第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：王泽唐，耿济世，周阳，等. 区域地质约束下渭北深部煤层 CO_2 封存适宜性分区与潜力分析[J]. 西北地质，2026，59(5)：384−396. DOI：10.12401/j.nwg.2026056

Citation：WANG Zetang，GENG Jishi，ZHOU Yang，et al. Regional Geological Constraints on CO_2 Storage Suitability and Potential in Deep Coal Seams of the Weibei Coalfield[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：384−396. DOI：10.12401/j.nwg.2026056

区域地质约束下渭北深部煤层 CO_2 封存适宜性分区与潜力分析

王泽唐[1,2,3]，耿济世[1,2,3,*]，周阳[4]，吕鹏瑞[5]，孙强[1,2,3]，吴云[6]，黄震[7]

（1. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054；2. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室，陕西 西安 710054；3. 西安科技大学，煤炭绿色开采地质研究院，陕西 西安 710054；4. 陕西省水工环地质调查中心，陕西 西安 710068；5. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心，陕西 西安 710119；6. 中国矿业大学，深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，江苏 徐州 221116；7. 江西理工大学资源与环境工程学院，江西 赣州 341000）

摘 要：为明确渭北煤田深部煤层 CO_2 地质封存条件、区域差异及封存潜力，以埋深大于 1 000 m 且现阶段不具经济开采价值的煤层为研究对象，系统分析区域构造、含煤地层、煤层赋存、煤岩煤质及顶板封闭特征。文中构建由封存储层特性、上覆岩层性质、地质构造复杂程度、地震稳定性 4 类一级指标及 10 项二级指标组成的地质稳定性评价体系，采用层次分析法与隶属度综合评价法，对不同矿区的封存稳定性和目标煤层顶板封闭性进行分级评价，并估算深部煤层 CO_2 有效封存容量。结果表明：除澄合矿区百良预测区块外，其余评价区块均达到稳定等级，其中韩城矿区 3 个区块平均综合指数最高，为封存稳定性优选地段；3 号和 11 号煤层顶板封闭性最优，10 号煤层次之，5 号煤层相对较弱。笔者初步估算了渭北煤田深部煤层 CO_2 有效封存总容量，并基于评价结果将封存区域划分为适宜区、较适宜区和不适宜区，明确了各区域的容量区间范围。研究结果表明，渭北煤田深部煤层总体具备较好的 CO_2 地质封存条件，可为潜在目标区优选及后续场地精细评价提供地质依据。

关键词：二氧化碳封存；渭北煤田；深部煤层；封存条件；潜力评价

中图分类号：P618.13；P66 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0384-13

Regional Geological Constraints on CO_2 Storage Suitability and Potential in Deep Coal Seams of the Weibei Coalfield

WANG Zetang[1,2,3], GENG Jishi[1,2,3,*], ZHOU Yang[4], LYU Pengrui[5], SUN Qiang[1,2,3], WU Yun[6], HUANG Zhen[7]

（1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Geological Research Institute for Coal

收稿日期：2026-07-21；**修回日期**：2026-08-13；**责任编辑**：贾晓丹

基金项目：深地国家科技重大专项项目(2024ZD1004204)资助。

作者简介：王泽唐(1993−)，男，博士研究生，从事富油煤绿色开发、CO_2 地质封存。E−mail：wangzetang@stu.xust.edu.cn。

*通讯作者：耿济世(1991−)，男，博士，副教授，从事富油煤绿色开发、CO_2 地质封存等研究。E−mail：gengjishi@xust.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China；4. Shaanxi Hydrogeology, Engineering Environmental Geology Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China；5. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China；6. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China；7. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China）

