

鄂尔多斯盆地（陕西段）深部咸水层二氧化碳地质封存潜力禀赋与靶区选择¹

周阳^[1,2,3], 郭鸿^[2,3], 张乐^[2,3], 桂忠强^[2,3], 蒋恕^[1], 刘宸^[2,3], 杨金峰^[4], 王克^[2,3], 段晨阳^[2,3], 熊鹏飞^[1], 柯婷婷^[2,3], 商旭甫^[2,3], 赵汗青^[2,3]

(1.中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430078; 2.陕西省地质调查院, 陕西 西安 710004;

3.陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 4.中国石油长庆油田分公司第五采油厂, 陕西 西安 710200)

摘要: 为了对鄂尔多斯盆地(陕西段)二氧化碳地质封存勘查选区、工程选址及科学规划提供理论指导, 本文采用资料收集、地质调查、地球物理勘查、样品测试等方法, 查明了研究区深部咸水层二氧化碳地质封存主要储层特征, 评价了碳封存适宜性, 估算了碳封存潜力, 圈定了碳封存靶区。结果表明研究区 6 个主要碳封存储层预测地质潜力为 1210.23 亿吨, 预测技术容量 170.86 亿吨; 将研究区二氧化碳地质封存适宜性分区分为适宜区、较适宜区、一般适宜区及不适宜区等 4 类; 圈定了碳封存靶区 5 处, 靶区预测地质潜力为 67.33 亿吨, 预测技术容量 9.5 亿吨。基于研究区碳封存潜力巨大, 源汇匹配度高, 认为研究区具备碳封存规模化开发的各项条件, 可作为我国开展 CCUS 技术应用的重点区域。

关键词: 二氧化碳; 地质封存; 咸水层; 潜力评价; 适宜性分区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P641.6

收稿日期: 2025-09-05

Potential and Target Selection for Deep Saline Aquifer CO₂ Geological Sequestration in the Ordos Basin (Shaanxi Section)

ZHOU Yang^[1,2,3], GUO Hong^[2,3], ZHANG Le^[2,3], GUI Zhongqiang^[2,3], JIANG Shu^[1], LIU Chen^[2,3], YANG Jinfeng^[4], WANG Ke^[2,3], DUAN Chenyang^[2,3], XIONG Pengfei^[1], KE Tingting^[2,3], SHANG Xufu^[2,3], ZHAO Hanqing^[2,3]

(1.China University of Geosciences, 430078, Wuhan, China;

2.Shaanxi Institute of Geological Survey, 710004, Xi'an, China;

3.Shaanxi Hydrogeology, Engineering Environmental Geology Survey Center, 710068 Xi'an, China;

4.PetroChina Changqing Oilfield Company, 710200, Xi'an, China)

Abstract: To provide theoretical guidance for the exploration, engineering site selection, and scientific planning of carbon dioxide geological storage in the Ordos Basin (Shaanxi section), this study employed methods such as data collection, geological surveys, geophysical exploration, and sample testing to identify the main reservoir characteristics of deep saline aquifers for CO₂ geological storage in the study area. The suitability of carbon storage was evaluated, the potential for carbon storage was estimated, and target zones for carbon storage were delineated. The results indicate that the predicted geological potential of six major carbon storage reservoirs in the study area is 121.023 billion tons, with a predicted technical capacity of 17.086 billion tons. The suitability of CO₂ geological storage in the study area was classified into four categories: suitable, relatively suitable, moderately suitable, and unsuitable. Five target zones for carbon storage were delineated, with a predicted geological potential of 6.733 billion tons and a predicted technical capacity of 0.95 billion tons. Given the significant carbon storage potential and high source-sink matching degree in the study area, it is concluded that the region meets all the conditions for large-scale carbon storage development and can serve as a key area for the application of CCUS technology in China.

Key words: carbon dioxide; Geological storage; Saltwater layer; Potential evaluation; Suitability zoning; ordos

About the first author: ZHOU Yang, male, born in 1986, master, PhD student, senior engineer, Engaged in geothermal

基金项目: 陕西省生态环境厅省级生态环境专项资金项目“陕西省二氧化碳地质封存潜力评价与地面监测体系建设”(编号: 202401)、陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目“关中盆地渭北岩溶热储地热资源聚敛机制及开发潜力研究”(编号: 2024JC-YBQN-0339), 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目“西安地区非均质砂岩热储回灌过程中渗流-传热机理研究”(编号: 2024JC-YBQN-0363)资助。

作者简介: 周阳(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 在读博士, 从事地热地质调查评价与开发利用技术研究、二氧化碳地质封存等方面工作。E-mail: 77196410@qq.com, ORCID: 0009-0002-6189-3896

通讯作者: 蒋恕(1976—), 男, 教授, 博士, 长期从事多能源盆地储层预测、地热和油气协同勘探开发、二氧化碳在提高地热和油气采收率中应用及地下储能研究。E-mail: Jiangsu@cug.edu.cn

geological survey, evaluation, development and utilization technology research, as well as geological storage of carbon dioxide;
E-mail:77196410@qq.com.

Fund support: Supported by the Provincial Ecological Environment Special Fund Project of Shaanxi Provincial Department of Ecology and Environment (No. 202401), the Youth Project of Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (No. 2024JC-YBQN-0339), and the Youth Project of Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (No. 2024JC-YBQN-0363), entitled "Evaluation of Carbon Dioxide Geological Storage Potential and Construction of Ground Monitoring System in Shaanxi Province".

引言

二氧化碳捕集利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, 简称 CCUS) 是指将二氧化碳从排放源或大气中分离后, 加以利用或永久封存, 以实现二氧化碳永久减排的过程, 是实现化石能源大规模低碳利用的关键技术之一 (蒋恕等, 2023), 对陕西省发展新质生产力、加快经济社会发展全面绿色转型具有重要战略意义。

我国高度重视 CCUS 在实现碳中和目标过程中的关键作用, 中国地质调查局开展了全国范围的二氧化碳地质封存调查评价工作 (郭建强等, 2014; 张森琦等, 2011), 河北省 (宋一卓等, 2025)、广西省 (石树静等, 2025)、甘肃省 (范斌等, 2024)、安徽省 (王齐鑫等, 2017)、黑龙江 (马永法等, 2022)、广东省 (周蒂等, 2024) 等多个省级地质勘查单位也开展了全省或省内重点区域的二氧化碳地质封存调查评价工作。同时, 一系列示范项目落地运行, 呈现出新技术陆续涌现、成本持续下降、应用领域不断扩大的发展趋势。电力、石油、化工、钢铁和建材等行业正在加速应用 CCUS 技术, 多个百万吨级项目正在进入实施阶段。

鄂尔多斯盆地 (陕西段) 深部咸水层二氧化碳地质封存潜力巨大, 同时作为我国重要能源化工基地, 碳源碳汇匹配度高。但目前仅开展了全国层面或局部地区、个别储层的二氧化碳地质封存调查评价工作, 区域碳封存潜力评价工作尚属空白, 无法为进一步勘查评价、工程选址建设、宏观政策制定和区域发展规划提供理论支撑。陕西省地质调查院首次系统地开展了全省深部咸水层二氧化碳地质封存调查评价工作。在系统收集分析基础地质、水文地质、油气地质、煤田地质、地热地质等资料的基础上, 通过地质调查、地球物理勘查、样品测试等方法, 基本查明了陕西省深部咸水层二氧化碳地质封存主要储层特征, 评价了封存适宜性, 估算了封存潜力, 对比分析二氧化碳地质封存地质条件和经济条件, 圈定一批二氧化碳地质封存靶区, 为陕西省二氧化碳地质封存的进一步勘查与科学规划提供技术支撑。

1 研究区概况

1.1 研究区范围及储层选择

根据咸水层储层深度宜大于 800m、断裂避让距离大于 5km、储层地下水总矿化度应大于 8g/L、储层单层厚度宜大于 1m、叠加厚度宜大于 5m 等原则, 确定研究区深部咸水层二氧化碳地质封存主要储层包括侏罗系延安组、三叠系延长组、纸坊组、和尚沟及刘家沟组、二叠系孙家沟及石盒子组、奥陶系马家沟组等 6 个。

