

# 鄂尔多斯盆地马家沟组二氧化碳地质封存有利区优选



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

路萍<sup>1,2)</sup>, 白勇<sup>2)</sup>, 刘伟刚<sup>2)</sup>, 陈曦<sup>2)</sup>, 郑化安<sup>1,2)</sup>, 刘杰<sup>2)</sup>, 陈永振<sup>2)</sup>, 高建平<sup>2)</sup>

1) 西北大学地质系/大陆动力国家重点实验室, 西安, 710069;

2) 陕西省能源化工研究院, 西安, 710069

**内容提要:** CO<sub>2</sub> 地质封存技术(CCS)是目前国际上实现 CO<sub>2</sub> 大规模低成本减排的最佳选择之一,而 CO<sub>2</sub> 地质封存的首要问题是 CO<sub>2</sub> 封存有利区优选。针对鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存有利区优选研究不足的现状,本文借助大量的地质、钻井、地球物理及测试分析,对鄂尔多斯盆地马家沟组地层水矿化度条件、温压条件、储层条件、构造条件及盖层条件进行研究分析,从而对 CO<sub>2</sub> 地质封存区域边界进行确定。在此基础上,出于 CO<sub>2</sub> 地质封存技术性和经济性考虑,进一步再优选出储层条件优越、距离 CO<sub>2</sub> 捕集装置较近、勘探程度较高、地层埋深合适且对其他矿产开发影响甚微的地区进行 CO<sub>2</sub> 地质封存。结果表明:① 确定鄂尔多斯盆地适宜 CO<sub>2</sub> 地质封存的地区位于摆宴井-沙井子断裂以东、渭北隆起北缘断裂以北、黄河断裂以西、伊盟隆起以南的广大地区,主要包括伊陕斜坡和天环坳陷内的除中央古隆起缺失区以外的马家沟组分布地区;② 乌审旗—靖边—延安岩溶斜坡区(I<sub>1</sub>)为盆内最佳 CO<sub>2</sub> 地质封存区;③ 榆林—米脂岩溶盆地区(I<sub>2</sub>)是 CO<sub>2</sub> 地质封存的有利场所。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 地质封存;有利区优选因素;岩溶斜坡区;马家沟组;鄂尔多斯盆地

近年来,以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体过量排放导致全球气候变暖,同时引发一系列生态环境问题(Becker et al., 2012; Ahmed et al., 2019),甚至影响地球生物的生存状况(Bachu, 2000)。因此,大规模 CO<sub>2</sub> 减排刻不容缓(Bachu, 2002; Minh et al., 2017)。科学研究表明,CO<sub>2</sub> 地质封存技术(CCS)是目前国际上实现 CO<sub>2</sub> 大规模低成本减排的最佳选择之一(Leung et al., 2014; Mac et al., 2017),根据全球碳捕捉与封存研究院 CO<sub>2</sub> RE 数据库数据,截止目前,全球有 51 个大型 CCS 项目,其中 19 个项目正处于商业化运营,4 个项目在建设中,28 个项目处于不同的开发阶段,每年可捕捉 CO<sub>2</sub> 高达 50 Mt。在处于商业化运营的 19 个项目中,17 个项目用于工业领域,2 个项目用于电力领域。

CO<sub>2</sub> 地质封存技术(CCS)是将 CO<sub>2</sub> 转变成超临界状态封存于地下储存体中实现永久地质封存。CO<sub>2</sub> 封存场所主要有四种,分别为枯竭油气藏、无开采价值的煤层、深部盐水层以及深海,其中深部盐水层封存潜力巨大,是目前 CCS 工程中最具前景的地

质储存体(Sunil et al., 2020)。CO<sub>2</sub> 地质封存机理主要有构造和地层封存机理、束缚水封存机理、溶解封存机理以及矿物封存机理(Bachu, 2002; Surdam et al., 2013; Sawada et al., 2018),对于以碳酸盐岩为主的深部盐水层而言,封存过程始终是不同封存机理同时作用的结果,在 CO<sub>2</sub> 注入初期构造封存及溶解封存机理发挥主要作用(Azin et al., 2015),随着时间的推移,束缚水封存和矿化封存机理作用日益凸显(Li Xiaochun et al., 2016; Minh et al., 2017; Philip, 2018)。1996 年,在挪威开展的 Sleipner 海上 CO<sub>2</sub> 封存项目是世界上首个在深部盐水层存储 CO<sub>2</sub> 的商业范例。截止 2017 年底, Sleipner 项目和 Snøhvit CCS 项目已在挪威近海的盐水层捕获并储存了 22 Mt 的 CO<sub>2</sub>。Sleipner 处的 CO<sub>2</sub> 羽流监测观察结果表明 CO<sub>2</sub> 总体存储效率约为孔隙体积的 5%,其中约十分之一溶解在盐水相中。这些估计与 CO<sub>2</sub> 注入的流体动力学一致,在该流体动力学中,重力控制过程中有望产生 1%~6% 的效率(Philip, 2018),由此说明 Sleipner 项目 22 年内

注:本文为国家重点研发计划项目(编号:2019YFE0100100)的成果。

收稿日期:2020-07-14;改回日期:2021-01-26;网络首发:2021-03-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.03.031

作者简介:路萍,女,1988 年生,博士研究生,主要从事测井解释及数值模拟研究;Email: lupyhappy@126.com。通讯作者:白勇,男,1967 年生,博士,高级工程师,主要从事地质、物探、石油勘探与开发、CO<sub>2</sub> 捕集与封存及综合利用相关工作;Email: by111601@163.com。

CO<sub>2</sub> 构造地层封存机理和溶解封存机理起主要作用。

CO<sub>2</sub> 地质封存技术首要解决的问题是 CO<sub>2</sub> 封存有利区优选。本次 CCS 有利区优选研究针对鄂尔多斯盆地开展,该盆地能源资源丰富,煤、石油、天然气、铀矿、盐矿等资源同盆共存,能源及能源化工企业密布,鄂尔多斯盆地成为 CO<sub>2</sub> 集中排放的地区(Wang Yajun et al., 2013)。所以,在鄂尔多斯盆地实施 CO<sub>2</sub> 地质封存(CCS)技术能有力缓解盆地各省(区)的 CO<sub>2</sub> 减排压力,对实现 CO<sub>2</sub> 减排目标具有重大意义。国内外学者针对鄂尔多斯盆地马家沟组开展了诸多 CO<sub>2</sub> 地质封存相关的研究工作,其主要集中在 CO<sub>2</sub> 地质封存机理、CO<sub>2</sub> 地质封存潜力评估、CO<sub>2</sub> 驱油机理数值模拟方面及 CO<sub>2</sub> 封存泄露预案等方面(Shafeen et al., 2004; 李政等, 2012; Surdam et al., 2013; Wang Yajun et al., 2013; Jafari et al., 2014; 王力, 2014; Li Xiaochun et al., 2016; Jiao et al., 2017; Amanda, 2018),而针对马家沟组地质封存有利区优选方面的研究工作比较薄弱。鉴于此,本文展开对鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存有利区优选的研究。

基于以上对 CO<sub>2</sub> 地质封存技术和鄂尔多斯盆地碳排放的调研,本文借助大量的地质、钻井、地球物理及室内实验资料,通过地层水矿化度条件、温压条件、储层条件、构造条件及盖层条件研究对鄂尔多斯盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存区域进行边界确定。在此基础上,出于 CO<sub>2</sub> 地质封存技术性、封存经济性、封存安全性三方面考虑,在这一区域再优选出储层条件优越、距离 CO<sub>2</sub> 排放源较近、勘探程度较高、地层埋深合适且对其他矿产开发影响甚微的地区进行 CO<sub>2</sub> 地质封存,以实现 CO<sub>2</sub> 大规模减排。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地地域辽阔,横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省(区),为我国第二大沉积盆地,面积约为  $37 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。盆地范围北起阴山,南抵秦岭,西自六盘山,东达吕梁山,轮廓呈矩形。根据现今的构造形态,可划分为伊盟隆起、渭北隆起、天环坳陷、西缘冲断带、晋西挠褶带及陕北斜坡等 6 个一级构造单元(图 1)。鄂尔多斯盆地不但以石油、天然气及煤炭等矿产资源蕴藏丰富而闻名于国内外,而且其内部地质结构稳定,周缘露头发育、地层出露齐全而著称(盛军等, 2018),这种得天独厚的综合条件决定了该盆地是我国陆上实施 CO<sub>2</sub> 地质封存最有利和最