Abstract：To clarify the geological conditions, spatial variability, and storage potential of CO_2 sequestration in deep coal seams of the Weibei Coalfield, this study focuses on coal seams buried at depths greater than 1,000 m that are currently uneconomic to mine. The regional tectonic setting, coal-bearing strata, coal-seam occurrence, coal petrology and quality, and roof-sealing characteristics were systematically analyzed. A geological stability evaluation system comprising four primary criteria (storage-reservoir properties, overlying-strata characteristics, structural complexity, and seismic stability) and ten secondary indicators was established. The analytic hierarchy process and a membership-function-based comprehensive evaluation method were then applied to classify the storage stability of different mining areas and the roof-sealing performance of the target coal seams, and the effective CO_2 storage capacity of the deep coal seams was estimated. The results show that all evaluated blocks, except the Bailiang prospective block in the Chenghe mining area, fall within the stable category. The three evaluated blocks in the Hancheng mining area have the highest average comprehensive index and are therefore identified as priority areas in terms of storage stability. The roof-sealing performance is best for the No.3 and No.11 coal seams, followed by the No.10 coal seam, whereas the No.5 coal seam exhibits relatively weaker sealing performance. The total effective CO_2 storage capacity of the deep coal seams in the Weibei Coalfield was preliminarily estimated, and based on the evaluation results, the storage areas were classified into suitable, moderately suitable and unsuitable zones, with the capacity ranges for each zone specified. These results indicate that the deep coal seams of the Weibei Coalfield generally possess favorable geological conditions for CO_2 storage and provide a geological basis for selecting prospective target areas and conducting subsequent site-specific assessments.

Keywords：CO_2 storage；Weibei Coalfield；deep coal seams；storage conditions；potential evaluation

在全球气候变化和碳减排目标的推动下, 碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)已成为化石能源及难减排行业实现低碳转型的重要技术路径之一(Fathi et al., 2023; 桑树勋等, 2023; 肖富强等, 2024, 2026; Awan et al., 2025; 李鑫等, 2026)。CO_2 地质封存是 CCUS 技术链中实现 CO_2 长期隔离的关键环节, 其主要储集介质包括深部咸水层、枯竭油气藏和深部不可采煤层(王双明等, 2022; Luo et al., 2023; 祁生文等, 2023; 王国强等, 2023)。煤体通常对 CO_2 具有较强的竞争吸附能力, 在适宜的煤阶、温压和含水条件下, 其 CO_2 吸附容量可高于 CH_4, 并可通过竞争吸附置换煤层气, 形成 CO_2 封存与煤层气增产的多资源协同效应(Hadi et al., 2017; 董亮亮等, 2026; 王双明等, 2026)。此外, 中国煤层分布广泛、顶板封盖条件良好, 日益成为碳封存研究的重点领域之一(贾云中等, 2026)。

国内外已围绕深部煤层 CO_2 吸附机理、CO_2 强化煤层气开采、封存容量估算及场地适宜性评价开展了大量研究(刘延锋等, 2005; 郭建强等, 2014; 孙腾民等, 2021; Hosseinzadeh et al., 2024; 刘江峰等, 2026; 郗兆栋, 2026)。国内相关工作主要集中于鄂尔多斯、沁水、准噶尔及其他大型含煤盆地, 形成了基于煤炭资源量、等温吸附参数和封存效率系数的容量评价方法, 并逐步将储盖组合、断裂构造和地震稳定性等条件纳入场地筛选体系(张森琦等, 2011; 李海东等, 2026; 李鑫等, 2026; 熊宇灿等, 2026; 刘欣月等, 2026)。与盆地级评价通常侧重于封存容量、储层及盖层基本参数等宏观指标不同, 区域级评价往往需要进一步综合储层物性、盖层封闭性、构造稳定性和地震活动等要素, 开展更为精细的多因素耦合分析(CSLF, 2005; 张森琦等,

2011; 郭建强等, 2014; 刘亢, 2025)。对于渭北煤田, 不同矿区和不同煤层之间的封存地质条件尚缺少统一指标体系下的系统比较, 制约了潜在目标区和有利煤层的优选。