1.2 地质构造

研究区内陕北高原为新生代高原隆起, 近期构造活动以大面积上升为主。断裂主要为基底断裂, 隐伏断裂新构造活动微弱。近千余年来仅发生过一些小地震, 大于 VI 级地震尚未发生, 基本烈度小于等于 VI 度。

1.3 地层岩性

研究区基底为太古界中高级变质岩系。寒武系、奥陶系主要为海相碳酸盐岩, 缺失志留纪至早石炭世的沉积。石炭系及二叠系为海陆交互至陆相含煤碎屑岩建造, 中、新生界除下三叠统局部有海相夹层外, 均为陆相含煤碎屑岩建造、红色砂砾岩建造及黄土堆积 (张拴厚等, 2012)。

1.4 水文地质

研究区整体富水性弱, 除局部基岩山地外, 普遍为上覆黄土及沙层孔隙潜水与下伏碎屑岩孔隙、裂隙承压水的双层叠置。东部碎屑岩类孔隙裂隙水富水性不均, 富水性差; 西部构造条件优越, 且分布大面积白垩系厚层较疏松的砂岩, 富水性好。

1.5 地热地质

研究区整体地温梯度为 1.5~3.5℃/100m, 呈西部高、东部低规律。最低处位于延川县东南部, 地温梯度为 1.5~2.0℃/100m, 最高处位于定边县南部与吴起县西部地区, 地温梯度为 3.0~3.5℃/100m (周阳等, 2017)。

1.6 碳源特征

研究区作为我国重要的能源化工基地, 工业以煤炭、电力、化工为主导, 二氧化碳排放量较高,

可为碳封存场地提供大量便宜的二氧化碳。

2 深部咸水层二氧化碳地质封存主要储层特征

2.1 延安组

顶板埋深呈西高东低趋势。靖边-志丹大于 1000m，定边南部可达 1900m。横山-志丹为 500-1000m，神木-榆阳-安塞-宝塔西部及旬邑-彬州小于 500m。

地层厚度自西北至东南呈递减趋势，定边北部-吴起-横山-神木北部大于 250m，最大可达 336m，定边南部-志丹-榆阳北部为 200-250m，府谷-神木-榆阳-安塞-宝塔-甘泉-旬邑-彬州小于 150m。

中部地层温度由西向东逐渐降低，定边南部大于 50℃，冯地坑镇可达 70℃，靖边东部-志丹东部地区的中部地层温度低于二氧化碳临界态的 31.06℃。

中部地层压强自西北至东呈递减趋势，定边南部-吴起西部超过 15MPa，靖边-安塞-志丹降至 10MPa 以下，榆阳北部和富县南部-黄陵西部为 7.38-10MPa。

地层二氧化碳密度整体呈环状形分布，中间高、两侧低。定边南部-吴起一带大于 700kg/m³，定边红柳沟镇-樊学镇一带和志丹双河镇南二氧化碳密度低于 400kg/m³。

可埋藏储层厚度是埋深 800m 以下的延安组厚度，由西向东逐渐减小，在靖边-志丹以西的地区分布，吴起及定边部分区域大于 250m。

2.2 延长组

顶板埋深自西北至东呈递减趋势。定边整体大于 1500m，南部可达 2340m。靖边-志丹为 1000-1500m，榆阳北部-横山-安塞为 500-1000m，麟游-永寿-淳化-宜君-黄龙-宜川以北区域小于 500m。

地层厚度呈中部高、南北两侧逐渐降低趋势。富县-甘泉-志丹及定边南部大于 1200m，洛川-宝塔及吴起、靖边大部分地区为 1000-1200m，榆阳-横山-子长-延长-黄龙为 800-1000m，麟游-彬州-旬邑-宜君-黄龙-宜川-吴堡-佳县-神木小于 600m。

中部地层温度自西北至东呈递减趋势。定边-靖边-志丹大于 50℃，榆阳-横山-宝塔-甘泉-富县-洛川-黄陵为 31.06-60℃，其余地区低于 31.06℃。

中部地层压强自西北至东呈递减趋势。定边-吴起大于 20MPa，南部局地大于 25MPa。靖边西部-志丹为 15-20MPa，榆阳-横山-子长-宝塔-延长-甘泉-富县-黄陵北部为 7.38-15MPa，其余地区小于 7.38 MPa。

地层二氧化碳密度呈中部和东南部高、两侧低，局部地区偏低特征。靖边-吴起东部-志丹西部地区达 700-750kg/m³，其余地区为 600-700kg/m³，定边南部及安塞北部局地小于 550kg/m³。

可埋藏储层厚度呈西高东低特征。靖边-安塞-甘泉西部-富县西部等地大于 800m，定边南部-志丹西部大于 1200m。榆阳-横山-子长-宝塔-甘泉-富县为 400-800m，其余地区小于 400m。

2.3 纸坊组

顶板埋深自西北至东呈递减趋势。定边-吴起-志丹东部大于 2500m，榆阳-横山-子长-安塞-宝塔以西为 1500-2000m，榆阳东部-子长-宝塔-洛川以东为 1000-1500m。

地层厚度呈中部高、南北两侧较低的特征。米脂-子洲-绥德-清涧-延安-富县-黄龙大于 500m，吴起-志丹及靖边-定边、神木-榆阳为 300-400m，其他区域为 100-300m。

中部地层温度自西北至东呈递减趋势，定边南部-吴起可达 100℃以上，定边北部-吴起北部为 80-100℃，靖边-延安-甘泉一带为 60-80℃，神木-榆阳-清涧-延长-黄陵-旬邑一线为 31.06-60℃，该线以东低于 31.06℃。

中部地层压强自西至东呈递减趋势，定边南部-吴起超过 30MPa，靖边-延安-甘泉降至 20-30MPa，神木-米脂-清涧-延川-黄陵为 7.38-20MPa。

地层二氧化碳密度中间高、两侧低特征。定边-志丹-横山-子长-富县-洛川达 700kg/m³ 以上，安塞化子坪镇、定边姬源镇和吴起铁边城镇一带低于 600kg/m³。

可埋藏储层厚度呈环状分布，洛川-富县东部区域可达 600m 以上，宝塔-甘泉-延长等地大于 500m，彬州-旬邑-宜君-黄龙-宜川西部-延川-米脂-神木西部大于 300m，其余地区小于 300m。

2.4 和尚沟及刘家沟组

顶板埋深自西北至东呈递减趋势。靖边-志丹东部地区大于 2500m，定边南部可达 3500m。榆阳-横山-子长-宝塔-甘泉-富县-洛川-黄陵为 2000-2500m，麟游-永寿北部-淳化-王益-黄龙-韩城以北为 1500-2000m。

地层厚度呈中部高、东西两侧较低的特征。神木-子洲-绥德-子长-清涧-延川-宜川-洛川-黄龙北部大于 400m，其中神木西部、子洲北部、延长及宜川西部的局部地区为 500-800m，黄陵及黄龙以北的其他地区大于 300m，黄陵及黄龙以南、麟游-淳化-王益-白水以北地区小于 300m。

中部地层温度自西至东呈递减趋势。定边-吴起西部地区大于 100℃，靖边-志丹为 80-100℃，榆阳-横山-宝塔-甘泉-富县-洛川-黄陵为 60-80℃，神木-佳县-清涧-延川-宜川-黄龙-宜君-旬邑为 31.06-60℃，其余地区低于 31.06℃。

中部地层压强自西至东呈递减趋势。靖边西部-志丹东部大于 30MPa，横山-安塞-志丹-宝塔-甘泉-富县-

洛川为 20-30MPa, 彬州-旬邑-宜君-黄龙-韩城以北的大部分地区为 7.38-20MPa, 府谷、吴堡、麟游-永寿-淳化-王益-印台小于 7.38 MPa。

