

深部咸水层CO₂地质封存钻井施工技术研究

——以山东省首个咸水层CO₂地质封存项目为例

王世浩^{1,2}, 王玲丽¹, 王勇军^{1*}, 张永林¹, 刘学强¹, 安德陶¹, 孙晓晓¹, 邱佳强¹

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072;

2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:井孔是CO₂注入目标层位的通道,是对注入地层中的CO₂及其对地层影响进行长期监测研究的基础和关键。相比常规的地热钻井,深部咸水层CO₂地质封存钻井需满足更高的密封性与耐腐蚀要求。本研究以山东省首个咸水层CO₂地质封存项目为例,列举了钻井施工难点,提供了主要的技术对策,为其他地区咸水层CO₂地质封存项目钻井施工提供依据。研究表明,钻井施工过程中采取快速钻进及相应钻井液护壁技术,解决井壁稳定性差问题。通过在取心管底部增加防止岩心掉落的卡簧装置,解决取心难的问题。采用高强度套管成井解决套管的气密性与安全性问题。采用BCE-750S型防腐蚀水泥固井射孔成井工艺,解决固井水泥腐蚀性问题。通过在CO₂注入管柱增加卡瓦封隔器装置,保障CO₂注入的气密性与稳定性。同时,采用石油开采领域的采油树井口装置,并安装压力监测表,解决井口装置长期承压及监测问题。

关键词:深部咸水层;CO₂地质封存;防腐蚀水泥浆体系;固井射孔工艺

中图分类号:P634;X51 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0332-06

Research on drilling construction technology for CO₂ geological storage in deep saline aquifers: A case study of the first CO₂ geological storage project in deep saline aquifers in Shandong Province

WANG Shihao^{1,2}, WANG Lingli¹, WANG Yongjun^{1*}, ZHANG Yonglin¹,

LIU Xueqiang¹, AN Detao¹, SUN Xiaoxiao¹, DI Jiaqiang¹

(1. The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geo-Engineering Exploration Institute of Shandong Province), Dezhou Shandong 253072, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

Abstract: The wellbore serves as the pathway for CO₂ injection into the target formation and constitutes the fundamental basis for long-term monitoring and research on both the CO₂ injected into the formation and its impact on it. Compared with conventional geothermal drilling, the wellbore of CO₂ geological storage in deep saline aquifers requires higher standards of sealing and corrosion resistance. This study takes the first CO₂ geological storage project in deep saline aquifers in Shandong Province as an example, the difficulties in drilling construction are listed, the main

收稿日期:2026-05-11; 修回日期:2026-07-17 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.043

基金项目:山东省地质矿产勘查开发局2022年度地质勘查引领示范与科技攻关项目(编号:鲁地字[2022]15号)

第一作者:王世浩,男,汉族,1993年生,工程师,地质工程专业,主要从事水文地质、环境地质、地热地质工作,山东省德州市大学东路1499号, sddkwsh@163.com。

通信作者:王勇军,男,汉族,1984年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事深部资源钻探技术研究工作,山东省德州市大学东路1499号, wyjcd511@sina.com。

引用格式:王世浩,王玲丽,王勇军,等.深部咸水层CO₂地质封存钻井施工技术研究——以山东省首个咸水层CO₂地质封存项目为例[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1):332-337.

WANG Shihao, WANG Lingli, WANG Yongjun, et al. Research on drilling construction technology for CO₂ geological storage in deep saline aquifers: A case study of the first CO₂ geological storage project in deep saline aquifers in Shandong Province[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):332-337.

technical countermeasures are offered, and guidance for drilling construction of other CO₂ geological storage projects in deep saline aquifers is provided. The research results show that during the drilling construction process, the rapid drilling and corresponding mud wall protection technologies are adopted to solve the problem of poor wellbore stability. The difficulty of core sampling was solved by adding a spring clip device to prevent core from falling at the bottom of the coring tube. High-strength casing is used to solve the gas tightness and safety problems of the casing. The integrated technology of cementing, perforating and well completion using BCE-750S anti-corrosion cement is adopted to solve the problem of cement corrosion. By adding the slips packer device to the CO₂ injection pipe string, the gas tightness and stability of CO₂ injection are guaranteed. At the same time, the oil wellhead device in the oil production field is adopted, and a pressure monitoring instrument is installed to solve the long-term pressure-bearing and monitoring problems of the wellhead device.

