装车单元。其中产品贮存及装车单元配置两种不同级别产品球罐,驱油级新增1台,工业级新增1台。本流程可以实现2条不同产品的生产线既可以单独一条线生产运行,也可以两条线同时运行,可根据下游应用市场需求决定装置运行负荷。

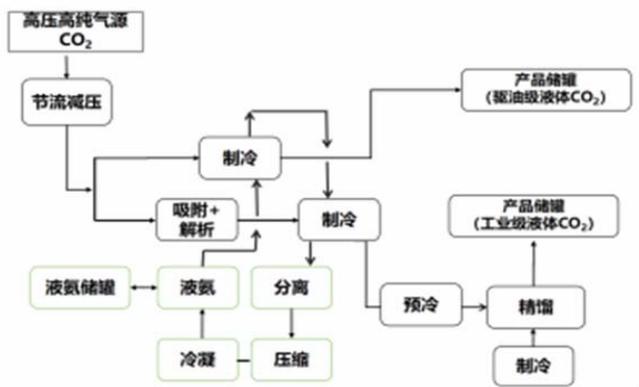


图1 驱油用于工业级液体CO<sub>2</sub>处理工艺过程示意图

上述驱油应用场景,从项目前期合作洽谈到后期项目建设、运营实施的案例分享如下:

中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司(简称“长庆油田”)是国内第一大油气田,勘探区域主要在鄂尔多斯盆地,横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,承担着向北京、天津、西安、银川、呼和浩特等十多个大中城市安全稳定供应油气的重任<sup>[6]</sup>。长庆油田是距离宁东基地最近的大型油气田,其宁夏油区具有丰富的CO<sub>2</sub>驱油封存潜力。早在2014年长庆油田就申请了国家重大科技专项,在姬塬黄3区开展CO<sub>2</sub>捕集驱油与封存技术研究与工程示范,具有成熟的CCUS技术和人才储备<sup>[7]</sup>。宁东基地距离长庆油田宁夏油区仅130公里,是距其最近的大规模碳源集聚地,地理位置突出,两地交通十分便利,且宁东基地煤化工产业CO<sub>2</sub>浓度高、易于捕集,成本优势明显,具有建设大规模CCUS示范项目的良好条件。同时,通过自治区地质局与中科院武汉岩土力学所研究,初步推断盐池县哈巴湖地区有非常大的CO<sub>2</sub>地质封存潜力,具有开展大规模CCS项目的良好地质条件。

为贯彻落实党中央国务院碳达峰碳中和重大战略,认真贯彻落实国家和自治区碳达峰碳中和决策部署,完整、准确、全面贯彻新发展理念,进一步发挥各方优势,助力宁东基地碳达峰碳中和目标任务早日实现,从2021年开始,自治区领导就与中石油长庆油田就合作开展CCUS工程项目示范进行了多次沟通座谈交流,双方均表达了合作的强烈愿望。按照自治区领导部署要求,由宁东管委会牵头,国家能源集团宁夏煤业有限责任公司和中石油长庆油田合作,串联两家央企优势资源,整合优质源汇匹配

表 2 CO<sub>2</sub> 驱油与灭火应用相关质量指标

| 序号 | 组分                            | 单位  | 《SH/T 3202-2018》中驱油CO <sub>2</sub> 质量标准 |           | GB6052-2011-T 工业液体CO <sub>2</sub> 质量指标 |   |       |
|----|-------------------------------|-----|---|-----------|--|---|-------|
|    |                               |     | 驱油项目指标                                  |           | 工业级指标                                  |   |       |
|    |                               |     | 建议值                                     | 范围        | 浓度                                     | 浓度  | 浓度    |
| 1  | CO <sub>2</sub>               | %v  | 95                                      | 90-99.8   | ≥99                                    | ≥99.5   | ≥99.9 |
| 2  | H <sub>2</sub> O              | ppm | 300                                     | 20-650    | //                                     | 10.68   | 5.343 |
| 3  | N <sub>2</sub>                | %v  | 1                                       | 0.01-2    | //                                     | //  | //    |
| 4  | O <sub>2</sub>                | %v  | 0.01                                    | 0.001-1.3 | //                                     | //  | //    |
| 5  | Ar                            | %v  | 1                                       | 0.01-1    | //                                     | //  | //    |
| 6  | CH <sub>4</sub>               | %v  | 1                                       | 0.01-2    | //                                     | 取甲乙两只比色管,各加入2.5mL微热的氨制硝酸银溶液和3mL氨水,向甲管中以60mL/min-70mL/min流量通入1000mL样品气后,将甲管与乙管相比较同样澄清无色为合格 |       |
| 7  | CO                            | ppm | 35                                      | 10-5000   | //                                     |   |       |
| 8  | H <sub>2</sub> S              | %v  | 0.01                                    | 0.002-1.3 | //                                     |   |       |
| 9  | SO <sub>2</sub>               | ppm | 100                                     | 10-50000  | //                                     |   |       |
| 10 | COS                           | ppm | 5                                       | 0-5       | //                                     |   |       |
| 11 | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | %v  | 1                                       | 0-1       | //                                     |   |       |
| 12 | C <sub>3+</sub>               | %v  | < 1                                     | 0-1       | //                                     |   |       |
| 13 | H <sub>2</sub>                | %v  | 1                                       | 0.01-1    | //                                     | //  | //    |
| 14 | NO <sub>x</sub>               | ppm | 100                                     | 20-2500   | //                                     | //  | //    |
| 15 | NH <sub>3</sub>               | ppm | 50                                      | 0-50      | //                                     | //  | //    |
| 16 | 颗粒物                           | ppb | 46                                      | 0-174     | //                                     | //  | //    |

