

CO₂ 捕集封存联合地下咸水利用经济评价

翟明洋*, 林千果, 钟林发, 皮晶薇, 王文双

(华北电力大学能源动力与机械工程学院环境研究院, 北京 102206)

摘要:当前中国能源产业特别是煤化工行业在发展过程中需要消耗大量的淡水资源,同时排放了大量的 CO₂, 严重挑战中国的气候变化应对和节能减排目标的实现。CO₂ 捕集封存联合增强地下深部咸卤水开采及综合利用(CCS-EWR)技术可以实现在封存 CO₂ 的同时,能将地下深部咸水引入到地面实现咸水的资源化,该技术在煤化工行业具有巨大的应用潜力。本文选取鄂尔多斯地区煤化工行业的百万吨级的 CO₂ 捕集与封存示范项目,探讨 CCS-EWR 全流程项目的经济可行性。案例研究表明,该技术能够有效抵消 CCS 技术高昂的成本,在我国中西部严重缺水地区可大规模应用,在高效利用情况下经济上也具有一定的可行性。

关键词: CO₂ 捕集; CO₂ 封存; 地下咸水抽采; 淡水综合利用; 经济评价

中图分类号: X51

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)04-0008-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.04.003

Economic assessment of carbon capture and storage combined with utilization of deep saline water

ZHAI Ming-yang*, LIN Qian-guo, ZHONG Lin-fa, PI Jing-wei, WANG Wen-shuang

(Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: During the development of energy industry, particularly coal chemical industry in China, a large amount of freshwater are consumed and huge CO₂ emission is generated, which significantly affects the realization of China's climate change adaptation, energy-saving and emission reduction targets. The technology of carbon dioxide capture and storage combined with enhanced deep saline water recovery(CCS-EWR) and comprehensive saline water utilization can not only help the sequestration of CO₂ but also utilize saline water through extracting the saline water to the ground. The CCS-EWR technology has great potential in development and application of coal chemistry. In this study, the economic feasibility of full-chain CCS-EWR project is discussed based on a case of one million tones CO₂ capture and storage demonstration project in Ordos. The result show that this technology can effectively offset the high cost of CCS. Large scale applicaiton of this technology in midwest of China is not only technical feasible but also economic feasible in western China.

Key words: CO₂ capture; CO₂ storage; extraction of deep saline water; freshwater utilization; economic evaluation

中国是个水资源分布极不均匀的国家,尤其中西部地区严重缺水。然而,中西部地区却是中国重要的能源生产基地。以煤化工为代表的能源工业的发展过程中,一方面需要消耗大量的淡水资源,另一方面,又排放了大量的 CO₂, 严重挑战中国的气候变化应对和节能减排目标的实现^[1]。目前采用 CO₂ 捕集封存技术(CCS)是未来大规模减少 CO₂ 排放、减缓全球变暖的经济、可行的方法。而作为一种新型的 CO₂ 封存利用技术,CO₂ 捕集封存联合增强深部咸卤水开采及综合利用技术(CCS-EWR),主要是指将能源企业捕集的 CO₂ 注入深度超过 800 m 地下、矿化度 10 g/L 以上的深部咸水层埋存,并驱替地下深部的咸水资源^[2],不仅能够实现 CO₂ 封存,同时将地下深部咸水引入到地面能够有效实现

咸水的资源化。该技术具有两方面的优势:一方面通过合理抽采咸水,释放储层压力,能够安全稳定地增大 CO₂ 的封存能力^[3-4];另一方面抽采的低矿化度咸水经过水处理可以满足区域用水需求。

当前尚无基于我国国情的 CCS-EWR 经济性评价研究,导致相关决策依据不足,严重影响该项技术在中国的发展,特别是影响《中美气候变化联合声明》提出的利用 CO₂ 从深咸水层向地表驱水示范项目的实施。因此,迫切需要结合中国已有封存研究基础的场地,开展相关经济性评价研究,以科学支撑中美两国提出项目的部署和实施。在此背景下,本研究选取中国西部地区具有典型代表性的鄂尔多斯地区煤化工行业为例,开展 CO₂ 捕集和封存联合地下深部咸卤水资源利用全流程经济性评价研究,以

收稿日期:2015-11-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(JB2015215)

作者简介:翟明洋(1988-),男,博士生,主要从事区域能源企业 CO₂ 捕集运输封存,通讯联系人,13261586619,mingyangzhai@126.com。