Key words: deep saline aquifers; CO₂ geological storage; anti-corrosion cement slurry system; cementing and perforating techniques

0 引言

在“双碳”战略不断深入推进的背景下,二氧化碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技术正日益成为我国实现碳达峰与碳中和目标的重要路径,并已在多个工业领域加快推广与应用^[1]。可用于 CO₂地下储存的场地主要有枯竭的油气田、深部咸水层和深部不可开采的煤层等^[2-6]。其中深部咸水层广泛分布于全球大多数沉积盆地,具有封存能力大、技术成熟、安全性高、成本低等优点,是一种重要的二氧化碳封存地质体^[2,7-11]。井孔是 CO₂注入目标层位的通道,是对注入地层中的 CO₂及其对地层影响进行长期监测研究的基础和关键。相比常规的地热钻孔,深部咸水层 CO₂地质封存井孔

需满足更高的密封性与耐腐蚀要求。本研究以山东省首个咸水层 CO₂地质封存项目为例,列举了钻井施工难点,提供了主要的技术对策,为其他地区咸水层 CO₂地质封存项目钻井施工提供依据。

1 钻井区域地质概况

山东省首个咸水层 CO₂地质封存井孔位于德州市天衢新区生金刘新村北侧,在大地构造上属华北板块-华北拗陷区-临清拗陷-德州潜断陷中的德州潜凹陷。地处黄河冲积平原,地势平缓。钻井周边无明显断裂分布,区域新生界地层由老至新发育有古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组以及第四系平原组,如表 1 所示。

表 1 钻遇地层信息

地 层	深度/m	厚度/m	岩 性 描 述	
第四系 平原组	250	250	岩性主要为灰黄色砂质黏土、黏质砂土、黏土与粉砂、细砂互层,局部夹有砂砾石层	
新近系	明化镇组	1175	925	岩性上部以棕黄色、棕褐色等杂色砂质黏土、黏土、黄褐色中粗砂为主,局部夹有砂砾石层,下部为灰褐色砂质泥岩、泥岩及浅灰、灰褐色细砂岩、泥质砂岩为主
	馆陶组	1462	287	岩性主要为灰褐色砂质泥岩、棕褐、灰褐—灰白色中粗砂岩、中细砂岩、泥质砂岩,底部含少量砂砾岩
古近系	东营组	1538	76	岩性主要为灰褐色泥岩、砂质泥岩
	沙河街组	1721.02	183	岩性主要为灰绿、灰黑、棕红色泥岩、砂质泥岩,棕褐、灰绿色泥质砂岩,局部夹有泥页岩、生物灰岩等
	(未揭穿)			

2 钻井设计及施工难度

2.1 钻井设计及质量要求

封存井目的是查明钻井区域地层结构、地质构造、确定 CO₂封存目标层位,查明封存层位水文地质参数、水质特征,并进行 CO₂封存试验等。

该井为直井,设计井深 1700 m,目的层为古近

系沙河街组咸水含水层,完钻井径 215.9 mm。设计井身结构为二开结构,一开采用 Ø346 mm 钻头钻穿上部松软、易塌、易漏地层,钻至稳定岩层后下入 Ø 273 mm 套管,水泥固井上返至地面;二开采用 Ø 215.9 mm 钻头钻至完钻。其质量要求如下:

(1)井身质量。为顺利进行后续咸水层 CO₂封存

试验,要求封存井孔井身质量稳定,井管安全性高。

(2)取心。设计对钻遇的馆陶组上部与下部地层、东营组地层及沙河街组顶部、中部及底部地层取心,每段地层取心5 m,共计30 m。

(3)固井射孔。封存井设计采用固井射孔工艺,井管外采用水泥固井,最大限度地保证孔壁的穩定。

(4)完井。钻井成井后,需要下入CO₂注入管柱进行后续的CO₂封存试验。

的超临界CO₂^[2,4]通过井孔注入到目标储层中,套管的抗挤抗压性能是钻井施工需要重点考虑的问题。

(4)固井水泥腐蚀性问题。固井质量关系到封存有效性,固井水泥浆与注入的CO₂接触,存在腐蚀问题,在固井水泥选择方面也是需要重点考虑的问题。

(5)CO₂注入及监测问题。钻井完井后,下入的CO₂注入管柱需要考虑稳定性及密封性。此外,CO₂注入后,井口装置需具备长期承压及可监测特性。

2.2 钻井施工难点

(1)井壁稳定性差。封存井位于德州潜凹陷,上覆第四系、新近系、古近系地层厚度大,砂岩与泥岩互层,地层不稳定,且泥岩遇水易膨胀,施工中极易出现坍塌、掉块、埋钻事故^[12-14]。

(2)取心难度大。取心层埋深在1000 m以深,泥岩、砂岩交错分布,非均质性较大,井底地层压力大,且设计不连续取心,施工中易发生岩心掉落、卡钻、埋钻事故^[12]。

(3)套管的气密性与安全性问题。深部咸水层CO₂地质封存工程需要将千吨级、万吨级、百万吨级

3 钻井设备及钻井工艺

3.1 钻井设备优选

根据设计井深及功率、扭矩等参数,采用TSJ-3200型钻机进行施工,场地接通三相电提供电力,并配备井架、绞车、泥浆泵、钻压仪、测斜仪等设备。

3.2 钻具组合及钻进参数

钻井一开采用转盘钻进技术,轻压慢转。为缩短施工周期,保护井壁稳定性,二开采用螺杆复合钻进技术,提高钻进速度。取心段采用川6-3双管单动取心钻具,钻具组合见表2,钻进参数见表3。

表2 钻具组合

钻进次序	井段/m	钻具组合	备 注
一开	0~156	Ø346 mm 钻头+Ø203 mm 钻铤×2+Ø344 mm 扶正器+Ø203 mm 钻铤×3+Ø165 mm 钻铤×3+Ø114 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	随井深逐步增加钻铤
二开	156~终孔	Ø215.9 mm 钻头+Ø172 mm 螺杆+Ø165 mm 钻铤×1+Ø215.9 mm 扶正器+Ø165 mm 钻铤×8+Ø114 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	复合钻进
	取心段	Ø152.4 mm 取心钻头+川6-3 取心钻具+Ø165 mm 钻铤×1+Ø215.9 mm 扶正器+Ø165 mm 钻铤×8+Ø114 mm 钻杆+Ø133 mm 方钻杆	取心钻进

表3 钻进参数

钻进次序	钻进方法	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	排量/(L·s ⁻¹)	泵压/MPa	备 注
一开	转盘钻进	10~30	60~100	30~40	2~5	轻压慢转
二开	复合钻进	20~60	150~250	25~35	5~10	根据地层合理配置,如遇蹩钻、跳钻时
	取心钻进	20~40	60~100	25~35	4~8	换低速

3.3 钻井液体系

根据钻井工程特点结合该地区地层资料,以保护目标层位及保证钻进过程中井孔安全为原则,钻井液体系见表4。

表4 钻井液体系

井段/m	钻井液体系	密度/(g·cm ⁻³)	马氏漏斗黏度/s	API滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	pH值	备 注
0~156	预水化膨润土钻井液	<1.10	35~50	<15	8~9	以提高携带能力为主
156~1230	聚合物钻井液	<1.15	45~55	<10	8.5~10	以护壁和提高钻效为主
1230~1721.02	聚合物低固相钻井液	<1.15	45~55	<8	8.5~10	严格按照要求控制固相含量