渭北煤田位于鄂尔多斯盆地南缘, 石炭系—二叠系含煤地层分布较广, 深部赋存有一定规模的现阶段不具经济开采价值的煤炭资源, 可为 CO_2 地质封存提供潜在储集空间(王双明, 1996; 伋雨松, 2023)。此外, 研究区构造和煤层赋存条件具有明显的区域差异, 东部断裂相对发育, 西部煤层厚度和层数有所减小, 不同矿区的储层条件、顶板组合及构造稳定性存在较强非均质性(王双明等, 2008; 来安安, 2014)。因此, 有必要从区域构造、煤层赋存、煤岩煤质和盖层封闭性等方面开展综合评价, 明确深部煤层 CO_2 封存条件的空间差异及其主要控制因素。

基于此, 笔者以渭北煤田埋深大于 1 000 m、现阶段不具经济开采价值的 3、5、10 和 11 号煤层为研究对象, 系统分析区域构造背景、含煤地层、煤层赋存、煤岩煤质及顶板封闭条件; 构建由储层、盖层、构造和地震因素组成的深部煤层 CO_2 封存地质稳定性评价指标体系, 采用层次分析法和隶属度综合评价方法, 对不同矿区及目标煤层进行分级评价。在此基础上, 划分 CO_2 封存适宜区并初步估算有效封存容量, 以期为渭北煤田深部煤层 CO_2 封存目标区优选和后续场地精细评价提供地质依据。

1 区域背景

1.1 区域构造背景与构造格架

研究区位于鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起带(图 1), 大地构造位置处于华北地块与秦岭造山带的过渡部位(冯许魁等, 2026)。区内总体表现为 NE 向展布、向 NW 缓倾的大型单斜构造, 深部地层产状较为平缓(孙学阳等, 2019)。经印支期、燕山期和喜马拉雅期构造运动的叠加改造, 研究区形成了东南部构造相对复杂、西北部相对稳定的区域构造格局(朱满怀, 2025)。区内断裂主要呈 NEE 向和近 EW 向展布, 其中韩城大断裂为区域性控盆边界断裂, 具有断距较大、延伸距离长和多期活动等特征, 对煤系地层东南部边界具有明显控制作用(成龙, 2013; 王超平, 2014)。研究区中北部深部区块断裂发育程度相对较低, 现今活动性总体较弱(图 2), 为深部煤层 CO_2 长期封存提供了较为有利的区域构造条件(岳正喜等, 2016; 楼伟昆, 2023)。因此, 研究区构造复杂程度的区域分异是深部煤层封存适宜性评价和目标区优选需要考虑的重要地质因素。

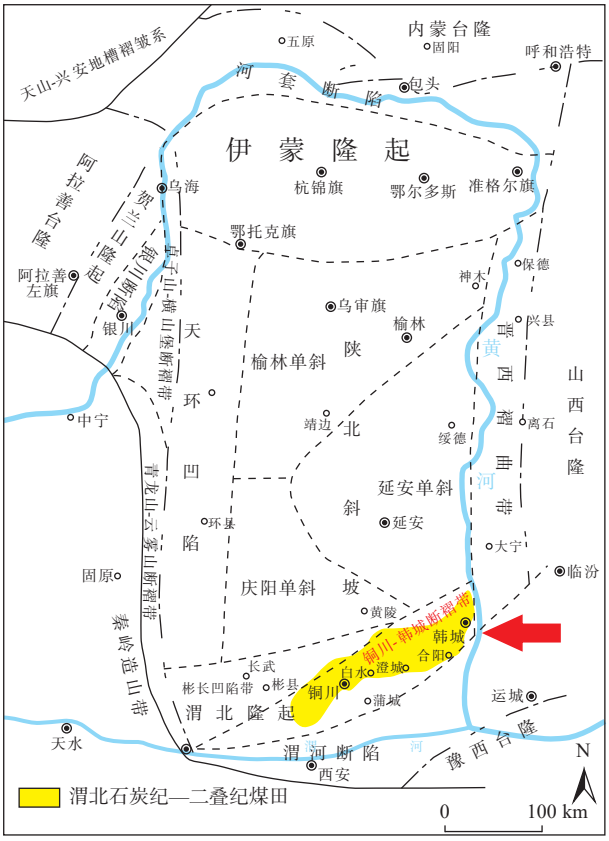


图1 鄂尔多斯盆地构造单元及研究区位置

Fig. 1 Tectonic units of the Ordos basin and location of the Weibei Carboniferous-Permian coalfield