条件,三方共同推动建设宁夏300万吨CCUS示范项目,为国内煤化工产业CCUS发展积极探索新的模式。

CCUS示范项目由自治区吴秀章主席领导协调,宁东基地管委会督办,宁煤公司负责开展项目前期研究工作。自治区人民政府自2021年9月推动项目以来,吴秀章副主席先后组织了7次座谈会,宁东管委会召开了3次工作推进会,先后与长庆油田公司召开了6轮碳价、供货协议和实施方案等谈判会。

项目先后经过宁煤公司负责的捕集液化技术方案论证、长庆田负责的驱油封存技术实验和论证,以及长距离汽运和管输等专项方案现场踏勘、技术方案交流和论证等前期工作。按照规划,CCUS项目至十五五末,总规模达到300万吨/年,分三期实施:

一期50万吨/年CO<sub>2</sub>液化示范项目:其中40万吨/年液态CO<sub>2</sub>产品通过汽运方式用于油井驱油;10万吨/年工业级液态CO<sub>2</sub>产品用于矿井井下综合利用。总量50万吨,纯度均高于95%(v),可实现国内同类型CO<sub>2</sub>液化项目生产成本节约45~55%。一期项目已于2024年8月建设投产。

二期和三期分别为100万吨/年和150万吨/年设计规划规模,产品采用管道输送,主要用于油田驱油和CCS。碳源来自煤基烯烃和煤制油项目浓度高于95%(v)、低压(运行压力10~20kPaG)CO<sub>2</sub>排放气。

CCUS项目CO<sub>2</sub>产品用户为油田驱油和矿井灭火,为此,驱油用液态CO<sub>2</sub>产品质量指标执行《SH/T 3202-2018》、灭火用液态CO<sub>2</sub>产品执行国家工业级CO<sub>2</sub>质量指标《GB6052-2011-T工业液体

CO<sub>2</sub>质量指标》II级,具体如表2:

### 3 经验启示

一是探索项目模式,CCUS项目以政府引导、企业主导、市场化运作的模式,更有利推进项目落地、实现大型化和规模化。

二是获取政策支持,CCUS项目成本是影响两个或几个相互关联产业相互开发合作瓶颈,依托国家或地方财政给予增值税即征即退或碳减排补贴的方式才具备企业主动和自愿开展CCUS项目的动力。

三是打造产业集群,开展以CCUS项目碳源为中心,统筹规划相关联产业的综合利用项目布局,缩短长距离输运,积极推进不同产业间CCUS项目技术的协同研发和就地利用。

### 4 结束语

项目总规模将实现年减排CO<sub>2</sub>达到300万吨,减排效果相当于每年植树近2700万棵,停开经济型轿车约180万辆。通过本项目一期示范建设将为煤化工行业未来开展更大规模CO<sub>2</sub>捕集、利用奠定基础,对实现双碳目标具有示范引领的重大意义。

### 致谢:

感谢宁夏煤业有限责任公司-郑州大学《高含煤粉二氧化碳尾气捕集与催化集成技术开发》项目(20250563A)支持。

### [参考文献]

[1]张云飞.“双碳”目标下提升我国新能源竞争力的行动方略——深入学习贯彻习近平总书记关于能源革命的重要论述国家治理,2023(17):14-19.

[2]杨晓炯,吴超.论全球气候治理中的大国担当——学习习

近平总书记关于“双碳”重要论述[J].理论观察,2023(01):16-19.

[3]杨晓秋.抢抓机遇走出一条能源转型发展新路子,宁夏日报[J].宁夏日报,2021:004.

[4]马妮,曲京佳.宁东能源化工基地:以煤为“索引”擘画蓝图中国石油和化工,2023(08):38-39.

[5]粟灵.全球单体最大煤制油项目的国产化长征[J].国资报告,2024(08):116-119.

[6]于世春,胡改星,刘笑春,等.长庆油田CO<sub>2</sub>驱注采工艺现状及技术攻关方向[J].石油化工应用,2023,42(12):15-19.

[7]吕伟峰,张海龙,周体尧,等.中国陆相沉积油藏二氧化碳

驱油与埋存技术进展及规模化应用发展方向[J].石油勘探与开发,2025,52(04):959-972.

### 作者简介:

丁永平(1980--),男,宁夏人,国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油化工工程建设指挥部,高级工程师。

孙书桩(1995--),男,河南鹤壁人,郑州大学化工学院,助理研究员。

吴蒙(1979--),男,宁夏人,国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油化工工程建设指挥部。

邱雨声(1994--),宁夏银川人,北方民族大学化学与化工学院讲师。