4 主要技术对策

4.1 快速钻进及钻井液护壁技术

针对井壁稳定性问题,钻井施工中采取快速钻进及相应钻井液护壁技术。其中一开采用转盘钻进,对应使用预水化膨润土钻井液,以提高携砂能力为主;二开至取心层位井段采用螺杆钻具+高速牙轮钻头/PDC钻头复合钻进,对应使用聚合物钻井液,以护壁和提高钻效为主;取心层位井段采用川6-3双管单动取心钻具,对应使用聚合物低固相钻井液,严格按照要求控制固相含量。

4.2 深孔取心技术

取心层位主要位于馆陶组、东营组及沙河街组地层,选用 $\Phi 152.4$ mm取心钻头,同时在取心管底部增加防止岩心掉落的卡簧装置(图1),该卡簧装置主要由多组可转动的合金片组成。取心钻进时随着岩心进入,合金片可顺着转轴向内部方向翻折,但提钻时,合金片在扭簧的作用下展开,恢复至与卡簧座内壁垂直的状态,此时合金片由于凹槽底部的阻挡不可向外继续翻折,提钻时合金片能够撑托着岩心一起被提取上来。经现场应用测试,该卡簧装置适用于固结或半固结状态的砂岩、泥岩地层。全井共取心6段,取心进尺48 m,设计取心30 m,实际取心40 m,平均岩心采取率83.3%,取心直

径70 mm,满足岩心取样要求。



图1 卡簧装置

4.3 高强度套管成井

钻井设计深度1700 m,实际钻探深度1721.02 m,成井深度1714.84 m,为二开结构。考虑到CO₂封存工程需要将千吨级、万吨级、百万吨级的超临界CO₂注入到目标层位中,对套管的抗挤抗压强度有着更高要求。本次一开井段选择J55钢级石油套管,二开井段选择N80钢级石油套管,下管深度均从地面下至开次底部,起到双重防护作用,且套管抗挤强度、抗压强度均较高(表5),可满足项目CO₂封存试验要求。

表5 CO₂封存井孔下管记录

深度/m	井径/mm	井管类型	井管规格	下管深度/m	抗挤强度/MPa	抗压强度/MPa
0~156	346	一开套管	J55钢级, $\Phi 273.0$ mm $\times$ 8.89 mm	0~156	7.79	18.8
156~1721.02	215.9	二开套管	N80钢级, $\Phi 139.7$ mm $\times$ 9.17 mm	0~1714.84	21.30	39.6

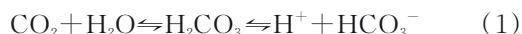
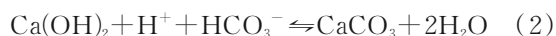
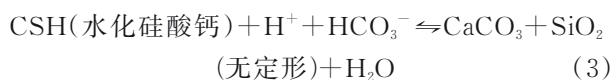
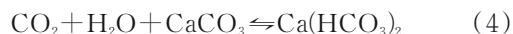
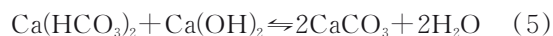
4.4 防腐蚀水泥固井射孔工艺

水泥固井射孔是油井最常用的成井工艺,井管外采用水泥固井,可以最大限度地保证孔壁的稳定性。考虑到大规模封存CO₂的安全性与有效性,CO₂封存井孔采用水泥固井、射孔成井方式。

固井质量关系到封存有效性,固井水泥浆与注入的CO₂接触,存在腐蚀问题。CO₂对油井水泥的腐蚀作用本质在于H₂CO₃能够通过渗透作用进入水泥石,并与水泥水化产物发生化学作用,生成具有不同结晶形态的CaCO₃等腐蚀产物,破坏原水泥石的产物组成及微观结构,进而改变水泥的工程性能^[15-22]。

CO₂溶于水后渗入油井水泥石时,可以与水化

产物发生系列化学反应:



水泥石表面初始碳化后即生成CaCO₃,CaCO₃在CO₂作用下转变为Ca(HCO₃)₂,从而不断消耗水泥石中的Ca(OH)₂,并生成水,见式(5),而水又不断地溶解Ca(HCO₃)₂形成淋滤作用,油井水泥石的孔隙度和渗透性增大,水泥石的致密性明显降低,导致抗压强度随之降低。当Ca(OH)₂被消耗完之后,