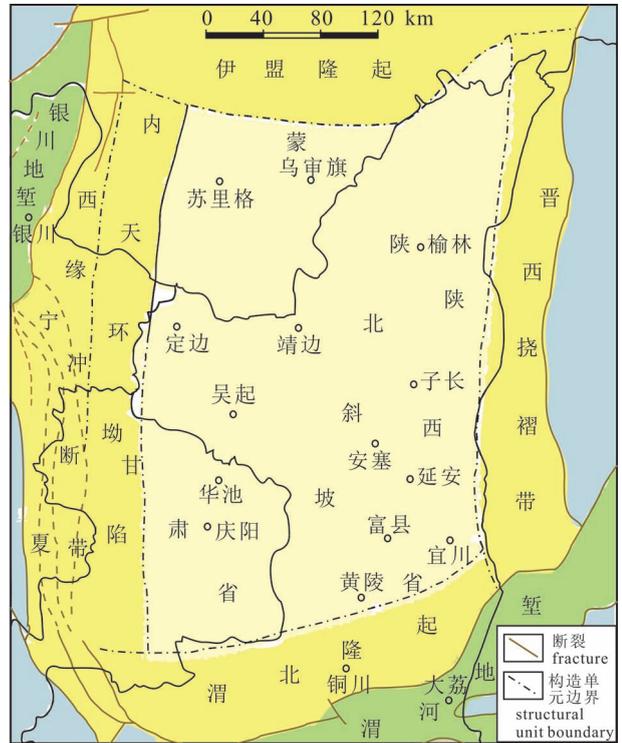


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分图

Fig. 1 Tectonic unit division map of the Ordos Basin

安全的地区之一。

## 2 鄂尔多斯盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存区域边界确定

考虑到影响 CO<sub>2</sub> 地质封存的地质要素涉及到温压、储层、构造及盖层等条件,本文借助大量的地质、钻井、地球物理及室内实验资料,对鄂尔多斯盆地马家沟组地层水矿化度、温压、储层、构造及盖层条件进行研究分析,从而确定 CO<sub>2</sub> 地质封存区域的边界。研究表明,鄂尔多斯盆地适宜 CO<sub>2</sub> 地质封存的地区位于摆宴井-沙井子断裂以东、渭北隆起北缘断裂以北、黄河断裂以西、伊盟隆起以南的广大地区,主要包括伊陕斜坡和天环坳陷内的除中央古隆起缺失区以外的马家沟组分布地区。

### 2.1 地层水矿化度条件

通过对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组 200 个地层水样品进行系统测试、分析,得到马家沟组地层水的平均总矿化度为 154.6 g/L,整体属于卤水层,且以 CaCl<sub>2</sub> 水型为主。与此同时,通过对下古生界马家沟组卤水样品的矿化度分布进行分类,得知矿化度在 50~100 g/L 范围内的样品数占样品总数的 16%,矿化度在 100~150 g/L 范围内的样品数占样

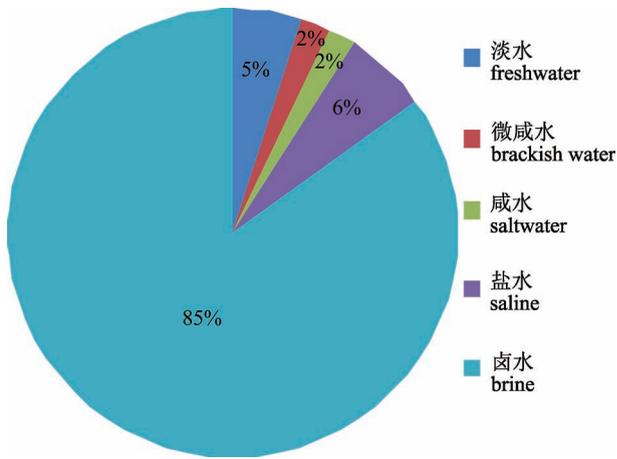


图 2 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组地层水类型图  
Fig. 2 The formation water types of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin

品数占样品总数的 29%, 矿化度在 200-250 g/L 范围内的样品数占样品总数的 23%, 矿化度 >250 g/L 范围内的样品数占样品总数的 14%。值得注意的是, 黄河大断裂以东地区马家沟组地层水氯离子含量及矿化度整体不高 (3.65 g/L), 水型均为 NaHCO<sub>3</sub>, 不适宜 CO<sub>2</sub> 地质封存。因此研究区马家沟组大部分属于高矿化度—极高矿化度的卤水层, 且主要分布于黄河大断裂以西的区域(图 2)。从保护人类赖以生存的淡水资源角度评价, 马家沟组适合 CO<sub>2</sub> 封存。

### 2.2 温压条件

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组顶面温度由东部 65~75℃ 向西逐渐增高至 130~140℃, 马家沟组顶面压力由东部 20 MPa 向西逐渐增高至 40 MPa (孙玉景等, 2018), 由此表明鄂尔多斯盆地马家沟组的现代地下压力场属于正常压力系统, 温度场属于中低温系统, 且封存于马家沟组的 CO<sub>2</sub> 均处于超临界

品总数的 18%, 矿化度在 150~200 g/L 范围内的样

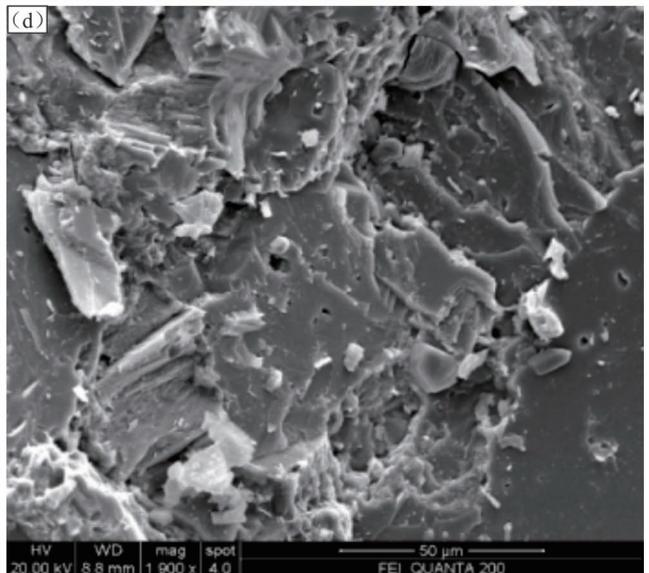
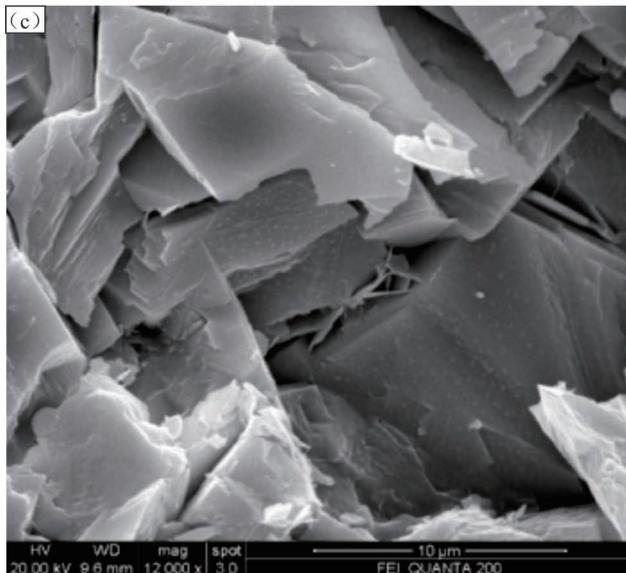
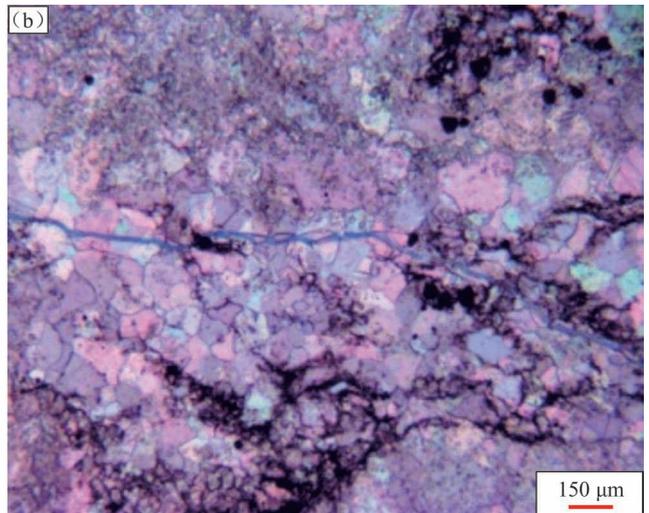
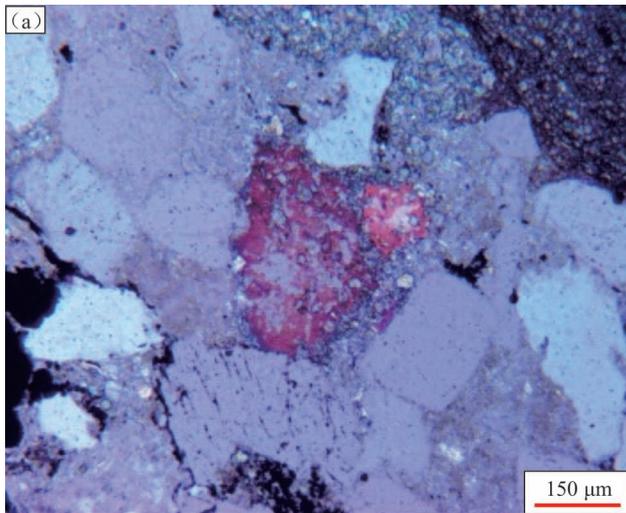