期能为相关研究提供科学的决策支持依据。

1 鄂尔多斯盆地百万吨级碳捕集与封存(CCS)经济性分析

1.1 鄂尔多斯地区概况

鄂尔多斯盆地也称陕甘宁盆地,行政区域横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省(区)。鄂尔多斯地区是一个多种能源汇集的沉积盆地,煤、油、气、盐等矿产资源丰富,煤炭储量为1 500亿t,占全国已探明储量的1/6^[5]。目前盆地内多个煤炭转化等能源基地,包括煤制油、煤制甲醇、煤制烯烃、煤制天然气等项目。这些项目排放大量的CO₂,仅神华煤制油,每年排放CO₂可达1 750万t^[6],迫切需要将CO₂捕集进行长期封存。鄂尔多斯地区同样面临可用水资源的短缺,工业发展分布与水资源分布极不协调的特点。该地区年降水量不足400mm,年蒸发量却超过2 500mm,人均水资源仅736m³,仅为全国人均水平的1/3,属重度缺水地区^[7]。而且该地区煤化工产业的发展需求与其所在地的水资源分布情况极其不协调,高耗水的煤化工项目大多布局在干旱缺水的西北地区。据估计1t煤制甲醇耗水量为10t、煤制油耗水9t、煤制化肥约20t、煤制气耗水约6t,预计到2017年,鄂尔多斯地区煤化工每年耗水量将达到4.14亿t,相当于日供水能力的13倍^[8]。随着社会经济的发展,以煤化工为代表的能源行业快速发展,更是加剧了该地区水资源短缺的矛盾,因此在此背景下水资源短缺问题已经严重制约了该地区工农业的发展^[9]。

1.2 CCS-EWR 技术流程

CCS-EWR技术可以实现煤化工生产过程中CO₂的深度减排,同时弥补煤化工发展导致的区域水资源短缺问题。CO₂咸水封存联合深部咸水开采和综合利用技术工艺整个流程(图1),包括CO₂捕集、管道运输、注入封存、咸水提取、咸水处理、淡水运输及淡水回用等7个主要环节。

其中CO₂可以来自电厂和煤化工等多个大型排放源。在鄂尔多斯地区,煤化工生产排放的副产物CO₂浓度较高,尤其是气体脱出工艺过程中排放的CO₂,其体积分数一般能达到95%以上^[10]。由于高浓度气体的低捕集成本特性,因此成为该地区捕集的重点,也是本研究的主要CO₂捕集对象。由于鄂尔多斯地处内陆,所需运输的CO₂规模巨大,研究选取管道运输将煤化工CO₂排放源输送到咸水层封存区。在CO₂封存作业区,需要确保CO₂处

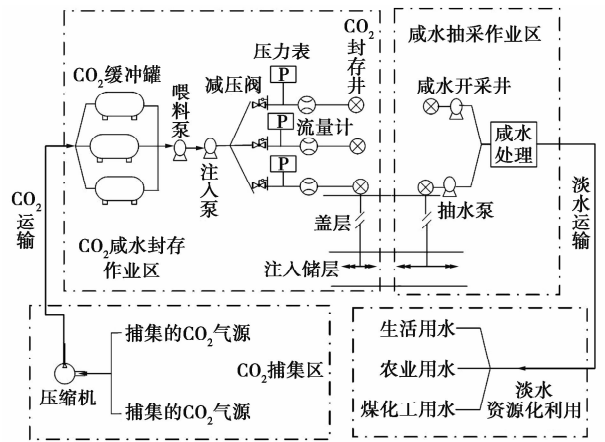


图1 CO₂捕集封存联合咸水抽采及资源化流程

于超临界状态,增大CO₂的封存量。考虑到经济地质因素,鄂尔多斯盆地在石千峰组-储盖层组合条件较好,能够将CO₂埋存在地下深度为1 000~2 500m,该储层压力系数0.8~1.0,低温梯度为3.1℃/100m^[11]。当埋深1 000m时,地层压力将高于8.0~10.0MPa,地层温度高于36℃,这样确保CO₂保持处于超临界状态。