CO₂又与CSH反应生成非胶结性的无定形SiO₂,见式(3),破坏水泥石的整体胶结状态,并造成水泥石体系pH值降低,为腐蚀性气体继续渗入水泥环提供了便利条件,造成水泥石的进一步腐蚀^[23]。

结合国内外对CO₂腐蚀机理及防腐蚀材料的研究,通过对水泥石腐蚀评价方法进一步完善,研制开发出了防腐蚀外掺料BCE-750S^[15]。室内研究表明,BCE-750S水泥浆具有良好的防CO₂腐蚀能力^[15,24]。其基本配方为水泥+40% BCE-750S+2.40% 降失水剂 G60S+1.00% 分散剂 CF40S+(0.45%~0.75%)缓凝剂 BXR-200L+0.05% 消泡剂 G603+60% 井场水。同时为保证固井质量,要求加足扶正器,严格执行固井各项技术措施。

射孔是采用特殊聚能器材进入井眼预定层位进行爆炸开孔、让井下地层内流体进入孔眼的作业活动。CO₂封存井孔采用射孔技术,在目标储层位置进行爆破开孔,以便CO₂气体通过套管与固井水泥通道,运移至目标层位中。

4.5 注入及监测技术

井孔成井后,通过下入CO₂注入管柱进行后续的CO₂注入工作。注入管柱结构包括连接工具、坐封工具以及卡瓦封隔器(图2)。其中卡瓦封隔器是石油开采领域通过卡瓦锚定机构实现井下封隔的核心装备,其基本结构包含卡瓦总成、密封元件和传压系统,具有操作便捷、无需井底支点的技术优势。卡瓦封隔器装置用于此处,目的为保障CO₂注入的气密性与稳定性,防止泄漏。

此外,注入CO₂的井口装置需具备长期承压及可监测特性,确保注入阶段与封存期的安全可控。



图2 卡瓦封隔器

参考石油开采领域采油树装置,作为油气井最上部的控制和调节油气生产的主要设备,也可用作CO₂注入的井口装置。在注入CO₂过程中,采油树下部连接CO₂注入管柱,上部包括许多可以用来调节或阻止CO₂从井内涌出的阀门,是顶端与外部环境隔绝的重要屏障。同时,在采油树装置上安装压力监测表,用来监测CO₂注入后的压力。山东省首个深部咸水层CO₂地质封存试验项目井口装置见图3。



图3 井口装置

5 结论

(1)钻井施工过程中采取快速钻进及相应钻井液护壁技术,解决井壁稳定性差问题。封存井完钻井深1721.02 m,成井深度1714.84 m,完井周期26 d,成井质量良好。

(2)通过在取心管底部增加防止岩心掉落的卡簧装置,解决取心难的问题。取心层位主要位于馆陶组、东营组及沙河街组地层,取心总进尺48 m,设计取心30 m,实际取心40 m,平均岩心采取率83.3%,取心直径70 mm,满足岩心取样要求。

(3)采用高强度套管成井解决套管的气密性与安全性问题。一开井段选择J55钢级石油套管,二开井段选择N80钢级石油套管,下管深度均从地面下至开次底部,起到双重防护作用,且套管抗挤强度、抗压强度均较高,可满足项目CO₂封存试验要求。

(4)采用BCE-750S型防腐蚀水泥固井射孔成井工艺,解决固井水泥腐蚀性問題。室内研究表明,BCE-750S水泥浆具有良好的防CO₂腐蚀能力,为后续CO₂封存试验及监测提供保障。

(5)通过在CO₂注入管柱增加卡瓦封隔器装置,保障CO₂注入的气密性与稳定性。同时,采用石油开采领域的采油树井口装置,并安装压力监测表,

解决井口装置长期承压及监测问题。

参考文献:

- [1] 高振军, 刘海明. 基于CO₂封存井的煤矿综采面过钻孔安全施工与风险防控研究[J]. 中国煤炭, 2025, 51(S1): 213-222.
- [2] Wang S H, Tian H L, Zhao X C, et al. Assessment of the geological storage potential and suitability of CO₂ in the deep saline aquifers in the northwest plain of Shandong Province, China[J]. Energies, 2024(17): 6387.
- [3] 李甫成, 张杨, 张晓娟, 等. 深部咸水层CO₂地质储存适宜性评价方法研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 649-660.
- [4] Bachu S, Adams J J. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(20): 3151-3175.
- [5] Shuklar R, Ranjith P, Haque A, et al. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity [J]. Fuel, 2010, 89(10): 2651-2664.
- [6] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国二氧化碳地质埋存条件分析及有关建议[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1107-1110.
- [7] 刁玉杰, 朱国维, 金晓琳, 等. 四川盆地理论CO₂地质利用与封存潜力评估[J]. 地质通报, 2017, 36(6): 1088-1095.
- [8] 张晓普, 于开宁, 李文. 鄂尔多斯地区深部咸水层二氧化碳地质储存适宜性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 23(1): 73-77.
- [9] 徐威, 苏小四, 杜尚海, 等. 松辽盆地中央坳陷区深部咸水层二氧化碳储存潜力评价及其不确定性分析[J]. 第四纪研究, 2011, 31(3): 483-490.
- [10] 师庆三. 碳中和约束下新疆塔里木、准噶尔、吐哈盆地CO₂理论储存潜力评估[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(5): 99-105.
- [11] 陈建文, 孙晶, 杨长清, 等. 东海陆架盆地新生界咸水层二氧化碳封存地质条件及封存前景[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 14-21.
- [12] 刘国卫, 张晓昂, 范钦明, 等. 河南鹿邑深部大口径页岩气调查井钻探施工技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(6): 64-67.
- [13] 郝海洋, 宋继伟, 蒋国胜, 等. 南方页岩气基础地质调查黔普地1井钻井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(8): 23-29.
- [14] 赵亮, 汪程林. 页岩气地质调查皖含地1井施工工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 42-47.
- [15] 汤少兵, 李宗要, 谢承斌, 等. 防CO₂腐蚀水泥浆在神华CCS示范项目中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(S1): 13-15.
- [16] 黄柏宗, 林恩平, 吕光明, 等. 固井水泥环柱的腐蚀研究[J]. 油田化学, 1999, 16(4): 377-383.
- [17] 姚晓. 二氧化碳对油井水泥的腐蚀及其防护措施[J]. 钻井液与完井液, 1998, 15(1): 8-12.
- [18] 周仕明, 王立志, 杨广国, 等. 高温环境下CO₂腐蚀水泥石规律的实验研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(6): 9-13.
- [19] 张景富, 徐明, 朱健军, 等. 二氧化碳对油井水泥石的腐蚀[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(12): 1651-1656.
- [20] Nilestone N B, Kukacka L E, Carciello N. Effects of carbon dioxide attack on geothermal cement grouts[J]. GRC Transactions, 1986, 10: 75-79.
- [21] Nilestone N B, Sugama T, Kukacka L E, et al. Carbonation of geothermal grouts-Part 2: CO₂ attack at 250 °C[J]. Cement and Concrete Research, 1986, 17: 37-46.
- [22] 孙富全, 侯薇, 靳建洲. CO₂对固井水泥的腐蚀[J]. 石油化工应用, 2007, 26(1): 35-39.
- [23] 徐明, 王广雷, 马淑梅, 等. 二氧化碳对油井水泥腐蚀研究[C]//中国石油工程学会钻井工作部. 中国石油工程学会钻井工作部2006年年会暨第六届全国石油钻井院所长会议论文集. 石油工业出版社(Petroleum Industry Press), 2006: 345-349.
- [24] 吴秀章, 李小春, 陈茂山, 等. 中国二氧化碳捕集与地质封存首次规模化探索[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

(编辑 王文)