图3 鄂尔多斯盆地马家沟组储层显微特征

Fig. 3 The reservoir microscopic characteristics of the Majiagou Formation in the Ordos Basin

- (a) Y2188, 3570.98 m, 粉砂细晶灰岩、泥质、黏土矿物呈条状分布; (b) Y2193, 3804.75~3804.88 m, 角砾岩泥晶; (c) Y2188, 3568.02 m, 含砂砾岩、方解石交代颗粒; (d) Y1728, 3644.93~3645.13 m, 蚀变玻璃凝灰岩  
 (a) the Well Y2188, 3570.98 m, Majiagou Formation, calcite metasomatic particles; (b) the Well Y2193, 3804.75~3804.88 m, Majiagou Formation, microcracks, unfilled; (c) the Well Y2188, 3568.02 m, Majiagou Formation, intercrystalline pores; (d) the Well Y1728, 3644.93~3645.13 m, Majiagou Formation, limestone, intercrystalline pores and intracrystalline pores

状态( $t > 31.1^{\circ}\text{C}$ 且 $P > 7.38\text{ MPa}$ ; Dai Zhenxue et al., 2018), 这为 $\text{CO}_2$ 的有效注入和封存提供了合适的温压条件。

### 2.3 储层条件

马家沟组由内源沉积岩(主要为碳酸盐岩, 其次为蒸发岩)及经岩溶作用改造的碳酸盐岩(即岩溶角砾岩)组成, 偶见凝灰岩和陆源碎屑岩(图3)。研究区发育风化壳型、白云岩型、岩溶缝洞型等多种类型的储集体, 其中风化壳型储集体和白云岩型储集体主要分布于中央古隆起以东的盆地中东部地区, 岩溶缝洞型储集体分布于中央古隆起以西的盆地西部地区。马家沟组岩石孔隙度范围为 $1\% \sim 11\%$ , 其平均孔隙度为 $5\%$ , 渗透率范围为 $(1 \sim 35) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (杨华等, 2013a, b, 2016), 由此表明, 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组深部盐水层具有 $\text{CO}_2$ 地质封存较好的储层物性条件。

### 2.4 构造条件

利用大量的地质、钻井、地球物理资料对鄂尔多斯盆地构造特征进行研究, 研究表明鄂尔多斯盆地适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存的地区位于摆宴井—沙井子断裂以东、渭北隆起北缘断裂以北、黄河断裂以西、伊盟隆起以南的广大地区, 主要包括伊陕斜坡和天环坳陷内的除中央古隆起缺失区以外的马家沟组分布地区(图4)。这一地区构造稳定且马家沟组沉积稳定, 其上的封盖层也比较稳定, 封堵能力较强, 能够保证 $\text{CO}_2$ 地质封存的泄露风险很小。此范围内的马家沟组是适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存的有利区, 其面积约为 $14.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

(1) 西部边界。鄂尔多斯盆地马家沟组 $\text{CO}_2$ 地质封存区域的西部边界是摆宴井—沙井子断裂(图4F<sub>1</sub>), 这两个断裂是西缘构造带与天环坳陷的分界断裂(张家声等, 2008; 赵迪等, 2019)。断裂以西为构造发育地区, 逆冲推覆断裂、高角度逆冲断裂和褶皱广泛分布, 容易造成 $\text{CO}_2$ 泄露等安全问题, 不适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存; 断裂以东构造微弱, 断裂与褶皱均不发育, 有利于 $\text{CO}_2$ 地质封存。

(2) 南部边界。鄂尔多斯盆地马家沟组 $\text{CO}_2$ 地质封存区域的南部边界是渭北隆起北缘断裂, 即渭北隆起与天环坳陷及伊陕斜坡的分界断裂(图4F<sub>2</sub>; 白相东等, 2015)。该断裂从西向东沿长武—旬邑—宜君—黄陵南呈北东向展布, 断裂以南为构造发育地区, 逆冲推覆断裂、高角度逆冲断裂和褶皱广泛分布, 不适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存; 断裂以北构造微弱, 断裂与褶皱均不发育, 地层产状平缓, 利于 $\text{CO}_2$ 地质封存。

(3) 东部边界。鄂尔多斯盆地马家沟组 $\text{CO}_2$ 地质封存区域的东部边界为晋西挠折带与陕北斜坡的分界断裂即吴堡—府谷东西向断裂(图4F<sub>3</sub>; 江涛, 2010), 断裂以西地层埋深大, 构造作用相对微弱, 断裂与褶皱均不发育, 不易造成 $\text{CO}_2$ 泄露, 适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存。断裂以东构造作用相对强烈, 断裂和褶皱较为广泛(廖昌珍等, 2007), 不利于实施 $\text{CO}_2$ 安全地质封存。

(4) 北部边界。鄂尔多斯盆地马家沟组向北厚度减薄并缺失,  $\text{CO}_2$ 地质封存区域的北部边界为马家沟组缺失线(图4F<sub>4</sub>), 该线以北(伊盟隆起)基本缺失马家沟组(图5), 不适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存。该断裂以南则发育马家沟组一段至五段, 且盖层发育完好, 适宜 $\text{CO}_2$ 地质封存(图4)。

### 2.5 盖层条件

$\text{CO}_2$ 能否永久性地质储存, 主要取决于 $\text{CO}_2$ 储集层上覆沉积盖层的封盖能力(刘苗苗等, 2020)。鄂尔多斯盆地中东部马家沟组主要为马五段风化壳溶岩储层, 所以上石炭统底部的铝土岩是其直接盖层, 石炭系与山西组泥质岩和海相碳酸盐岩可作为马家沟组储层的间接盖层, 上石盒子组和石千峰组泥质岩可作为马家沟组储层的区域封盖层(表1)。鄂尔多斯盆地西部分布着马六段, 其上是中上奥陶统乌拉力克组、拉什仲组及背锅山组且不发育石膏岩和盐岩, 所以马六段直接盖层是乌拉力克组, 太原组灰岩、石炭系与山西组泥质岩和海相碳酸盐岩可作为马家沟组储层的间接盖层, 上石盒子组和石千

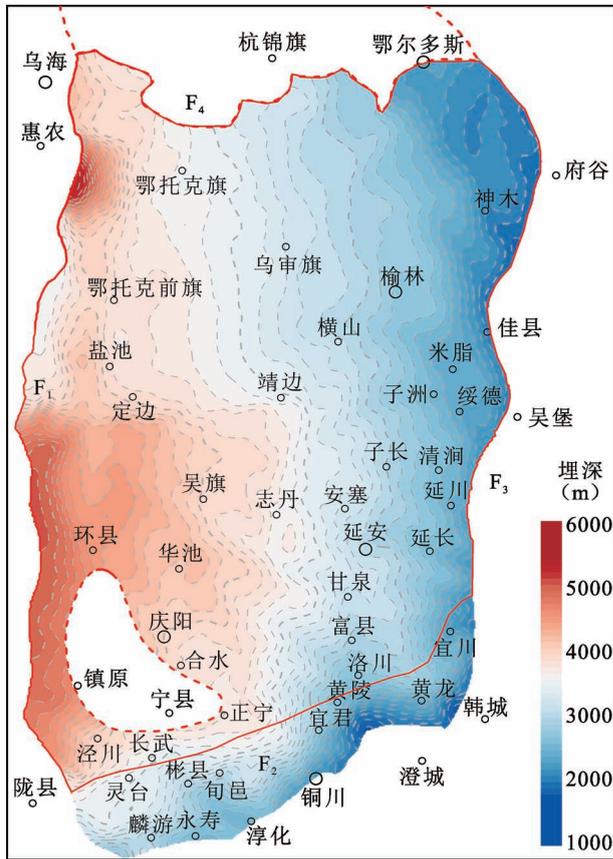


图 4 鄂尔多斯盆地马家沟组适宜 CO<sub>2</sub> 地质封存区域

Fig. 4 The suitable areas for CO<sub>2</sub> geological storage in the

Majiagou Formation in the Ordos Basin

F<sub>1</sub>—摆宴井—沙井子断裂; F<sub>2</sub>—渭北隆起北缘断裂; F<sub>3</sub>—黄河断裂(吴堡—府谷东西向断裂); F<sub>4</sub>—伊盟隆起(马家沟组缺失线)