由于近些年鄂尔多斯经济发展迅速,但伴随着其经济的增长,当前和未来的需水量也在不断增长,该地区面临严峻的水资源供需矛盾。如2015年鄂尔多斯的需水量为26.19亿m³,缺水率为17.4%。预计2020年需水量为29.99亿m³,缺水率为26.8%^[12]。因此上述经过处理的淡水可以回用于鄂尔多斯,并且这些水资源若得到合理的配置,将会产生可观的资源收益。鄂尔多斯地区耗水的主要行业为农业和工业,鄂尔多斯可以种植的农作物有:小麦、玉米、大豆等传统的粮食作物,以及像黑枸杞这样耐盐碱、耗水少、收益高的经济作物;而回收的工业用水考虑则主要以煤化工行业如生产煤制油、煤制烯烃、煤制气以及合成氨等企业生产的产品。

1.3 CO₂捕集和运输成本

目前鄂尔多斯地区煤化工项目发展较快,仅2015年,鄂尔多斯市就计划实施亿元以上重点煤化工项目21项。曾荣树等^[13]测算,生产1万t煤制油则排放CO₂3.5万t;1万t煤制烯烃则排放CO₂4万t,生产1亿m³的天然气排放CO₂21.4万t,则上述鄂尔多斯地区的CO₂年排放量远远超过百万吨级。由于煤化工生产过程排放的CO₂分压较高,因此国内的中大型煤化工项目脱碳部分基本是采用低温甲醇洗工艺。对于百万吨每年捕集能力的设备投资估算成本为2.0亿元(包括干燥及压缩装置),

当前 CO₂ 的捕集运营成本相当于 18 美元/t^[14] (约合 112 元/t), 每年运行成本为 11 200 万元, 每年固定资产折旧为 970 万元 (考虑设备固定资产折旧 20 年直线折旧, 残值率为 3%), 每年总的运行成本为 12 170 万元, 所以单位 CO₂ 的捕集成本 121.7 元/t。

CO₂ 的管道运输采用超临界输送, 将内蒙古鄂尔多斯市乌审旗地区中天合创 130 万 t/a 煤制烯烃项目排放的 CO₂ 捕集, 并运输到准格尔旗内蒙古伊金霍洛旗乌兰木伦镇, 进行 CO₂ 封存 (当前神华集团已进行了 10 万 t/a 的 CO₂ 咸水层封存试验), 该距离为 80 km。按照管道的设计规模, 设备投资成本为 3 056 万元。每年运输 CO₂ 的费用为 5 221.4 万元, 每年固定资产折旧为 152.8 万元 (考虑设备固定资产折旧 20 年直线折旧, 残值率为 0%), 因此 CO₂ 运输的总运行成本为 5 400 万元, 同理, 单位 CO₂ 的运输成本为 54 元/t。

1.4 CO₂ 封存成本

CO₂ 的咸水封存部分主要包括进入封存区, CO₂ 储罐的投资及运行成本, CO₂ 注入设施的投资及运行成本, CO₂ 封存井及监测井的投资及运行成本。一般 CO₂ 封存井的投资占据很大比重, CO₂ 咸水封存井的总投资包括场地的勘查、容量与风险评估、设计规划, 钻井投资和管线布置等费用。本文设计鄂尔多斯地区 CO₂ 封存设计为 4 口注入井、2 口监测井, 深度为 1 500 m。

CO₂ 封存环节各部分详细成本如表 1 所示, CO₂ 封存区设备投资包含储罐投资, 注入设备投资及封存井投资总和为 7 879.13 万元; 运行成本包含储罐运行及人工修理的费用、注入设备的运行及药剂损耗、人工等费用, 在封存井封存的运行考虑封存井及监测井运行及维护成本等, 以上成本总和为

表 1 CO₂ 封存环节成本统计

封存区投资各部分成本	成本
设备投资成本合计/万元	7879.13
包含	
① 储罐投资成本	78.00
② 注入设备投资成本	90.00
③ 封存井投资成本	7711.13
运行成本合计/(万元·a ⁻¹)	886.05
包含	
① 储罐年运行成本	88.00
② 注入设备年运行成本	413.60
③ CO ₂ 封存年运行成本	886.05

1 387.65 万元/a, 考虑设备的折旧 787.91 万元/a (10 年直线折旧, 净残值率为零), 每年的总运行成本 2 176 万元, 单位 CO₂ 的封存成本 21.76 元/t。

综合以上分析, 1 t CO₂ 捕集运输及封存 (CCS 环节) 的整个全流程成本为 197.46 元/t。

2 咸水抽采、处理及运输成本

2.1 咸水淡化技术方案

鄂尔多斯地区的地下水在 800 ~ 1 800 m 为缓慢交替带, 水温为 45 ~ 70℃, 矿化度为 1 ~ 5 g/L, 水的化学类型以氯化物-硫酸型为主^[15]。其中矿化度范围在 1 ~ 3 g/L 为微咸水, 矿化度范围在 3 ~ 5 g/L 为半咸水, 所以鄂尔多斯盆地的深层咸水基本属于微咸或半咸水。