地层二氧化碳密度呈中部高、西部及东北低的特征。靖边-横山-子洲西南部-绥德-子长-清涧-延川-延长-甘泉-宜川-富县-洛川-黄陵-黄龙大于 700kg/m^3 , 其中延川至延长西部地区大于 750kg/m^3 , 安塞北部、吴起西部低于 600kg/m^3 。

可埋藏储层厚度呈东高西低的特征。神木-横山-子洲-绥德-子长-清涧-安塞-延川-宜川-洛川-黄龙北部地区大于 400m, 其中神木西部、子洲北部、延长、宜川西部等地大于 500m, 彬州-旬邑-宜君等地小于 300m。

2.5 孙家沟及石盒子组

顶板埋深自西北至东呈递减趋势。定边-志丹东部大于 3000m, 定边南部可达 3900m。榆阳-横山-子长-宝塔-甘泉-富县-洛川至黄陵北部地区为 2000-3000m, 神木-米脂-子洲-绥德-清涧-延川-宜川-黄龙-宜君-旬邑-彬州为 1000-2000m, 府谷-佳县-吴堡及韩城-白水-印台-淳化-永寿小于 1000m。

地层厚度呈北高南低的特征。黄陵-黄龙-韩城以北的大部分地区大于 500m, 其中府谷北部、榆阳南部、吴堡-清涧-延川、宝塔-甘泉-宜川-延长等地大于 600m, 麟游-永寿-淳化-王益-印台小于 400m。

中部地层温度自西北至东南呈递减趋势。定边-吴起-志丹南部地区为 100-140°C, 其中定边南部局部地区达 140°C 以上, 榆阳-子洲-子长-宝塔-延长-甘泉-富县-洛川-黄陵为 60-100°C, 神木-佳县-清涧-延川-宜川-黄龙-宜君-旬邑为 31.06-60°C, 其余地区低于 31.06°C。

中部地层压强自西至东呈递减趋势。靖边-志丹-宝塔东部大于 30MPa, 榆阳-子洲-子长-延长-甘泉-富县-洛川-黄陵为 20-30MPa, 彬州-旬邑-宜君-黄龙-韩城以北的陕北大部分地区为 7.38-20MPa, 府谷、麟游-永寿-淳化-王益-印台等地小于 7.38 MPa。

地层二氧化碳密度呈中部高、西部及东北低的特征。靖边-横山-子洲-绥德-子长-清涧-延川-延长-甘泉-宜川-富县-洛川-黄陵-黄龙大于 700kg/m^3 , 其中延川-延长西部地区大于 750kg/m^3 , 安塞北部、吴起西部低于 650kg/m^3 。

可埋藏储层厚度呈环状分布, 最大地区在神木北部、榆阳南部、绥德-吴堡-清涧、宝塔-延长-宜川-甘泉等地, 可埋藏储层厚度达 600m 以上。黄陵-黄龙-韩城以北的陕北大部分地区大于 500m, 佳县以北的沿黄地

区、定边西南部、彬州-长武-旬邑等地小于 500m。

2.6 马家沟组

顶板埋深自西至东呈递减趋势。横山-安塞-宝塔-富县-黄陵西北大于 3000m, 定边南部达 4498m, 神木-米脂-绥德-清涧-延川-延长-宜川-黄龙-宜君为 2000-3000m, 府谷西部、吴堡西部、彬州-旬邑-王益北部-白水-韩城为 1000-2000m, 府谷东部、麟游-永寿-淳化-王益小于 1000m。

地层厚度呈中东部高, 北部、西部、南部均较低的特征。佳县-米脂-子洲-绥德-子长-清涧-延川-延长-宝塔大于 600m, 米脂东部达 725m, 横山-靖边-志丹-甘泉-宜川为 500-600m, 富县及宜川以北的陕北其他地区为 400-500m, 黄陵-洛川-黄龙以南、麟游-永寿-淳化-王益以北地区小于 400m。

中部地层温度自西至东呈递减趋势。定边南部、吴起西部地区达 140°C 以上, 靖边-安塞-富县西北地区为 100-140°C, 陕北其余大部分地区中部地温 60-100°C, 府谷、吴堡、彬州-旬邑-王益-白水北部为 31.06-60°C, 其余地区低于 31.06°C。

中部地层压强自西至东呈递减趋势。榆阳-横山-子长-宝塔-甘泉-富县以西大于 30MPa, 神木-佳县-米脂-子洲-绥德-清涧-延川-延长-宜川-黄龙-宜君为 20-30MPa, 彬州-旬邑-王益-白水北部地区为 7.38-20MPa, 府谷、吴堡、麟游-永寿-淳化-王益-印台等地小于 7.38 MPa。

地层二氧化碳密度呈中部高、西部及东北地低的特征。延川南部与延长北部地区大于 750kg/m^3 , 府谷东北部、榆阳-横山-靖边-子洲-绥德-清涧-甘泉-宜川-洛川-黄陵-黄龙为 $700-750\text{kg/m}^3$, 榆阳-神木、定边-吴起、安塞、彬州-旬邑为 $650-700\text{kg/m}^3$, 定边南部、安塞北部的局部地区低于 650kg/m^3 。

可埋藏储层厚度呈中东部高, 北部、西部、南部均较低的特征, 佳县-米脂-子洲-绥德-子长-清涧-延川-延长-宝塔达 700m 以上, 横山-靖边-志丹-甘泉-宜川为 600-700m, 富县及宜川以北的陕北其他地区为 500-600m, 黄陵-洛川-黄龙以南、麟游-永寿-淳化-王益以北为 400-500m。

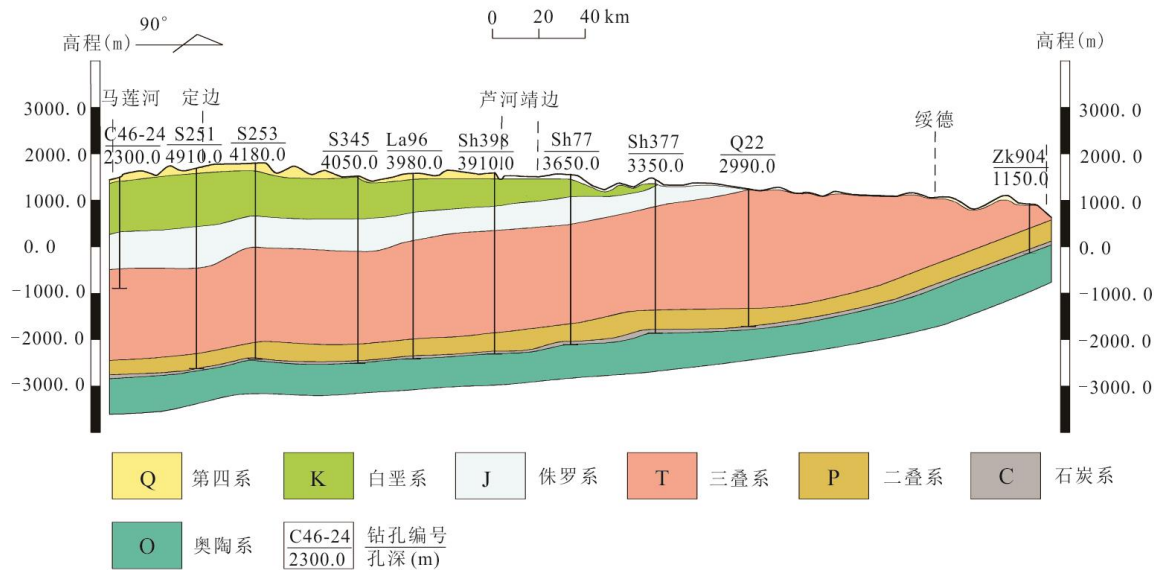


图 1 典型地层剖面图

Fig.1 Typical stratigraphic section diagram

3 潜力评价

3.1 评价方法

预测地质潜力计算按照《咸水层 CO₂ 地质封存潜力评价技术指南》（DZ/T 0474 2024）中容积法计算，公式如下。

$$P=A \cdot h \cdot \varphi \cdot \rho_{CO_2} \cdot E_{geo} \quad (式 1)$$

式中，P 为地质潜力，单位 kg，A 为咸水层储层面积，单位 km²；h 为咸水层储层厚度，单位 m；φ 为咸水层储层孔隙度，单位%；ρ_{CO₂} 为咸水层储层中 CO₂ 密度，单位 kg/m³，咸水层储层中二氧化碳的密度 pcz 是温度和压力的函数；E_{geo} 为地质系数，量纲为 1。

$$E_{geo}=EA/A \cdot Eh/hg \cdot E/m \quad (式 2)$$

式中，EA/A 为咸水层储层面积有效系数，为能够有效适宜二氧化碳封存的储层面积与总储层面积的比值；Eh/hg 为咸水层储层厚度有效系数，为能够有效适宜二氧化碳封存的储层厚度与总储层厚度的比值；E/m 为咸水层储层孔隙度有效系数，为能够有效适宜二氧化碳封存、互联互通的孔隙度与总孔隙度的比值。