F<sub>1</sub>—Baiyanjing—Shajingzi Fault; F<sub>2</sub>—Northern Margin of Weibei Uplift; F<sub>3</sub>—Yellow River Fault (Wubao—Fugu East—West Fault);

F<sub>4</sub>—Yimeng Uplift (Missing Line of Majiagou Formation)

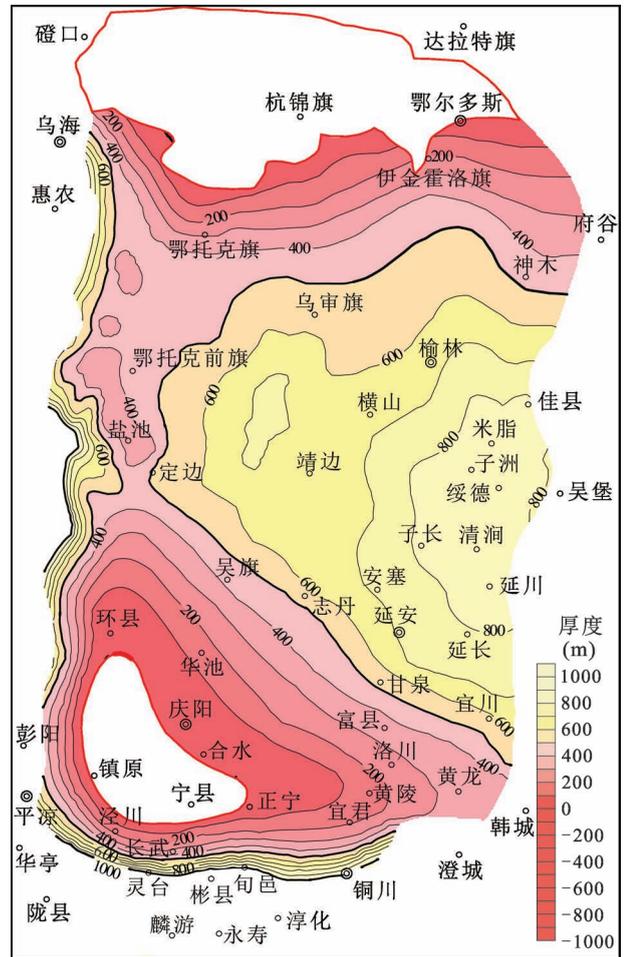


图 5 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组厚度图

Fig. 5 The thickness map of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin

峰组泥质岩可作为马家沟组储层的区域封盖层。马家沟组的盖层性能较好,可永久性地质封存 CO<sub>2</sub>。

### 3 CO<sub>2</sub> 地质封存区域优选因素

确定鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的安全区域边界之后,出于 CO<sub>2</sub> 地质封存技术性(储层物性)和经济性(距离 CO<sub>2</sub> 捕集装置远近、勘探程度、地层埋深及对其他矿产开发的影响)考虑,结合区域条件再优选出储层条件优越、距离 CO<sub>2</sub> 排放源较近、勘探程度较高且对其他矿产开发影响甚微的地区,进行 CO<sub>2</sub> 地质封存区预选。

#### 3.1 储层物性

鄂尔多斯盆地不同地区马家沟组储层分布及物

性等方面差异较大,而储层条件又决定着 CO<sub>2</sub> 地质封存量的大小,所以出于技术可行性考虑,在优选 CO<sub>2</sub> 地质封存有利区优选时储层条件是需要考虑的最重要的因素之一。

通过对钻井、露头及地震资料进行研究,并参照杨华等(2011, 2013a, b, 2016)的研究结果,将鄂尔多斯盆地马家沟组储层分为 4 类:中部风化壳(I)、古隆起周边白云岩体(II)、台缘相带(III)、东部盐下(IV)(图 6)。其中中部风化壳(I)与东部盐下(IV)在东部盐下(IV)范围内属于上下叠合的关系。这些都是目前受到重点关注的储集体,主要位于马五段,也有部分位于马四段和马六段。

(1)中部风化壳(I)。该类储集体主要分布在鄂尔多斯盆地中东部,东部盐下(IV)范围内上部的风化壳也属于该类储集体,但其古岩溶地貌属于岩溶盆地。著名的靖边气田的储层就属于该类储集

表 1 鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 封存盖层类型及封盖能力Table 1 Types and sealing capacity of CO<sub>2</sub> storage caprocks in Majiagou Formation, Ordos Basin

序号	封盖层	层位	盖层类别	分布	盖层厚度 (m)	气体绝对渗透率( $\mu\text{m}^2$ )	突破压力 (MPa)	盖层综合评价
1	石千峰组泥质岩	石千峰组	区域封盖层	分布广泛	141~205	/	8~18	中等—好
2	上石盒子组泥质岩	上石盒子组	区域封盖层	分布广泛	100~140	$1 \times 10^{-8}$	6	中等
3	太原组泥晶灰岩	太原组上部	间接封盖层	分布广泛	8~28	$1.1 \times 10^{-9} \sim 2.15 \times 10^{-8}$	11.2	好
4	本溪组、山西组泥质岩	本溪组、山西组	间接封盖层	分布广泛	80~140	$2.8 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-9}$	11~15	好
5	乌拉力克组深水页岩	马六段(克里摩里组)之上的中奥陶统乌拉力克组	直接盖层	盆地西部分布局限	5~10	$1.3 \times 10^{-8}$	6	中等且分布局限
6	铝土质岩类盖层	马家沟组顶部风化壳表面、上石炭统底部	直接盖层	伊陕斜坡和天环坳陷	3~15	纯铝土岩: $1.45 \times 10^{-7} \sim 6.5 \times 10^{-8}$ 与黏土矿物混合: $6.5 \times 10^{-8} \sim 8.3 \times 10^{-9}$	0.6~5>5	中等
7	膏岩和盐岩	马一、马三、马五段	内幕封盖层	盆地东部	/	$1.2 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-7}$	0.2~1.5	差
8	马家沟组致密碳酸盐岩	马家沟组	内幕封盖层	分布广泛	/	<10 <sup>-8</sup>	1.5~8	差—中等



图 6 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型 (杨华等, 2006)

Fig. 6 The Ordovician carbonate reservoir types in the Ordos Basin (from Yang Hua et al., 2006&amp;)

粉晶结构,因发育硬石膏结核、膏盐矿物晶体等易溶矿物组构,在风化壳期的大气淡水淋溶作用下,易溶膏盐矿物溶解形成溶孔型储集体,储集空间主要为溶孔和铸模孔(赖锦等,2020)。这种圈闭主要受控于盆地前石炭纪古地貌,与侵蚀沟槽及成岩致密带相配置,可以构成大型古地貌—成岩复合圈闭。

储集性能在平面上具有明显的差异,自西向东储层物性总体上具有变差的趋势。乌审旗—靖边—延安一带属于岩溶斜坡且为白云石填充区,储层物性较好,平均孔隙度为 5.7%,平均渗透率为  $3.482 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (杨华等,2013b),划分为 I<sub>1</sub> 区。榆林—米脂一带属于岩溶盆地且为方解石填充,平均孔隙度为 3.4%,平均渗透率为  $0.834 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,划分为 I<sub>2</sub> 区(杨华等,2013b)。

(2) 古隆起周边白云岩体(II)。古隆起周边白云岩体主要目的层为奥陶系马家沟组马五段中下部及马四段白云岩。在马五<sub>5</sub>、马五<sub>7</sub>、马五<sub>9</sub>与马四段等沉积期,古隆起东侧地区近南北向分布台坪相带,水动力较强,有利于发育浅水颗粒滩相沉积。经历浅埋藏期的混合水云化作用及风化壳期的岩溶作用,可以形成晶间孔、晶间溶孔发育的白云岩储层(杨华等,2011)。白云岩为粗粉晶—细晶结构,白云石自形程度较高,多为半自形—自形,发育大量晶间(溶)孔。

该类储层呈环带状分布于古隆起东侧,厚度为 4.0~20m,连片性好,向东白云岩储层呈透镜状展布。平均孔隙度为 4.6%,平均渗透率为  $0.431 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (杨华等,2013b)。