考虑到反渗透具有较高的脱盐率, 尤其在去除含有 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻ 型咸水去除效果明显, 去除率为 96% ~ 99%^[16], 较为适宜鄂尔多斯地区的咸水淡化。但反渗透在咸水淡化过程中同时存在自身的局限性, 如反渗透对二甲基多价的阴阳离子的节流效果高于单价离子, 而且制水的能耗高; 原水利用率回收为 60% ~ 70%, 浪费水严重。在此背景下, 需要将反渗透技术与其他技术进行结合, 咸水处理技术采用两种水处理技术进行咸水淡化: 方案一为优化的反渗透电渗析技术 (见图 2); 方案二为反渗透-离子交换咸水淡化技术 (见图 3)。

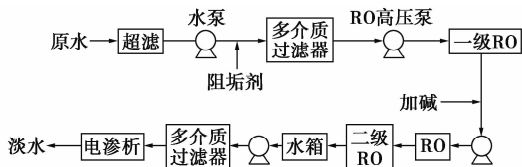


图 2 超滤反渗透-电渗析系统工艺流程

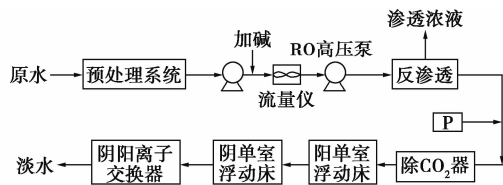


图 3 反渗透-离子交换咸水净化

2.2 地下咸水抽采成本

咸水抽采主要是利用抽采泵, 将咸水从地下咸水层抽送到地面。本研究采用 9 口咸水提取井, 每年抽采规模为 120 万 t。详细投资如表 2 所示, 120 万 t 咸水抽采设备总投资成本为 6 936 万元; 咸水抽取的运行成本为 11.09 元/t。

表2 咸水提取成本

咸水抽采区投资各部分成本	成本
设备投资成本合计/万元	6936.00
包含	
①咸水井的投资成本	6219.00
②抽采咸水潜水泵投资成本	405.00
③其他	312.00
年运行成本合计/(万元·a ⁻¹)	1261.70
包含	
①运行维护成本	148.85
②工人工资	180.00
③修理	932.85

2.3 咸水淡化处理成本

如表3所示,通过120万t/a咸水淡化处理,反渗透-电渗析工艺、反渗透-离子交换两种方案详细成本分析对比:反渗透-电渗析设备投资成本为647.6万元,反渗透-离子交换工艺设备投资成本为1516.82万元;除了设备投资成本外,方案一每年处理120万t咸水的年运行成本为663.86万元,方案二的每年运行成本为497.22万元。考虑咸水处理设备固定资产(采用20年直线折旧,残值率为0)以及每年咸水处理的运行成本,则方案一单位咸水淡化的处理成本5.8元/t。方案二单位咸水淡化的处理成本为4.78元/t。

表3 不同水处理方案的技术经济比较 万元

名称	反渗透-电渗析 (方案一)	反渗透-离子交换 (方案二)
设备投资	647.60	1516.82
二年运行费	663.86	497.22
分类包含		
①31% HCl	0.00	24.39
②100% NaOH	151.65	15.48
③六偏磷酸钠	0.00	8.28
④药品运杂费	16.27	5.40
⑤水费	98.28	97.34
⑥电费	120.10	149.04
⑦人工费	216.00	144.00
⑧树脂补充费	0.00	19.08
⑨滤芯更换费	32.40	5.04
⑩膜更换费	29.16	29.16

两套方案在处理同等水量120万t咸水、满足工业用水标准的前提下,经过对比发现:尽管采用反渗透-离子交换装置设备投资成本高于反渗透-电渗析装置,但是采用反渗透-离子交换进行咸水淡化处理具有明显的运行成本上的优势,每年运行成本比反渗透-电渗析节省166.6万元,这主要是由于反渗透-电渗析装置的运行过程中设备维修工作量