预测技术容量利用预测地质潜力与驱替系数 E_{sweep} 的乘积计算获得，公式如下，E_{sweep} 取值参见表 1。

$$C_{tech}=P \cdot E_{sweep} \quad (式 3)$$

式中：C_{tech} 为预测技术容量，单位 kg；P 为预测地质潜力，单位 kg；E_{sweep} 为驱替系数，量纲为一。

驱替系数 E_{sweep} 是波及效率 E_v 和驱替效率 E_a 的乘积，储层物性、水化学、压力、温度、相对渗透率等因素均会影响驱替系数 E_{sweep} 的取值，公式如下。

$$E_{sweep}=E_v \cdot E_a \quad (式 4)$$

式中：E_v 为波及效率，是由于二氧化碳与地层水之间的密度差异，有效厚度范围内分布二氧化碳的储层体积占储层总体积的比例；E_a 为驱替效率，是由于原位流体不流动导致的储层中不可封存二氧化碳的孔隙空间占比。

注：驱替系数 E_{sweep} 取值可参照表，但实际取值范围会随地质条件与注入工艺发生变化，宜分别针对 E_v 和 E_a 开展补充室内实验、统计方法、数值模拟等确定，进而获取更可信的技术容量。

表 1 E_{sweep} 取值推荐

Tab 1 Recommended E_{sweep} Values

岩性	E _{sweep} (%)		
	P ₁₀	P ₅₀	P ₉₀
碎屑岩	7.4	14	24
白云岩	16	21	26
灰岩	10	15	21

注 1: P₁₀、P₅₀ 和 P₉₀。为参考美国能源部提出的基于蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法的置信度，P 对应值为驱替系数

注 2: 利用 P₁₀ 对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是最小值，利用 P₉₀ 对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是最最大值，利用 P₅₀ 对应 E_{sweep} 取值计算获得的技术容量可认为是平均期望值。

3.2 参数选取

研究区地质分层较多，各地层与碳封存相关的有效储层系数、孔隙度等资料较少，本文采用收集资料、样品测试、数理统计等多种方法取得相关参数（表 2）。

3.3 潜力结果

研究区咸水层二氧化碳封存预测地质潜力为1210.23 亿吨，预测技术容量 170.86 亿吨，各储层潜力论述如下。

3.3.1 延安组

延安组预测地质潜力约 42.10 亿吨，预测技术容量约 5.89 亿吨。预测地质潜力大于 30 万 t/km² 区域分布在定边东部、吴起东部及其北部的局部地区，面积 1622.25km²；预测地质潜力 25 万-30 万 t/km² 区域分布在定边及其东部地区、吴起及其南北两部等地，面积 5335km²；预测地质潜力小于 25 万 t/km² 区域分布在榆阳西北、志丹及其北部、吴起西部、定边西部、靖边北及西部地区，面积 12379.5km²。

3.3.2 延长组

延长组预测地质潜力约 341.56 亿吨，预测技术容量为 47.82 亿吨。预测地质潜力大于 90 万 t/km² 区域分布在靖边西部及北部、吴起西部及东部、志丹西部及北部、横山南部、富县西部地区，面积 9338.5km²；预测地质潜力 60 万-90 万 t/km² 区域分布在定边-吴起-志丹周边、榆阳西部、子长西部等地，面积 23666.75km²；预测地质潜力 30 万-60 万 t/km² 区域分布在榆阳-横山-安塞东部、吴起西南部、宝塔及其南部、甘泉-富县-洛川等地，面积 11420.5km²；预测地质潜力小于 30 万 t/km² 区域分布在神木-米脂西部、子长-延长-黄陵-长武南部等地，面积 11760km²。

3.3.3 纸坊组

纸坊组预测地质潜力约 196.65 亿吨，预测技术容量约 27.53 亿吨。预测地质潜力大于 60 万 t/km² 区域分布在子洲-洛川-富县东部等地，面积 3575km²；预测地质潜力 40 万-60 万 t/km² 区域分布在子洲-志丹-黄陵北部等地，面积 8103.75km²；预测地质潜力 20 万-40 万 t/km² 区域分布在榆阳-横山-吴起-子长-延长西部、富县西部等地，面积 36427.25km²；预测地质潜力小于 20 万 t/km² 区域分布在神木-定边-志丹-长武、安塞-清涧-宜川-旬邑等地，面积 22840.75km²。

3.3.4 刘家沟及和尚沟组

刘家沟及和尚沟组预测地质潜力约 240.56 亿吨，预测技术容量约 33.68 亿吨。预测地质潜力大于 45 万 t/km² 区域分布在榆阳-子洲-绥德及洛川-宜川-富县等地，面积 12650.5km²；预测地质潜力 30 万-45 万 t/km² 区域分布在定边南部、靖边-志丹-横山-子长-绥德、黄

陵-甘泉等地，面积 25258km²；预测地质潜力 15 万-30 万 t/km² 区域分布在定边-吴起-志丹-安塞-宝塔-延川-延长及长武，面积 32191.25km²；封存潜力小于 15 万 t/km² 区域分布在彬州-旬邑-宜君等地，面积 6505.75km²。

3.3.5 孙家沟及石盒子组

孙家沟及石盒子组预测地质潜力约 246.85 亿吨，预测技术容量约 34.56 亿吨。预测地质潜力大于 30 万 t/km² 区域分布在神木西北部、榆阳-横山-子洲-绥德-米脂-清涧-延川-延长-甘泉-宜川等地，面积 36681.75km²；预测地质潜力 20 万-30 万 t/km² 区域分布在佳县及其西北部、定边-吴起-志丹-子长-富县-洛川-黄陵-黄龙等地，面积 36711.75km²；预测地质潜力 10 万-20 万 t/km² 区域分布在宜君西部、神木东部等地，面积 3588km²；预测地质潜力小于 10 万 t/km² 区域分布在长武-彬州-旬邑等地，面积 5983.75km²。

3.3.6 马家沟组

马家沟组预测地质潜力约 142.51 亿吨，预测技术容量约 21.38 亿吨。预测地质潜力大于 25 万 t/km² 区域分布在榆阳-横山-子洲西北部-佳县西部等地，面积 8749.75km²；预测地质潜力 20 万-25 万 t/km² 区域分布在榆阳-神木、佳县-绥德-清涧西部-延川-延长-宜川等地，面积 20134.75km²；预测地质潜力 15 万-20 万 t/km² 区域分布在神木-府谷、子长-宝塔-甘泉-富县-洛川-宜川西南等地，面积 22027.5km²；预测地质潜力小于 15 万 t/km² 区域分布在陕北地区西部，包括靖县-志丹-定边-吴起、黄陵-宜君-旬邑-彬州-长武等地，面积 40305.5km²。

3.3.7 综合评价

预测地质潜力大于 250 万 t/km² 区域主要呈点状零星分布于陕北中部及西部区域和关中高陵区，包括横山南部、志丹西部、富县东部等地，面积 1368km²；预测地质潜力 200 万-250 万 t/km² 区域分布在榆阳西部、靖边周边及其东部、吴起西部陕甘交接处、志丹北部、富县西部及北部、洛川北部等地，面积 12595.5km²；预测地质潜力 150 万-200 万 t/km² 区域分布在米脂-子洲西部、榆林-定边-吴起-志丹-甘泉-富县周边地区，面积 31843.5km²；预测地质潜力小于 150 万 t/km² 区域主要呈面状分布于陕北东部及南部区域，包括府谷-神木-佳县-吴堡-清涧-子长-延安-延川-延长-宜川-韩城西部-宜君-旬邑-长武-彬州-陇县东部、吴起西南部等地，面积 45659.5km²。