地震活动及地震危险性是评价区域现今构造稳定性的重要指标。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)所示地震动参数分区, 并结合区域地震台网记录, 研究区地震活动和地震危险性具有一定的空间差异, 整体呈现东部相对较强、西部相对较弱的特征。其空间分布与区域主要断裂构造具有一定的对应关系, 表明不同区段的现今构造稳定性可能存在差异。笔者依据断裂发育程度和地震活动等特征对渭北煤田进行构造稳定性分区, 识别潜在风险区, 并在此基础上对 CO_2 封存潜力进行分析, 为优选长期安全稳定的封存适宜区提供依据。

1.2 含煤地层及沉积特征

研究区含煤地层主要包括上石炭统太原组和下二叠统山西组(图 3), 二者构成一套由海陆交互相向陆相过渡的含煤岩系, 是本次 CO_2 地质封存评价的主

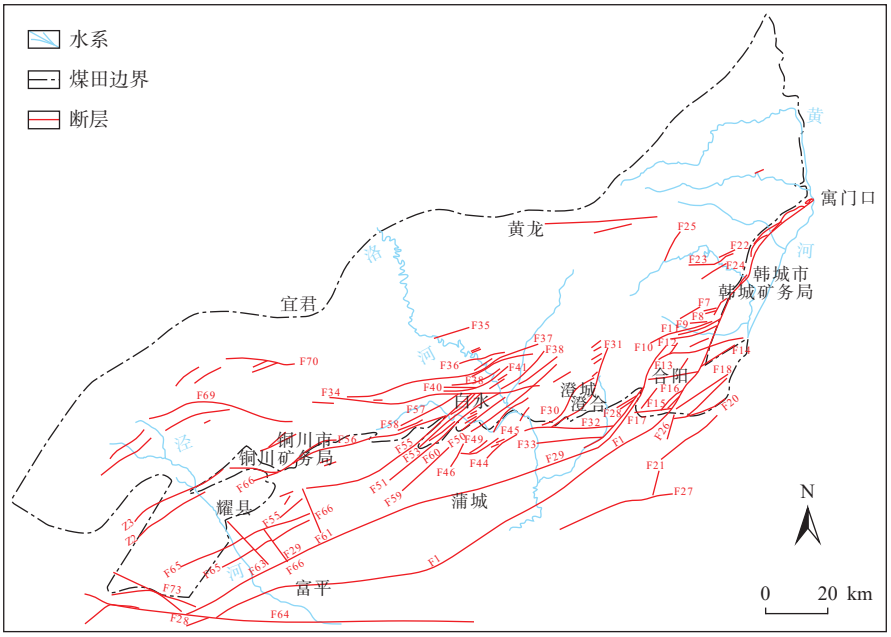


图2　渭北石炭纪—二叠纪煤田主要断层与煤田边界分布

Fig. 2　Major faults and coalfield boundary in the Weibei Carboniferous-Permian coalfield