较大,间接的经济损失巨大。综上所述,1t咸水采用反渗透-电渗析和反渗透离子交换进行淡化的成本为4.78~5.80元。

2.4 回收水运输成本

为了实现淡化咸水回收水资源效益的最大化,需要将水处理厂处理的咸水进行回收,将淡水从CO₂咸水抽采区回收到CO₂捕集区,具体来说是从内蒙古伊金霍洛旗乌兰木伦镇的咸水抽采区,经管道运输到内蒙古鄂尔多斯市乌审旗煤化工,两地距离为80km。每年运输90万t淡水规模时(水处理标准回收淡水率75%),流量为102.74m³/h,设计采用3条DN150mm、流量为52m³/h的塑料管道,两用一备。统计出单位管道投资11.28万元/km,此时管道的投资成本为2707.2万元^[17]。

管道的每年运行维护成本2.497万元/(年·km),则本项目的每年总运行成本为TOW=2.497×80×2=399.52万元/年^[18]。

此时,回收水每年的单位运输成本为4.44元/t。

3 CCS-EWR的资源效益评价

考虑到实际上鄂尔多斯绝大多数工业、农业分布在干旱缺水地区,这些行业发展受水资源的绝对限制,水作为这些行业运行的重要驱动因子,实际上,只有当水资源得到满足,才能实现该产品的经济效益,因此可以认为这些产品收益主要来自水的经济效益。基于上述假设,以抽采地下1t咸水为例,中间扣除咸水淡化处理的水损及运输的水损,实际回收淡水为0.6t,并将淡水用于农业工业产品生产。最终1t抽采咸水回用不同产业的经济效益如表5所示,1t咸水用于农业产品生产实现水回收的经济价值为4.85~120元/t。其中一般农作物的种植(小麦、大豆、玉米等)产生的效益为4.85元/t,低于第一产业水产生的平均经济效益,若采用经济作物(黑枸杞等)产生的效益为120元/t,因此显著提升了回收水的经济价值。若1t咸水淡化回收水用于煤化工产品生产,则水的经济效益在306~852元/t,其中用于煤制烯烃生产的效益最高(852元/t水),而合成氨的效益较低(306元/t水)。因此,当抽采的咸水进行淡化回收并用于较高经济价值的农产品和化工产品的生产,则产生的收益在120~852元/t。

在采用CO₂-EWR工艺,1t咸水扣除抽采处理及运输的成本所产生的净收益为98.67~831.69元/t。即:1t咸水处理回收所产生的净收益为98.67~831.69元;由于是100万tCO₂抽采120万t咸水,

所以比例系数为 1:1.2, (扣除及水处理运输损失 1 t 咸水对应 0.6 t 淡水), CO₂-EWR 工艺扣除咸水抽采及处理成本, 所得的净收益为 118.40 ~ 998.03 元/(1.2 t 咸水)。

表 5 水的经济价值

产品	1 t 淡水生产的产品	产品单价/元	1 t 咸水经济价值/(元·t ⁻¹)
一般农作物	1.47 kg	5.50	4.85
高经济作物	20.00 kg	10.00	120.00
煤制油	0.13 t	8600.00	670.80
天然气	454.60 m ³	2.80	763.73
煤制烯烃	0.25 t	7100.00	852.00
合成氨	0.25 t	2550.00	306.00
电力发电	1.54 (kW·h)	0.50	0.46

淡水回用所产生的收益, 在某种层面上还对 CO₂ 捕集封存及咸水抽采处理的各个环节存在互动影响。考虑 CCS-EWR 系统全流程的成本, CCS 环节 1 t CO₂ 捕集运输和封存成本为 197.46 元/t, 对应的 1.2 t 咸水在 CO₂-EWR 环节产生的净收益为 118.4 ~ 998.03 元/t, 显然采用驱水技术能够在一定程度上降低 CCS 环节的成本。其中若将回收水用于第一产业, 能够将 1 t CO₂ 进行 CCS 全流程封存的成本为 76 元/t CO₂。

若将抽采水回用于煤化工等高经济价值产品利用, 采用 CCS-EWR 所获得的收益为 800.57 元/t。因此采用 CCS-EWR 工艺能够将 CCS 系统中单位 CO₂ 封存成本从 197.46 元/t 降低到低于 79.06 元/t。未来淡水回用还有很大的提升空间, 如将淡水用于生态型农业提高淡水的重复利用率, 增加咸水淡化后的淡水在工业生产过程中节水措施及在工业产品制造过程中水资源的循环利用次数, 则 CO₂ 驱水所产生的水资源的经济效益更为明显。