表 2 预测地质潜力计算参数表

Tab2 Table of Calculation Parameters for Predicting Geological Potential

地层参数	可储藏地层厚度（m）	有效厚度系数	孔隙度（%）	二氧化碳密度（kg/m ³ ）	地质系数
延安组	0-366.14	0.375	13.04-17.61	448.37-739.27	0.02688

延长组	0-1480.75	0.433	5.15-17.63	537.79-743.73	
二马营组	0-630.52	0.433	2.84-17.11	575.56-760.54	
刘家沟组-和尚沟组	0- 623.21	0.433	5.02-17.11	582.06-771.39	
孙家沟组-石盒子组	0-737.81	0.50	3.80-6.35	584.52-778.65	
马家沟组	0-660.71	0.60	2.21-7.89	586.74-784.13	0.01802

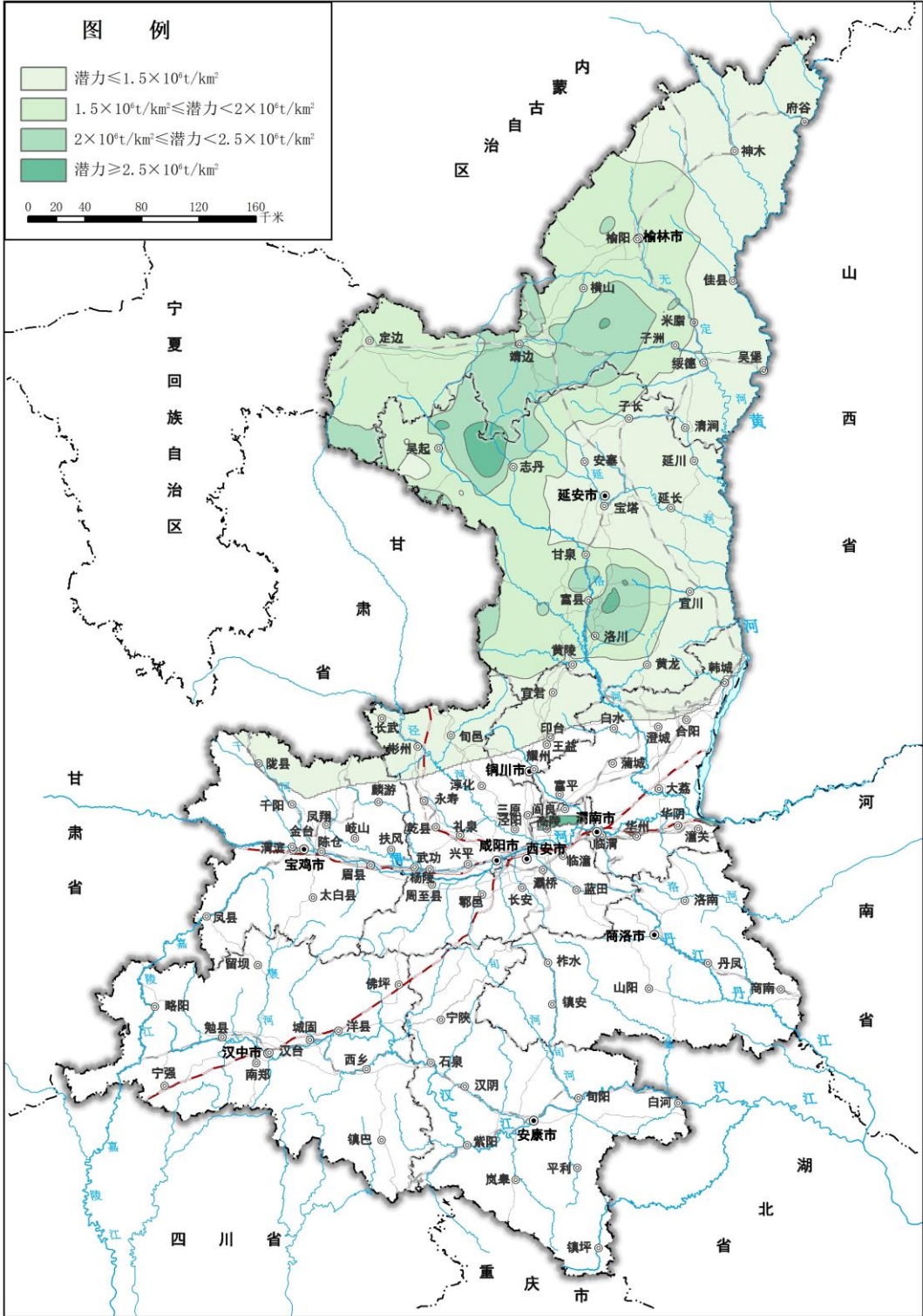


图 2 深部咸水层二氧化碳地质封存潜力分区图

Fig.2 Zoning Map of Carbon Dioxide Geological Storage Potential in Deep Saline Water Layers

表 3 深部咸水层二氧化碳地质封存潜力统计表

Tab3 Statistical Table of CO₂ Geological Sequestration Potential in Deep Saline Water Layers

地层	预测地质潜力 (亿吨)	预测技术容量 (亿吨)	面积 (km ²)	占全省面积 比重 (%)
延安组	42.10	5.89	19336.75	9.41
延长组	341.56	47.82	56185.75	27.33
纸坊组(二马营组)	196.65	27.53	70946.75	34.51
刘家沟及和尚沟组	240.56	33.68	76605.50	37.26
孙家沟及石盒子组	246.85	34.56	82965.25	40.35
马家沟组	142.51	21.38	91217.50	44.37
合计	1210.2	170.86		

4 适宜性评价

4.1 评价方法

采用层次分析法进行适宜性评价。基础指标包括储集条件、盖层封闭性、封存体地质稳定性,对应的二级指标为技术容量、盖层封闭能力、地震活动性,三级指标为单位面积预测技术容量、直接盖层厚度、地震动峰值加速度。单位面积预测技术容量综合考量了储层厚度、孔隙度、二氧化碳密度等地质要素。附加指标包括勘探成本,二级指标为资料富集程度,三级指标为钻孔资料密度、油气及煤区分布。

在一级评价体系的层次隶属关系的基础上,采用1-9标度法,对目标层下的中间属性层(技术容量、盖层岩石封闭能力、地震活动性、地质研究程度)、地质研究程度中(钻孔资料密度、油气区煤区分布)的重要性进行两两比较,构成比较矩阵。通过计算调整,使比较矩阵的一致性比例小于0.1,保证判断矩阵一致性。

评价指标因子的类型及数据量纲均不同,不能直接进行比较运算。对于正向指标,归一化采用线性归一的方法;对于负向指标,归一化采用先求倒数,再线性归一的方法。

4.2 评价结果

4.2.1 延安组

适宜区分布在定边西部、吴起及其西部地区,面积6752.50km²;较适宜区分布在定边及其南部地区、志丹、靖边等地,面积10205.00km²;一般适宜区分布在榆阳西北部、志丹东部地区,面积2379.25km²。

4.2.2 延长组

适宜区分布在定边南部、志丹西北部以及黄陵西部等地区,面积6131.00km²;较适宜区分布在榆阳-横山-安塞-富县-黄陵以西大部分地区,面积29042.50km²;一般适宜区分布在榆阳、子洲、延长、甘泉等地,面积

21012.25km²。

4.2.3 纸坊组

适宜区分布在子洲北部、富县-洛川-宜川等地,面积4084.75km²;较适宜区分布在横山-米脂-绥德-延长-甘泉-黄陵、志丹西部及安塞北部的局部地区,面积17634.75km²;一般适宜区分布在神木-米脂-清涧-延川-宜川-黄龙-宜君-旬邑-彬州以西及以北的除适宜区和较适宜区以外的地区,面积49227.25km²。