体。风化壳型储集体主要发育在奥陶系马家沟组马五亚段上部的含膏白云岩中,其白云岩基质多呈泥

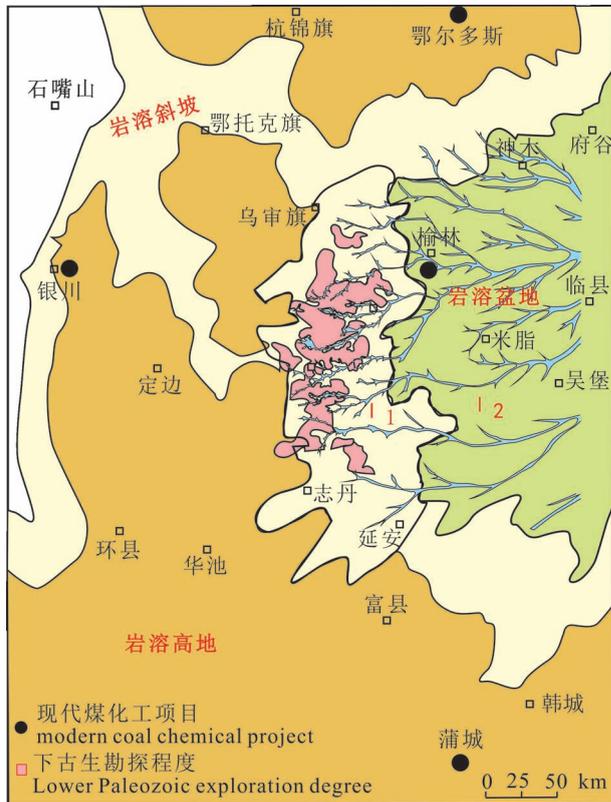


图7 鄂尔多斯盆地现代煤化工基地及CO<sub>2</sub>捕集装置分布图

Fig. 7 The distribution map of modern coal chemical industry base and CO<sub>2</sub> capture device in the Ordos Basin

(3) 台缘相带(Ⅲ)。台缘相带主要发育于盆地西部克里摩里组台缘相带颗粒灰岩中。克里摩里组作为古风化壳的范围较小,呈现为南北向展布的条带状(图7),西侧克里摩里组上覆地层为乌拉力克组,两者之间为连续沉积,所以不发生强烈溶蚀作用。石灰岩由于其易溶性,再叠加构造抬升导致的张裂作用,极易在风化壳期形成较大规模的岩溶缝洞体系(包括地下暗河等)。由于后期岩溶塌陷作用与周围地层的围限,部分洞穴未充填,部分被泥质角砾岩充填,但砾间充填物成岩程度低,孔隙仍然较发育,孔隙度为5%~11%,孔隙类型以晶间(溶)孔、角砾溶孔和溶缝为主,储层厚度一般为3~12 m。台缘相带除了古风化壳溶蚀储层以外,还存在礁滩相带。

(4) 东部盐下(Ⅳ)。位于鄂尔多斯盆地东部马五、马三及马一段均发育膏盐岩,其中马五段是马家沟组最后一期蒸发旋回形成的沉积地层,内部又可进一步细分为马五<sub>10</sub>、马五<sub>8</sub>、马五<sub>6</sub>、马五<sub>4</sub> 4个主要

的膏盐岩层段,尤以马五<sub>6</sub>亚段的膏盐岩分布范围为最广,面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要分布在盆地中东部的陕北米脂盐洼沉积相区。

盐下及盐间白云岩储层是实施CCS工程的有利层位,原因如下:①膏盐层具有良好的封盖作用;②盐下及盐间的马五<sub>7</sub>亚段、马五<sub>9</sub>亚段、马四段等白云岩层中也发育良好的晶间孔型白云岩储层;③由于膏盐岩层在区域应力变化下发生塑性形变,可以在盐下形成大量的鼻状隆起构造,与盐间白云岩储层相配合,可以形成有效的构造—岩性复合圈闭(杨华等,2011)。

### 3.2 距离CO<sub>2</sub>捕集装置远近

距离CO<sub>2</sub>捕集装置远近决定了CCS工程实施成本大小,距离太远,运输费用增加,不利于CO<sub>2</sub>地质封存项目开展,所以尽可能地选择与CO<sub>2</sub>源排放源距离较近的地区实施CO<sub>2</sub>地质封存。鄂尔多斯盆地CO<sub>2</sub>源主要集中在陕西榆林市、延安市、宁夏宁东能源化工基地、内蒙古鄂尔多斯市,此外鄂尔多斯盆地南缘的陕西咸阳、渭南、韩城等地也有一些CO<sub>2</sub>排放源。现代煤化工生产过程中产生的CO<sub>2</sub>排放强度大、浓度高,捕集成本较低,非常有利于CO<sub>2</sub>捕集。鄂尔多斯盆地的现代煤化工项目位于榆林、鄂尔多斯、宁东、包头及蒲城,目前已经运行的是榆林煤化公司的 $5 \times 10^4/\text{a}$  CO<sub>2</sub>捕集装置,在建的是中煤榆林能化公司的 $36 \times 10^4/\text{a}$  CO<sub>2</sub>捕集装置。为了获得低成本CO<sub>2</sub>,在选择封存地点时,首先考虑接近已经布局现代煤化工项目及CO<sub>2</sub>捕集装置的地区(图7)。

### 3.3 勘探程度

在进行CO<sub>2</sub>地质封存有利区优选时,出于经济性考虑,选择勘探程度较高的地区开展CCS工程项目。在CCS项目开展过程中,为了了解地下岩石、储层及物性、盖层等地质情况,必须实施钻井、测井和三维地震等工程资料来积累资料,而获取这些资料的费用极其巨大。选择勘探程度较高的地区,既可以充分利用已有的勘探资料选择最适宜实施CO<sub>2</sub>地质封存的区块并设计较佳的施工方案,也可以尽量利用已有钻井及CO<sub>2</sub>运输和注入所需的基础设施,节省巨额工程费用。鄂尔多斯盆地地下古生界勘探程度较高的地区(主要是靖边气田)如图7所示。

### 3.4 地层埋深

在进行CO<sub>2</sub>地质封存有利区优选时,出于封存效果和封存成本考虑,地层埋深不宜过深也不宜过

浅,埋深过大会导致施工成本急剧升高,而埋深较小可能会造成 CO<sub>2</sub> 泄露,因此需要选择合适的地层埋深进行 CO<sub>2</sub> 地质封存。就鄂尔多斯盆地而言,在谨慎原则下,地层埋深至少需要超过 800 m,才能够保证所注入的 CO<sub>2</sub> 处于超临界状态。而鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组顶面埋深呈现为东高西低的简单斜坡,东部奥陶系顶面埋深 1000 m 左右,西部奥陶系顶面马家沟组埋深 4000~5200 m,这样的地层埋深条件完全可保证所注入的 CO<sub>2</sub> 处于超临界状态,为降低 CO<sub>2</sub> 封存工程费用,合适的埋深是区域优选时应该考虑的因素(图 8)。

### 3.5 对其他矿产开发的影响

出于封存安全性考虑,在进行 CO<sub>2</sub> 地质封存区域优选时,选择对鄂尔多斯盆地内部其他矿产开发影响甚微的区域进行封存。鄂尔多斯盆地马家沟组蕴藏的矿产主要是天然气和岩盐,其上地层中含有煤炭、煤层气、石油与天然气、铝土矿、铀矿等资源(路玉林,2015)。

对于天然气藏来说,如果注入地下的 CO<sub>2</sub> 与天然气混在一起,在开采天然气时不可避免地要将 CO<sub>2</sub> 一起带到地面,然后进行分离,这样一方面增加费用,另一方面影响封存效果,应该尽量避免此类情况的发生。鄂尔多斯盆地目前已探知的天然气藏主要在靖边气田(马家沟组)、米脂气田(上古生界)、大牛地气田(上古生界)等几个气田,这些气田储层物性较好、钻井、地震等资料较多,所以可以在气田开发结束后利用已有的钻井及地质资料实施废弃气田 CO<sub>2</sub> 地质封存。对于已经确定的没有天然气藏的地区可以直接在盐水层开展 CO<sub>2</sub> 地质封存项目。

鄂尔多斯盆地的石油主要赋存于三叠系延长组和侏罗系延安组,其与马家沟组之间的地层包括石炭系一二叠系,这些地层中包含多个封堵能力良好的隔层(赵家锐等,2020),被封存在马家沟组的 CO<sub>2</sub> 几乎不可能迁移到上覆的三叠系延长组和侏罗系延安组,鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存对石油开发影响甚微。

鄂尔多斯盆地的煤炭资源从下往上划分为石炭一二叠系、三叠系、侏罗系三套煤层。其中石炭一二叠系在适宜马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的区域(伊陕斜坡和天环拗陷)埋深较大,一般超过 1500 m 甚至 2000 m,为不可开采煤层;三叠系煤层分布范围很有限,仅在子长一带达到可采厚度;侏罗系延安组煤层分布在盆地中部延安、延川、延长一带之外的地区,其与马家沟组之间的地层包括石炭系一二叠系与三