4 结论

本研究基于我国西部的鄂尔多斯地区的百万吨级的煤化工 CO₂ 捕集与封存示范项目, 开展了 CO₂ 捕集与封存联合地下咸水淡化利用 (CCS-EWR) 的全流程技术性和经济性分析。该流程不仅包含了碳捕集、运输、封存, 而且包含了地下咸水的抽采和淡化处理, 实现了完全意义上的全流程分析。分析显示: 在严重缺水地区, 当将 1 t CO₂ 封存到咸水层, 同时抽采 1.2 t 咸水, 并用于生产具有较高经济价值的产品时, 回收咸水的净收益可达 118.4 ~ 998.03 元。如果 CO₂ 捕集运输和封存 (CCS) 的成本为 197.46 元/t CO₂, 则采用 CCS-EWR 技术的 CCS 全流程系

统总成本小于 79.06 元/t CO₂, 在高效利用的情况下, 甚至有一定的盈利空间。

通过我国鄂尔多斯地区的百万吨规模 CCS-EWR 案例研究表明, 联合地下深部咸卤水资源利用技术能够有效抵消 CCS 技术高昂的成本, 如在我国中西部严重缺水地区大规模应用, 在高效利用情况下经济上具有一定的可行性。该工艺能够实现温室气体大规模减排的同时, 还可将地下咸水抽采回用, 缓解了该地区水资源供应的不足。

参考文献

- [1] 杨忠华, 陈明明, 曾嵘, 等. 利用微藻技术减排二氧化碳的研究进展[J]. 现代化工, 2008, 28(8): 15-19.
- [2] Li Q, Wei Y N, Liu G Z, et al. Feasibility of the combination of CO₂ geological storage and saline water development in sedimentary basins of China[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 4511-4517.
- [3] Court B, Celia M A, Nordbotten J M, et al. 2011. Active and integrated management of water resources throughout CO₂ capture and sequestration operations. Energy Proc. 4, 4221e4229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.370>.
- [4] Liu G, Gorecki C D, Saini D, et al. Four-site case study of water extraction from CO₂ storage reservoir[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 4518-4525.
- [5] 齐林梅, 张煜. 鄂尔多斯盆地地下水丰富年可采 27 亿立方米鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地地下水勘查项目成果报告通过专家评审[J]. 西部资源, 2012, (2): 7-8.
- [6] 亚化咨询. 第八届中国煤制油与煤化工前沿论坛. (2013-08-09). <http://www.Chinacoalchem.com/events/2013CTL>.
- [7] 陈武, 叶贵钧. 鄂尔多斯煤田侏罗纪煤矿区环境地质评述[J]. 煤炭经济研究, 2002, (3): 76-77.
- [8] 肖建荣, 玛喜毕力格, 王彦丽, 等. 鄂尔多斯煤化工发展与水资源保护的研究[J]. 北方环境, 2013, 25(10): 110-112.
- [9] 张振克, 杨达源. 中国西北干旱区湖泊水资源-环境问题与对策[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 02: 7-10.
- [10] 任相坤, 崔永君, 步学朋, 等. 煤化工过程中的 CO₂ 排放及 CCS 技术的研究现状分析[J]. 神华科技, 2009, 02: 68-72.
- [11] 吴秀章, 崔永君. 神华 10 万 t/a CO₂ 盐水层封存研究[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(z1): 236-239.
- [12] 彭少明, 贺丽媛, 崔长勇, 等. 鄂尔多斯市水资源供需分析与配置格局[J]. 人民黄河, 2014, (9): 62-63, 79.
- [13] 曾荣树, 石晓闪, 肖建新, 等. 煤化工产业与二氧化碳地质封存[J]. 洁净煤技术, 2014, (5): 1-5, 8.
- [14] 张健, 梁钦锋, 郭庆华, 等. 煤化工行业 CO₂ 的排放及减排分析[J]. 煤化工, 2008, 06: 8-12.
- [15] 侯光才, 梁永平, 尹立河, 等. 鄂尔多斯盆地地下水系统及水资源潜力[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 18-23.
- [16] 何立新, 杨静, 何绪文, 等. 反渗透法淡化煤矿苦咸水实验和应用研究[J]. 煤炭工程, 2006, (5): 61-63.
- [17] 陈庆松, 王贵斌. 给水管材的价值分析[J]. 给水排水, 2002, 28(10): 74-75.
- [18] 汪林, 甘泓, 倪红珍, 等. 水经济价值及相关政策影响分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. ■