4.2.4 刘家沟及和尚沟组

适宜区分布在子洲北部、洛川东北部等地,面积3771.00km²;较适宜区呈面状分布在两处区域,一是延长-甘泉-洛川-黄陵-宜川,二是榆阳-横山-靖边-志丹北部-子长-绥德等地,面积31114.50km²;一般适宜区分布在神木-佳县一带、榆阳区西北部、定边-吴起、清涧-延川-宝塔-甘泉西部-富县西部-黄陵西部-宜君-旬邑-长武等地,面积41720.00km²。

4.2.5 孙家沟及石盒子组

适宜区在陕北大部分地区分布,包括定边东部-吴起东部-甘泉-富县-黄陵等地及其以东的地区,面积59726.50km²;较适宜区呈带状分布在东西两侧区域,一是神木-佳县、二是沿着甘陕交界呈带状分布区域,面积15838.00km²;一般适宜区分布在长武-彬州-旬邑-宜君南部等地区,面积7400.00km²。

4.2.6 马家沟组

适宜区分布在榆阳-横山-子洲-绥德-佳县-米脂及延川-延长等地,面积26845.50km²;较适宜区分布在神木-府谷、靖边-志丹-安塞-宝塔-子长-甘泉-富县-洛川-宜川等地,面积37663.25km²;一般适宜区分布在定边-吴起西部、黄陵-宜君-旬邑-彬州-长武等地,面积26708.75km²。

表 4 二氧化碳地质封存适宜区统计表

Tab 4 Statistical Table of Suitable Areas for Geologic Carbon Dioxide Storage

地层	适宜性	面积 (km ²)	比重 (%)
延安组	一般适宜	2379.25	12.30
	较适宜	10205.00	52.78
	适宜	6752.50	34.92
延长组	一般适宜	21012.25	37.40
	较适宜	29042.50	51.69
	适宜	6131.00	10.91
纸坊组	一般适宜	49227.25	69.39
	较适宜	17634.75	24.86
	适宜	4084.75	5.76
刘家沟及和尚沟组	一般适宜	41720.00	54.46
	较适宜	31114.50	40.62
	适宜	3771.00	4.92
孙家沟及石盒	一般适宜	7400.75	8.92

子组	较适宜	15838.00	19.09
	适宜	59726.50	71.99
马家沟组	一般适宜	26708.75	29.28
	较适宜	37663.25	41.29
	适宜	26845.50	29.43

4.4.9 综合评价

陕西省咸水层二氧化碳地质封存适宜性由各地层适宜性叠加得到。适宜区主要分布于陕北中部及西部区域,包括靖边-吴起-志丹-米脂-子洲西部、富县北部及东部等地,面积 9909.00km²;较适宜区主要分布在榆林-靖边-定边-吴起西部-志丹东部-甘泉-富县-黄陵-洛川-宜川西部-延安-延长-延川-清涧-绥德,面积 55995.75km²;一般适宜区主要分布于陕北东部及南部区域,包括府谷-神木-佳县-吴堡-宜川东部-宜君-旬邑-长武-彬州-陇县东部等地,面积 25561.75km²。上述区域以外地区为不适宜区。

表 5 研究区二氧化碳封存适宜区统计表

Tab 5 Statistical Table of Suitable Areas for Carbon Dioxide Storage in the research area

适宜性	面积 (km ²)	占比 (%)	占全省比重 (%)	分布范围
一般适宜	25561.75	27.95	12.43	陕北东部及南部区域,包括府谷-神木-佳县-吴堡-宜川东部-宜君-旬邑-长武-彬州-陇县东部等地
较适宜	55995.75	61.22	27.24	榆林-靖边-定边-吴起西部-志丹东部-甘泉-富县-黄陵-洛川-宜川西部-延安-延长-延川-清涧-绥德周边
适宜	9909.00	10.83	4.82	陕北中部及西部区域,包括靖边-吴起-志丹周边、米脂-子洲西部、富县北部及东部等地
合计	91466.50	100	44.49	

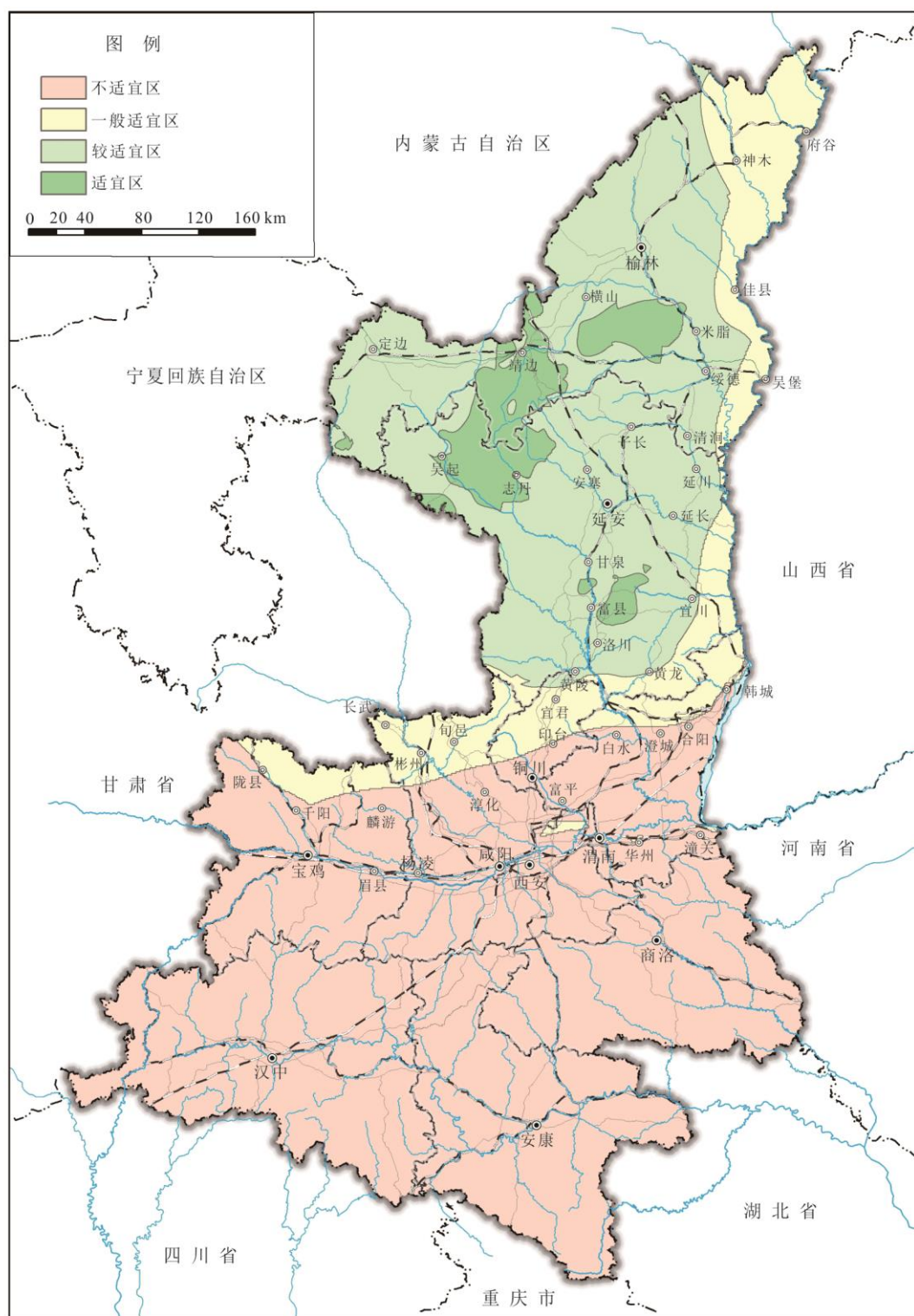


图 3 深部咸水层二氧化碳地质封存适宜性分布区图

Fig.3 Distribution map of suitability for carbon dioxide geological storage in deep saline layers