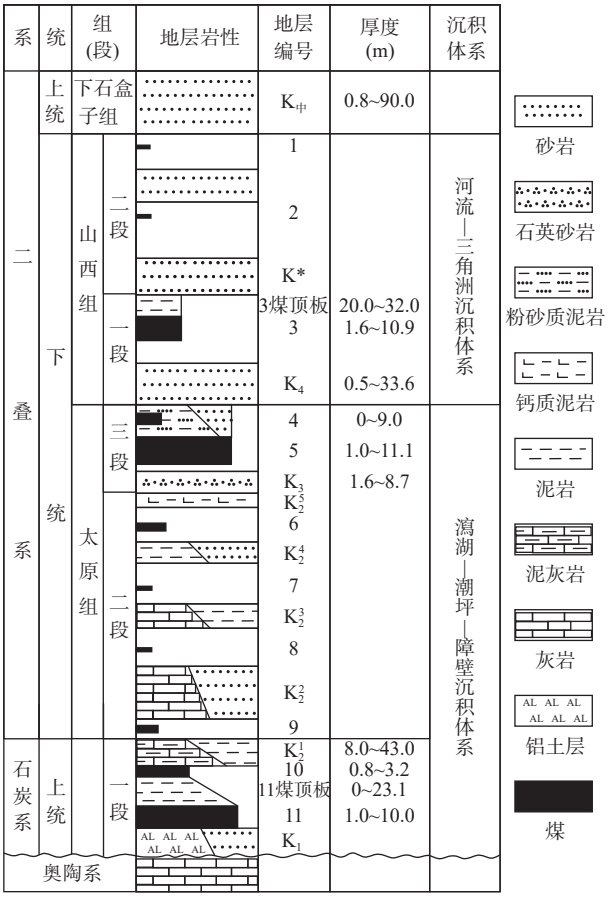


图3　渭北主要煤层顶板岩性及标志层(据李明培，2011; 王海涛，2014; 涂志民，2017 修改)

Fig. 3　Lithology of the main coal seam roofs and marker beds in Weibei coalfield

要目的层系。太原组底部发育铝土质泥岩，其上主要由海相灰岩、泥页岩及多层煤层组成，其中灰岩层位分布较为稳定，为区域地层对比的重要标志层；山西组主要形成于三角洲平原沉积环境，岩性以中–细粒砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层为主(来安安，2014; 伋雨松，2023; 徐子微，2025)。受沉积古地理格局和后期构造抬升剥蚀的共同影响，研究区含煤地层总厚度总体呈东厚西薄的空间展布特征，向西至铜川地区明显减薄。含煤地层厚度及其横向变化影响煤层资源规模和储集空间，是造成研究区 CO_2 封存潜力区域差异的重要地质因素之一。

2　目标煤层赋存与煤岩特征

文中对“深部不可采煤层”的界定参考中国深部煤炭开采对千米深井及埋深 1 000 m 以上煤体的研究划分(谢和平等，2015; 康红普等，2018)，并结合渭北煤田勘查开发现状，将埋深大于 1 000 m 作为深部不可采煤层区域筛选的初始深度阈值。文中所称的“不可采”是指在当前采矿技术、资源条件与经济性约束下暂不具开采价值，其可采性可随技术经济条件变化重新界定。

2.1　煤层空间展布

山西组和太原组共发育多套煤层，本次研究聚焦

于深部不可采煤层。研究区煤层层数自东向西减少，其中 3、5、10 和 11 号等主要煤层总体发育较稳定。在东部韩城矿区，3、5、11 号煤层稳定发育，累计平均厚度>5.5 m；至西部铜川矿区深部，主要保留 5、11 号煤层，累计厚约为 2.4 m（表 1）。煤层埋深受单斜构造控制，由东南部露头向 NW 向逐渐增大，部分深部区块达到 1 500 m 以深。

2.2 煤岩与煤质特征

渭北煤田研究区煤类以贫煤和无烟煤为主，整体煤化程度较高；较高煤阶通常伴随煤分子结构和微孔结构演化，理论上可能形成较好的 CO_2 吸附潜力（Day et al., 2008）。宏观煤岩以半亮型–半暗型煤为主，显微组分中镜质组占优势，镜质组富集在一定煤阶条件下可能有利于微孔发育及 CO_2 吸附（Czerw et al., 2021）。煤质分析显示，原煤灰分平均产率为 18.76%～23.55%，属低–中灰煤（GB/T 15224.1—2018；GB/T 5751—2009）；原煤水分平均值较低，约为 0.72%～1.54%。总体而言，上述煤岩煤质特征为研究区的 CO_2 吸附封存潜力提供了重要依据。