叠系地层,这些地层中包含多个封堵能力良好的隔层,封存于马家沟组的 CO<sub>2</sub> 几乎不可能迁移到侏罗系延安组。

鄂尔多斯盆地煤层气主要产于石炭系一二叠系和侏罗系,其中石炭一二叠系含气量较高(冯三利等,2002)。在适宜马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的区域(伊陕斜坡和天环拗陷)埋深较大,石炭系一二叠系埋深一般超过 1500 m 甚至 2000 m,目前技术条件下不适宜煤层气开采。此外,由于煤体表面对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力是对甲烷吸附能力的 1~10 倍,在煤层中注入 CO<sub>2</sub>,煤层会吸附大量 CO<sub>2</sub> 分子,煤层气可较容易地从煤体中解吸,如果马家沟组封存的 CO<sub>2</sub> 进入石炭系一二叠系煤层,将会有助于煤层气开发。侏罗系埋深浅,但是含气量较低,其与马家沟组之间的地层包括石炭系一二叠系与三叠系地层,这些地层中包含多个封堵能力良好的隔层,被封存在马家沟组的 CO<sub>2</sub> 几乎不可能迁移到侏罗系延安组。总之,鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存对煤层气开发不会产生明显的不利影响。

鄂尔多斯盆地岩盐主要赋存于马家沟组一段、三段、五段,位于盆地东部,面积较小(唐雪松,2017),如果 CO<sub>2</sub> 迁移到岩盐或其周边,在开发岩盐时 CO<sub>2</sub> 会从地下逃逸造成危害,所以在选择 CO<sub>2</sub> 地质封存场址时应该避开岩盐发育区。

分布于鄂尔多斯盆地山西保德、河曲、兴县和临县一中阳 3 个区的铝土矿均赋存于石炭系本溪组,陕西境内铝土矿分布在府谷和韩城的石炭一二叠系煤系地层中,甘肃铝土矿分布在庆阳的环县、宁县,内蒙古也有分布(路玉林等,2015)。铝土矿资源多分布在盆地周缘并非适宜马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的区域,而且目前仅在山西柳林、中阳、兴县等地开采,所以鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存对铝土矿开发不会产生明显的不利影响。

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿主要分布在盆地周缘的不适宜马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的东胜、陇县、黄陵地区(俞初安等,2019),鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存对砂岩型铀矿开发不会产生不利影响。

## 4 地质封存区域优选结果

根据上述研究,将 CO<sub>2</sub> 地质封存储集体划分为 6 个等级(表 2)。其中乌审旗—靖边—延安岩溶斜坡区(I<sub>1</sub>)的层位为马五上部,岩溶古地貌为岩溶斜坡,平均孔隙度和渗透率均较高,与 CO<sub>2</sub> 排放源

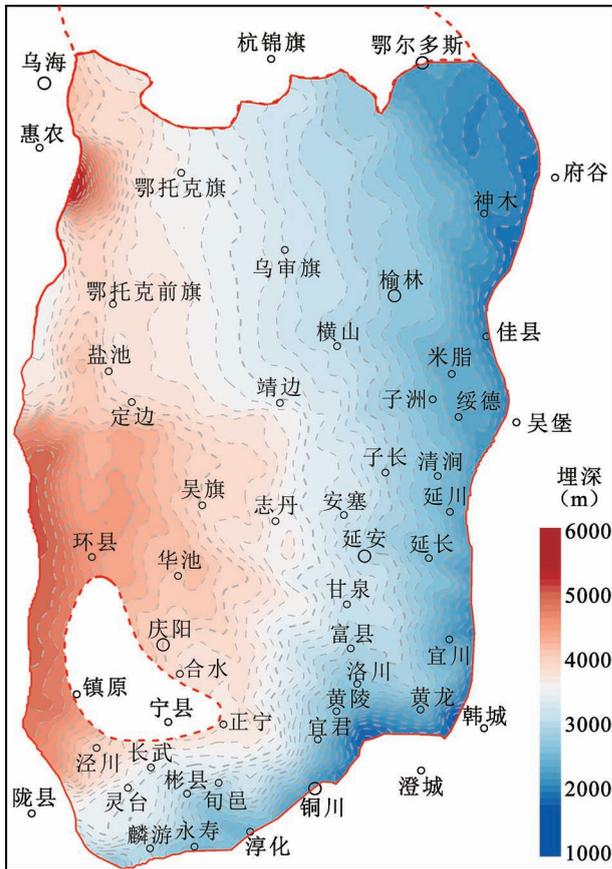


图 8 鄂尔多斯盆地马家沟组顶面埋深图  
Fig. 8 The buried depth map of the top surface of Majiagou Formation in the Ordos Basin

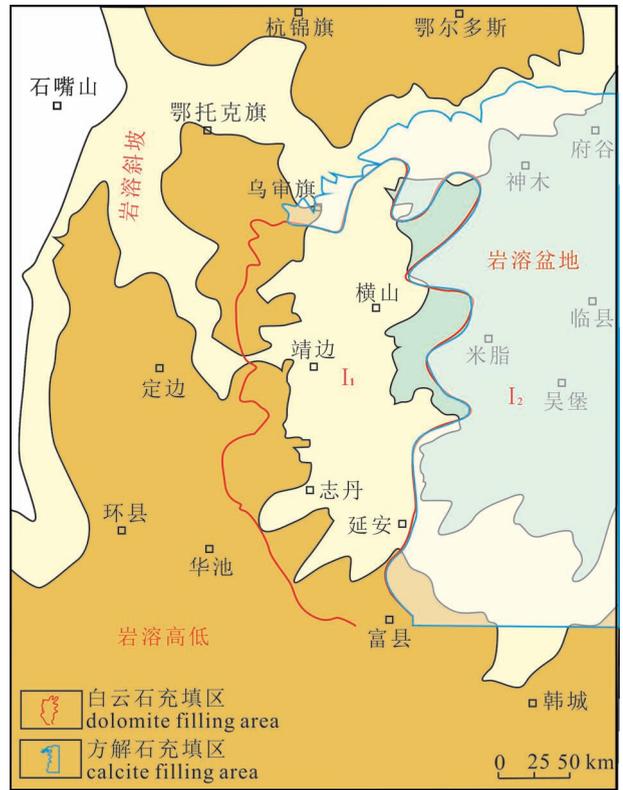


图 9 鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 封存有利区优选图  
Fig. 9 Map of the favorable for optimal CO<sub>2</sub> sequestration in the Majiagou Formation in the Ordos Basin

的距离很近,勘探程度很高,地质资料丰富,埋深非常合适,为最佳 CO<sub>2</sub> 封存区(图 9)。榆林—米脂岩溶盆地地区(I<sub>2</sub>)的层位为马五上部,岩溶古地貌为岩溶盆地,平均孔隙度一般,渗透率较高,与 CO<sub>2</sub> 排放源的距离较近,勘探程度高,地质资料丰富,埋深合适,特别是分布于溶蚀沟槽(谷)两侧的残丘,层位相对保留完整,岩溶作用相对较强,物性较好,是 CO<sub>2</sub> 地质封存的有利场所(图 9)。古隆起周边白云

岩体(II)的层位为马五中下部及马四,岩溶古地貌为岩溶高地,平均孔隙度较高,渗透率较低,与 CO<sub>2</sub> 排放源的距离较远,勘探程度一般,地质资料不足,埋深较为合适,是 CO<sub>2</sub> 地质封存的备选场所。台缘相带(III)层位为克里摩里组,岩溶古地貌为岩溶高地,平均孔隙度较高,与 CO<sub>2</sub> 排放源的距离较近,勘探程度一般,地质资料不足,埋深过大,施工成本较高,是 CO<sub>2</sub> 地质封存的备选场所。东部盐下(IV)层位为马五下部及马四,岩溶古地貌为岩溶盆地,物性不详,与 CO<sub>2</sub> 排放源的距离较远,勘探程度较低,地

表 2 鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存有利区优选成果表

Table 2 Optimal results of favorable areas for CO<sub>2</sub> geological storage in Majiagou Formation, Ordos Basin