5 靶区选取

5.1 选取原则

依据二氧化碳地质封存潜力与适宜性评价结果，结

合碳源规模与经济效益圈定靶区。

靶区圈定原则是综合考虑经济性及地质条件，兼顾低风险影响的原则，原则如下：

经济条件：本次评价认为距离碳源距离小于 20km

的地区不具备经济效益，在这个范围内兼顾碳源规模，碳源分布约密集、规模越大经济效益越好。

地质条件：地质条件应考虑地质封存潜力、盖层稳定性等因素，即适宜性分区可充分表征地质条件。

低风险影响：考虑可能存在的二氧化碳泄露风险，靶区圈定应避开人口密集城市，降低风险带来的影响。

5.2 评价指标因子的选取及评价体系建立

二氧化碳地质封存靶区评价体系层次结构模型由三层构成，从顶层至底层分别由系统目标层、中间属性指标层和基础要素指标层 3 级层次结构组成。系统目标层即二氧化碳地质封存的靶区得分，中间属性指标层即经济条件和地质条件，基础要素指标层由碳源密度和适宜性 2 个要素指标构成。

权重是表征下层子准则相对于上层某个准则作用大小的量化值，影响适宜性分区的准确性。本次工作评价指标较小，采用比较法获得权重。碳源密度权重为 0.4；适宜性权重为 0.6。

碳源密度和适宜性均为正向指标。碳源密度的散度较大采用 MSLarge 方法进行归一；适宜性采用线性归一的方法；目标层靶区也采用线性归一的方法进行，值大于 0.85 的认定为靶区栅格。

5.3 靶区选取

将碳源密度图与全省适宜性图叠加后归一化，得到

靶区分布栅格图。

考虑到低风险影响原则，在此基础上圈定靶区 5 处。分别为锦界靶区、金鸡滩靶区、芹河南靶区、杨家湾-天赐湾靶区、顺宁西靶区。

5 处靶区位于陕北榆林、延安地区，总面积 3548.93km²，预测地质潜力为 67.33 亿吨，预测技术容量为 9.5 亿吨。

表 6 靶区二氧化碳地质封存潜力

Tab6 Potential for geological storage of carbon dioxide in the target area

靶区名称	面积 (km²)	预测地质潜力 (亿吨)	预测技术容量 (亿吨)
锦界	706.88	10.21	2.32
金鸡滩	963.87	16.43	1.77
芹河南	637.94	12.48	2.56
杨家湾-天 赐湾	879.07	18.15	1.41
顺宁西	361.17	10.06	1.44
合计	3548.93	67.33	9.5

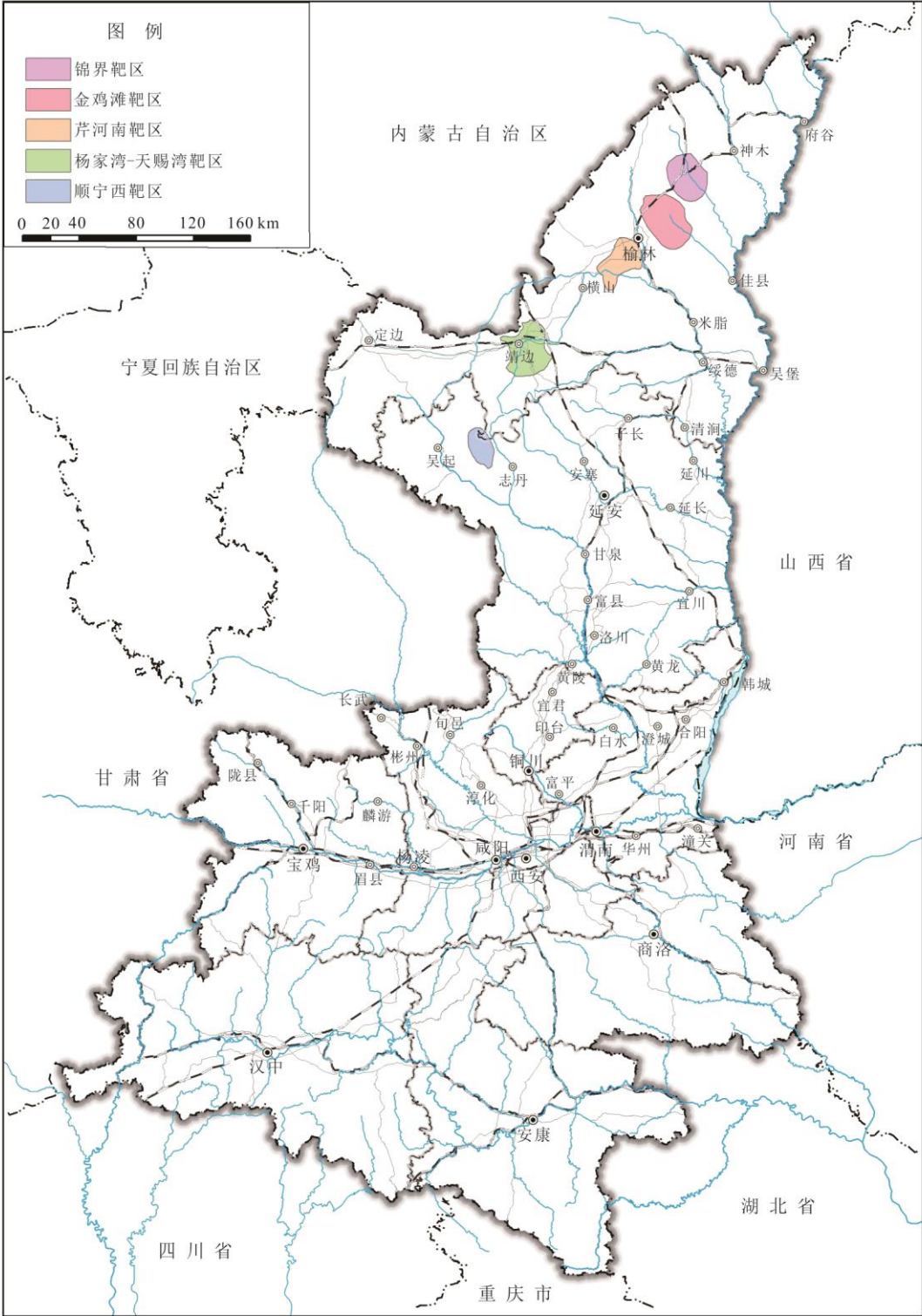


图 4 深部咸水层二氧化碳地质封存靶区分布图

Fig.4 Distribution Map of Carbon Dioxide Geological Storage Target Areas in Deep Saline Water Layers

6 结论及讨论

6.1 结论

(1) 研究区深部咸水层二氧化碳地质封存主要储

层包括：陕北地区的侏罗系延安组、三叠系延长组、纸坊组、和尚沟及刘家沟组、二叠系孙家沟及石盒子组、奥陶系马家沟组等 6 个，查明了每个储层的顶板埋深、储层厚度、储层有效厚度、地层温度、地层压强及二氧

化碳密度特征。

(2) 陕西省深部咸水层二氧化碳地质封存的预测地质潜力为 1210.23 亿吨, 预测技术容量 170.86 亿吨。其中, 延安组预测地质潜力为 42.10 亿吨, 预测技术容量 5.89 亿吨、延长组预测地质潜力为 341.56 亿吨, 预测技术容量 47.82 亿吨、纸坊组预测地质潜力为 196.65 亿吨, 预测技术容量 27.53 亿吨、和尚沟及刘家沟组预测地质潜力为 240.565 亿吨, 预测技术容量 33.68 亿吨、孙家沟及石盒子组预测地质潜力为 246.85 亿吨, 预测技术容量 34.56 亿吨、马家沟组预测地质潜力为 142.51 亿吨, 预测技术容量 21.38 亿吨。

(3) 以深部咸水层二氧化碳地质封存潜力为基础, 兼顾盖层封闭性和地质稳定性, 并考虑勘探成本, 划分了陕西省深部咸水层二氧化碳地质封存适宜区。将适宜性分区分为适宜区、较适宜区、一般适宜区及不适宜区等 4 类, 其中适宜区分布于陕北中部及西部区域, 包括靖边-吴起-志丹周边、米脂-子洲西部、富县北部及东部等地, 面积 9909 平方千米, 占全省面积 4.82%。

(4) 依据二氧化碳地质封存潜力与适宜性评价结果, 结合碳源规模及经济效益, 圈定了咸水层二氧化碳地质封存靶区 5 处, 分别为锦界靶区、金鸡滩靶区、芹河南靶区、杨家湾-天赐湾靶区、顺宁西靶区。靶区总面积为 3548.93 平方千米, 预测地质潜力为 67.33 亿吨, 预测技术容量 9.5 亿吨。

6.2 讨论

(1) 本文研究结果显示, 鄂尔多斯盆地(陕西段)深部咸水层二氧化碳地质封存潜力为 1210.23 亿吨。生态环境部《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》数据显示, 鄂尔多斯盆地全域深部咸水层的理论封存潜力为 3356 亿吨; 中国地质调查局“中国二氧化碳地质存储适宜性评价与示范工程”项目测算鄂尔多斯盆地深部咸水层的区域级地质理论封存潜力为 2469.57 亿吨。本文聚焦于鄂尔多斯盆地的陕西部分, 预测其地质封存潜力为 1210.23 亿吨。相较于前述针对“全域”或“区域级”的整体性评价, 通过三大维度提升精准度: 一是研究范围更聚焦, 仅针对陕西区域开展定向勘查, 规避了跨区域地质差异导致的估算偏差; 二是数据基础更详实, 整合了陕西段最新的钻井岩芯、咸水层孔隙度、盖层密封性等微观地质参数; 三是计算模型更适配, 针对陕西区域的构造特征优化了封存容量算法。综上, 本项目在数据针对性、参数精细度及模型适配性上均实现升级, 因此计算结果较整体性评价更精准, 其真实性与可靠性具有充分支撑。

(2) 研究区内适宜咸水层二氧化碳地质封存的区域富含丰富的煤炭、石油及天然气资源, 其中石炭系、

二叠系、三叠系、侏罗系是主要含煤地层, 三叠系和侏罗系是主要含油地层, 天然气藏主要赋存于奥陶系地层。在二氧化碳地质封存选址及工程实施过程中, 一是应开展精细地质勘查, 明确二者空间分布与相互影响, 科学规划封存与开采布局, 避免相互干扰。二是建立协同开发机制, 加强封存与开采过程中的监测与管理, 确保安全稳定。三是推动技术研发, 探索在封存场地开展资源开采的可行技术, 妥善处理二氧化碳地质封存场地与上覆矿产资源的关系, 最终实现资源利用与碳减排的双赢。

(3) 陕西省尤其是陕北地区, 是我国陆上最具二氧化碳地质封存潜力的区域之一, 潜力禀赋全国领先。同时, 全省能源化工企业众多, 碳源丰富, 二氧化碳封存场地与碳源分布空间匹配相对较好, 加之目前国家、省市出台的多项鼓励政策与企业碳封存技术累计, 具备规模化开发应用的各项条件。建议一是强化技术攻关与示范引领, 建设陕北产业化示范基地。二是完善政策支持与市场化机制, 提出创新财政与激励机制。三是开展全产业链延链补链强链行动, 打造产业集群与二氧化碳运输管网基础设施。四是完善监管与风险防控体系, 健全标准体系。五是加强区域协同与公众宣传, 强化人才队伍建设。

参考文献 References

- 范斌, 杨俊武, 张凌鹏, 等. 2024. 甘肃省二氧化碳储存地质条件及潜力分析[J]. 甘肃地质, 33(02): 69-76.
- FAN Bin, YANG Junwu, ZHANG Lingpeng. 2024. Geological conditions and potential analysis of carbon dioxide storage in Gansu Province[J]. *Geology of Gansu Province*, 33(02): 69-76. (in Chinese with English abstract)
- 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 2014. 中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程[M]. 北京: 地质出版社.
- Guo Jianqiang, Wen Dongguang, Zhang Senqi, etc. 2014. Evaluation and Demonstration Project of Carbon Dioxide Geological Storage Suitability in China [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 2014. 中国主要沉积盆地二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价图集[M]. 北京: 地质出版社.
- Guo Jianqiang, Wen Dongguang, Zhang Senqi, etc. 2014. Atlas of Geological Storage Potential and Suitability Evaluation of Carbon Dioxide in Major Sedimentary Basins in China [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 蒋恕, 张凯, 杜凤双, 等. 2023. 二氧化碳地质封存及提高油气和地热采收率技术进展与展望. 地球科学, 48(7): 2733-2749
- Jiang Shu, Zhang Kai, Du Fengshuang, etc. 2023. Progress and Prospects of CO₂ Storage and Enhanced Oil, Gas and Geothermal Recovery. *Earth*

Science, 48 (7): 2733-2749..(in Chinese with English abstract)

马永法,周学军,董俊领,等. 2022,黑龙江林甸地区深部咸水层 CO₂ 地质储存条件与潜力评估[J].水文地质工程地质, 49(06): 179-189.

Ma Yongfa, Zhou Xuejun, Dong Junling, etc.2022.Geological storage conditions and potential assessment of CO₂ in deep saline aquifers in Lindian area, Heilongjiang Province [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 49 (06): 179-189.(in Chinese with English abstract)

石树静,康志强,张勤军,等. 2025,广西合浦盆地咸水层二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价研究[J].华北地质, 48(01): 103-112

Shi Shujing, Kang Zhiqiang, Zhang Qinjun, etc.2025.Research on the Geological Storage Potential and Suitability Evaluation of Carbon Dioxide in Saline Water Layers of Hepu Basin, Guangxi [J]. *North China Geology*, 48 (01): 103-112.(in Chinese with English abstract)

宋一卓,徐永利,张建亮,等. 2025,河北平原深部咸水层二氧化碳地质封存适宜性评价[J].上海国土资源, 46(01): 144-151

Song Yizhuo, Xu Yongli, Zhang Jianliang, etc.2025.Suitability Evaluation of Carbon Dioxide Geological Storage in Deep Saline Water Layers of Hebei Plain [J]. *Shanghai Land and Resources*, 46 (01): 144-151.(in Chinese with English abstract)

王齐鑫,马传明,花勳健,等.2017.安徽省沉积盆地 CO₂ 地质储存适宜性评价[J].水文地质工程地质, 44(05): 121-130.

Wang Qixin, Ma Chuanming, Hua Mengjian, etc.2017.Suitability evaluation of CO₂ geological storage in sedimentary basins in Anhui Province [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 44 (05): 121-130.(in Chinese with English abstract)

韩芳林, 张拴厚, 崔建堂,等.2013. 陕西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.

Han Fanglin,Zhang Shuanhou,Cui Jiantang,etc.2013. Regional Geology of Shaanxi Province[M], Beijing: Geological Publishing House

张森琦,郭建强,李旭峰,等.2011.中国二氧化碳地质储存地质基础及场地地质评价[M].北京:地质出版社.

Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Li Xufeng, etc.2011.Geological Basis and Site Geological Evaluation of Carbon Dioxide Geological Storage in China [M]. Beijing: Geological Publishing House.

周蒂,夏菖佑,李鹏春,等. 2025.玄武岩二氧化碳矿化封存 (II): 广东省雷州半岛的封存条件、选址和挑战. 地球科学, 50(2): 569-584.

Zhou Di,Xia Changyou,Li Pengchun.etc.2025. CO₂ Mineralization Storage in Basalt (II): Storage Conditions, Site Selections and Challenges on Leizhou Peninsula, Guangdong Province, South China.*Earth Science*, 50(2): 569-584.(in Chinese with English abstract)

周阳,穆根胥,张卉,等. 2017.关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J].中国地质, 44(5): 1017-1026.

Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, etc.2017.Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin[J]. *Geology in*

China, 44(5): 1017-1026.(in Chinese with English abstract)