储集体	层位	岩溶古地貌	平均孔隙度(%)	平均渗透率(mD)	与 CO <sub>2</sub> 排放源的距离	勘探程度	选区级别	
中部风化壳(I)	乌审旗—靖边—延安岩溶斜坡区(I <sub>1</sub> )	马五上部	岩溶斜坡	5.7	3.482	很近	很高	1
	榆林—米脂岩溶盆地地区(I <sub>2</sub> )	马五上部	岩溶盆地	3.4	0.834	较近	高	2
古隆起周边白云岩体(II)		马五中下部及马四	岩溶高地	4.6	0.431	较远	一般	3
台缘相带(III)		克里摩里组	岩溶高地	5-11	/	较近	一般	4
东部盐下(IV)		马五下部及马四	岩溶盆地	/	/	较远	较低	5
其他		马四、马三、马二、马一	/	/	/	/	低	6

质资料不足,埋深过小,是 CO<sub>2</sub> 地质封存的备选场所。其他储集体层位为马四、马三、马二、马一,物性不详,与 CO<sub>2</sub> 排放源的距离远近皆有,勘探程度低,地质资料非常少,有待进一步评价,是 CO<sub>2</sub> 地质封存的备选场所。

## 5 结论

(1)通过对地层水矿化度条件、温压条件、储层条件、构造条件及盖层条件进行系统研究,得知鄂尔多斯盆地适宜 CO<sub>2</sub> 地质封存的地区位于摆宴井—沙井子断裂以东、渭北隆起北缘断裂以北、黄河断裂以西、伊盟隆起以南的广大地区,主要包括伊陕斜坡和天环坳陷内的除中央古隆起缺失区以外的马家沟组分布地区。

(2)CO<sub>2</sub> 地质封存区域优选因素主要从封存技术性 & 封存经济性进行考虑,主要针对区域内各储集体物性及其古岩溶类型、距离 CO<sub>2</sub> 排放源远近、勘探程度、地层埋深及对其他矿产开发的影响程度展开研究。

(3)确定鄂尔多斯盆地马家沟组 CO<sub>2</sub> 地质封存的区域边界之后,结合 CO<sub>2</sub> 地质封存区域优选因素,优选得出乌审旗—靖边—延安岩溶斜坡区(I<sub>1</sub>)为最佳 CO<sub>2</sub> 地质封存区,榆林—米脂岩溶盆地(I<sub>2</sub>)是 CO<sub>2</sub> 地质封存的有利场所。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白相东,迟宝明,关成尧,张艳,袁四化,梁文天. 2015. 鄂尔多斯南缘构造带现今地块运动模式. 吉林大学学报:地球科学版, 45(3): 674~682.

冯三利,叶建平,张遂安. 2002. 鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析. 地质通报, 21(10): 658~662.

江涛. 2010. 鄂尔多斯盆地东北部中生代差异抬升过程分析. 导师:陈刚. 西北大学硕士学位论文.

赖锦,刘秉昌,冯庆付,庞小娇,赵太平,王贵文,王抒忱,陈晶. 2020. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价. 地质论评, 94(5): 1551~1567.

李政,许兆峰,张东杰, Logan W, Sarah F, 李利平. 2012. 中国实施 CO<sub>2</sub> 捕集与封存的参考意见. 北京:清华大学出版社.

廖昌珍,张岳桥,温长顺. 2007. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义. 地质学报, 4(5): 466~474.

刘苗苗,孟令东,王海学,吴桐. 2020. 二氧化碳地质封存中盖层力学完整性数值模拟研究综述. 特种油气藏, 27(2): 1006~6535.

路玉林,林燕,易继宁,郭佳,王慧,杨菁. 2015. 鄂尔多斯盆地矿产资源现状及勘查开发建议. 中国矿业, 10(4): 15~21.

盛军,徐立,王奇,阳成,丁晓军,刘燕妮. 2018. 鄂尔多斯盆地苏

里格气田致密砂岩储层孔隙类型及其渗流特征. 地质论评, 64(3): 764~776.

孙玉景,周立发,焦尊生. 2018. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组 CO<sub>2</sub> 封存的地质条件研究. 西北大学学报(自然科学版), 48(3): 404~412.

唐雪松. 2017. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组马五段盐下白云岩储层特征及其控制因素. 导师:谭秀成. 成都:西南石油大学硕士学位论文.

王力. 2014. 鄂尔多斯盆地榆林地区山西组二氧化碳封存数值模拟研究. 导师:周立发. 西安:西北大学硕士学位论文.

杨华,黄道军,郑聪斌. 2006. 鄂尔多斯盆地奥陶系岩溶古地貌气藏特征及勘探进展. 中国石油勘探, 11(3): 1~13.

杨华,付金华,魏新善,任军峰. 2011. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域. 石油学报, 32(5): 733~740.

杨华,王宝清. 2013a. 鄂尔多斯盆地古隆起周边地区奥陶系马家沟组储层影响因素. 岩性油气藏, 25(3): 9~16.

杨华,刘新社,张道峰. 2013b. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展. 天然气工业, 33(5): 1~12.

杨华,包洪平,马占荣. 2014. 侧向供烃成藏—鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识. 天然气工业, 34(4): 19~26.

杨华,刘新社,黄道军. 2016. 长庆油田天然气勘探开发进展与“十三五”发展方向. 天然气工业, 36(5): 1~14.

俞初安,司马献章,刘晓雪,王善博,朱强. 2019. 鄂尔多斯盆地煤田区铀矿成矿地质条件. 地质论评, 65(z1): 191~192.

张家声,何自新,费安琪,李天斌,黄雄南. 2008. 鄂尔多斯西缘北段大型陆缘逆冲推覆体系. 地质科学, 43(2): 251~281.

赵迪,李荣西,赵帮胜, Jack K, Daniel L. 2019. 鄂尔多斯盆地西南缘岐山地区马家沟组岩相和沉积环境分析. 地质论评, 65(z1): 115~116.

赵家锐,祝海华,冯小哲. 2020. 鄂尔多斯盆地苏里格地区下石盒子组致密气储层孔隙结构分类及影响因素. 地质论评, 66(s1): 112~114.

Ahmed R, Liu Gujian, Yousaf B. 2020. Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation—A review. Journal of Cleaner Production, 242: 118409.

Amanda R. 2018. Element mobilization and immobilization from carbonate rocks between CO<sub>2</sub> storage reservoirs and the overlying aquifers during a potential CO<sub>2</sub> leakage. Chemosphere, 197: 399~410.

Azin R, Mehrabi N, Osfouri S. 2015. Experimental study of CO<sub>2</sub>-saline aquifer-carbonate rock interaction during CO<sub>2</sub> sequestration. Procedia Earth and Planetary Science, 15: 413~420.

Bachu S. 2000. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. Energy Conversion and Management, 41: 953~970.

Bachu S. 2002. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of the geological space into CO<sub>2</sub> space. Energy Conversion and Management, 43: 87~102.

Bai Xiangdong, Chi Baoming, Guan Chengyao, Zhang Yan, Yuan Sihua, Liang Wentian. 2015&. Current block movement model in the southern margin of Ordos. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 45(3): 674~682.

Becker T P, Lynds R. 2012. A geologic deconstruction of one of the world's largest natural accumulations of CO<sub>2</sub>, Moxa arch, southwestern Wyoming. AAPG Bulletin, 96(9): 1643~1664.

Dai Zhenxue, Zhang Ye, Jeffrey B. 2018. Heterogeneity-assisted carbon dioxide storage in marine sediments. Applied Energy, 225: 876~883.

- Feng Sanli, Ye Jianping, Zhang Suian. 2002. Analysis of coalbed methane resources and development potential in Ordos Basin. *Geological Bulletin*, 21(10): 658~662.
- Jafari A, Bachu S. 2014. Evaluation of CO<sub>2</sub> storage capacity in Devonian hydrocarbon reservoirs for emissions from oil sands operations in the Athabasca area, Canada. *Energy Procedia*, 63: 5222~5230.
- Jiang Tao. 2010. Analysis of meso-Cenozoic differential uplifting process in the northeastern Ordos Basin. Tutor: Chen Gang. Master's thesis of Northwestern University.
- Jiao Z S, Pawar R, Duguid A. 2017. A field demonstration of an active reservoir pressure management through fluid injection and displaced fluid extraction at the Rock Springs Uplift. A priority geologic CO<sub>2</sub> storage site for Wyoming. *Energy Procedia*, 114: 2799~2811.
- Kumar S, Foroozesh J, Edlmann K. 2020. A comprehensive review of value-added CO<sub>2</sub> sequestration in subsurface saline aquifers. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81: 103437.
- Lai Jin, Liu Bingchang, Feng Qingfu, Pang Xiaojiao, Zhao Taiping, Wang Guiwen, Wang Shuchen, Chen Jing. 2020. Identification and evaluation of dolomite sedimentary microfacies in the fifth member of Majiagou Formation in Jingbian gas field, Ordos Basin. *Geological Review*, 94(5): 1551~1567.
- Leung D Y, Caramanna G, Maroto-Valer M M. 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 426~443.
- Li Xiaochun, Li Qi, Bai Bing. 2016. The geomechanics of Shenhua carbon dioxide capture and storage (CCS) demonstration project in Ordos Basin, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6: 948~966.
- Li Zheng, Xu Zhaofeng, Zhang Dongjie, Logan West, Sarah Forbes, Li Liping. 2012. Suggestions on the Implementation of CO<sub>2</sub> Capture and Storage in China. Beijing: Tsinghua University Press.
- Liao Changzhen, Zhang Yueqiao, Wen Changshun. 2007. Tectonic style and regional tectonic significance of the eastern margin boundary Belt of the Ordos Basin. *Journal of Geology*, 4(5): 466~474.
- Liu Miaomiao, Meng Lingdong, Wang Haixue, Wu Tong. 2020. Review of numerical simulation research on mechanical integrity of caprock in carbon dioxide geological storage. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 27(2): 1006~6535.
- Lu Yulin, Lin Yan, Yi Jining, Guo Jia, Wang Hui, Yang Jing. 2015. The current situation of mineral resources in the Ordos Basin and suggestions for exploration and development. *China Mining*, 10(4): 15~21.
- Mac D N, Fennell P S, Shah N, Maitland G C. 2017. The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. *Nat. Clim. Change*, 7(4): 243.
- Minh C N, Ye Zhang, Jun Li. 2017. A Geostatistical study in support of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers of the Shenhua CCS Project, Ordos Basin, China. *Energy Procedia*, 114: 5826~5835.
- Philip S R. 2018. The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, 146: 166~172.
- Sawada Y, Jiro Tanaka J, Suzukia C. 2018. Tomakomai CCS Demonstration Project of Japan, CO<sub>2</sub> Injection in Progress, *Energy Procedia*, 154: 3~8.
- Shafeen A, Croiset E, Douglas P L, Chatzis I. 2004. CO<sub>2</sub> sequestration in Ontario, Canada. Part I: storage evaluation of potential reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 45: 2645~2659.
- Sheng Jun, Xu Li, Wang Qi, Yang Cheng, Ding Xiaojun, Liu Yanni. 2018. Pore types and seepage characteristics of tight sandstone reservoirs in Sulige gas field, Ordos Basin. *Geological Review*, 64(3): 764~776.
- Sun Yujing, Zhou Lifa, Jiao Zunsheng. 2018. Research on geological conditions of CO<sub>2</sub> storage in the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 48(3): 404~412.
- Surdam R C, Jiao Z S, Ganshin Y. 2013. Characterizations of the CCUS attributes of a high-priority CO<sub>2</sub> storage site in Wyoming, USA. *Energy Procedia*, 37: 3911~3918.
- Tang Xuesong. 2017. Characteristics and controlling factors of the subsalt dolomite reservoir in Member Ma Wu of the Majiagou Formation, Ordovician, central Ordos Basin. Supervisor: Tan Xiucheng. Chengdu: Master's thesis of Southwest Petroleum University.
- Wang Li. 2014. Numerical simulation of carbon dioxide storage in Shanxi Formation in Yulin area of Ordos Basin. Supervisor: Zhou Lifa. Xi'an: Master's thesis of Northwest University.
- Wang Yajun, Jiao Zunsheng, Ronald Surdam. 2013. A feasibility study of the integration of enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub> flooding) with CO<sub>2</sub> storage in the mature oil fields of the Ordos Basin, China. *Energy Procedia*, 37: 6846~6853.
- Yang Hua, Bao Hongping, Ma Zhanrong. 2014. Lateral hydrocarbon supply and accumulation—new understanding of natural gas accumulation under the Ordovician gypsum salt rock in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 34(4): 19~26.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng. 2011. Ordovician Marine carbonate gas exploration field in the Ordos Basin. *Journal of Petroleum Sciences*, 32(5): 733~740.
- Yang Hua, Huang Daojun, Zheng Congbin. 2006. Characteristics and exploration progress of Ordovician karst paleogeomorphic gas reservoirs in Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 11(3): 1~13.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Huang Daojun. 2016. The progress of natural gas exploration and development in Changqing Oilfield and the development direction of the "13th Five-Year Plan". *Natural Gas Industry*, 36(5): 1~14.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Zhang Daofeng. 2013b. The main controlling factors and exploration progress of Ordovician marine carbonate gas accumulation in Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 33(5): 1~12.
- Yang Hua, Wang Baoqing. 2013a. Influencing factors of the Ordovician Majiagou Formation reservoir in the area around the paleo-uplift of the Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 25(3): 9~16.
- Yu Fengan, Sima Xianzhang, Liu Xiaoxue, Wang Shanbo, Zhu Qiang. 2019. Uranium metallogenic geological conditions in the coalfield area of the Ordos Basin. *Geological Review*, 65(z1): 191~192.
- Zhang Jiasheng, He Zixin, Fei Anqi, Li Tianbin, Huang Xiongan. 2008. Large continental margin thrust nappe system in the northern section of the western margin of Ordos. *Chinese Journal of Geology*, 43(2): 251~281.
- Zhao Di, Li Rongxi, Zhao Bangsheng, Jack K, Daniel L. 2019. Analysis of lithofacies and sedimentary environment of Majiagou Formation in Qishan area, Southwestern Margin of Ordos Basin. *Geological Review*, 65(z1): 115~116.
- Zhao Jianui, Zhu Haihua, Feng Xiaozhe. 2020. Pore structure classification and influencing factors of tight gas reservoirs in the Lower Shihezi Formation in Sulige area, Ordos Basin. *Geological Review*, 66(s1): 112~114.

## Optimization of favorable areas for carbon dioxide geological storage in Majiagou Formation in Ordos Basin

LU Ping<sup>1, 2)</sup>, BAI Yong<sup>2)</sup>, LIU Weigang<sup>2)</sup>, CHEN Xi<sup>2)</sup>, ZHENG Hua'an<sup>2)</sup>,  
LIU Jie<sup>2)</sup>, CHEN Yongzhen<sup>2)</sup>, GAO Jianping<sup>2)</sup>

1) *Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069;*

2) *Shaanxi Provincial Institute of Energy Resource and Chemical Engineering, Xi'an, 710069*

**Objective:** CO<sub>2</sub> geological storage technology (CCS) is currently one of the best international options for achieving large-scale low-cost CO<sub>2</sub> emission reduction, and the primary issue of CO<sub>2</sub> geological storage is the selection of favorable areas for CO<sub>2</sub> storage. In view of the insufficient research on the optimization of the favorable area for CO<sub>2</sub> geological storage in the Ordos Basin, this paper mainly optimizes favorable areas suitable for geological storage of carbon dioxide in the Majiagou Formation in the Ordos Basin.

**Methods:** Firstly, we determine the boundary of the CO<sub>2</sub> geological storage area in the whole Basin through the study of formation water conditions, basic physical conditions, reservoir conditions, structural conditions and caprock conditions with a help of a large amount of geological, drilling, geophysical and laboratory experimental data.

**Results:** After determining the boundary of the CO<sub>2</sub> geological storage area, it can be optimized to carry out CO<sub>2</sub> geological sequestration in the areas with favorable reservoir conditions, relatively close to CO<sub>2</sub> emission sources, high degree of exploration, appropriate depth of formation and little impact on other mineral development.

**Conclusions:** Combined with the early research, we make a conclusion that ① The areas suitable for geological storage of CO<sub>2</sub> in the Ordos Basin are located in the east of the Baiyanjing-Shajingzi fault, the north of the northern margin of the Weibei uplift, the west of the Yellow River fault, and the south of the Yimeng uplift, mainly including Iraq The Majiagou Formation in the Shaanxi Slope and Tianhuan Depression except for the missing area of the central paleo-uplift; ② The Wushenqi-Jingbian-Yan'an karst slope area (I<sub>1</sub>) is the best CO<sub>2</sub> geological storage in the basin Area; ③ Yulin-Mizhi karst basin area (I<sub>2</sub>) is a favorable place for geological storage of CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> geological storage; CO<sub>2</sub> favorable area optimization factor; Karst slope area; Majiagou Formation; Ordos Basin

**Acknowledgements:** This study was supported by National Key R & D Program(No. 2019YFE0100100)

**First author:** LU Ping, female, Ph. D. candidate. The main research direction is logging interpretation, geological modeling and numerical simulation; Email: lupyhappy@126.com

**Corresponding author:** BAI Yong, male, born in 1967, Ph. D., mainly engaged in geological, geophysical, oil exploration and development, relevant work of CCUS; Email: 111601@163.com

**Manuscript** received on: 2020-06-28; Accepted on: 2021-01-26; Network published on: 2021-03-20

**Doi:** 10. 16509/ j. georeview. 2021. 03. 031

**Edited by:** LIU Zhiqiang