2.3 顶底板岩石力学与封闭特征

煤层顶板的封闭性能是控制 CO_2 垂向运移和防止其向上逸散的关键因素。本研究系统厘定了各主要煤层的顶底板岩性组合及其空间展布特征。11 号煤层顶板主要由太原组中上部厚层泥岩和灰岩组成，区域分布较为稳定，在岩层完整、裂缝及岩溶不发育的条件下具有较好的封闭潜力（岳正喜等，2016；涂志民，2017；李进强，2018；岳佳明，2024）。5 号煤层直接顶板以泥岩、砂质泥岩和粉砂岩为主，澄合矿区局部为砂岩顶板，其渗透率空间差异较大，整体具有一定的物理封闭能力（薛建闽，2013；王海涛，2014；李富宁，2019）。3 号煤层主要发育于韩城矿区，其顶板以泥岩和砂质泥岩为主，较低的渗透率有利于抑制 CO_2 垂向运移（涂志民，2017；刘明杰，2018；从常奎，2021）。不同煤层顶板封闭能力具有明显差异，为评价深部煤层 CO_2 封存适宜性及长期稳定性提供了地质基础。

3 深部煤层 CO_2 封存地质稳定性分析

3.1 稳定性评价因素选择及等级划分

煤层 CO_2 地质封存稳定性既取决于储层是否具备足够的容纳空间，也取决于盖层及地质体是否具备有效的封闭条件，以同时保障封存容量和 CO_2 长期滞留安全。据此构建由储层（D1）、盖层（D2）、构造（D3）、地震（D4）等 4 个一级指标及 10 个二级指标构成的评价体系（表 2）。指标选取遵循主控性、区域可比性及资料可获取性原则。各指标均划分为“稳定”“较稳定”“不稳定”3 个等级，并对研究区各矿区稳定性影响因素进行了量化（表 3、表 4）

储层指标（E1～E4）主要表征储集空间规模与连续性：埋深越大，上覆载荷越充足，盖层压实程度增高、突破压力增大，同时 CO_2 密度增大使得浮力减小，从而有利于长期安全封存（Singh et al., 2025；Jiang et al., 2026）；煤层过薄或层数单一则储集空间有限，难以保证足够且稳定的封存量；连续性越好，储层在区域上可提供的有效储集规模越可靠。盖层指标（E5～E7）侧重评价封闭的安全性：岩性越致密、厚度越大、组合越完整，越能有效阻滞 CO_2 向上迁移。构造指标（E8）表征断层对盖层完整性的潜在破坏，距离主要断层越远越安全。地震指标（E9～E10）评价地壳稳定性：E9 基于百年时间窗内历史地震记录的数量与空间聚

表 1 渭北煤田不同矿区深部煤层赋存特征

Tab. 1 Deep coal seam occurrence characteristics of different mining areas in the Weibei coalfield

矿区	韩城矿区			澄合矿区		蒲白矿区	铜川矿区		
预测区	林源	东景峰	深部	百良	深部	深部	北部	西部	深部
煤层厚度（m）	5.57	7.05	6.83	5.00	4.50	4.00	4.00	2.20	2.4
视密度（t/m^3）	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
深度（km）	1～1.5	1～1.5	1.5～2	1～1.5	1～2	1.5～2	1～1.5	1～1.5	1.5～2
预测资源量（万t）	168 407	244 635	468 147	37 128	592 589	334 976	56 762	191 454	234 678
煤层编号	3、11	3、5、11	3、5、10	4、5、6	5、11	5、10	5、11	11	5、11
煤种	无烟煤	无烟煤	无烟煤	贫煤	无烟煤	无烟煤	贫煤	贫煤	无烟煤

注：区域预测资源量仅用于区域封存潜力分析，不作为正式探明储量。数据源自煤炭资源潜力评估资料。

表 2　深部煤层封存 CO_2 地质稳定性影响因素量化分级

Tab. 2　Quantitative classification of factors affecting the geological stability of deep coal seam CO_2 sequestration

	指标	稳定	较稳定	不稳定
储层D1	埋深E1(m)	>1 500	1 000～1 500	<1 000
	平均厚度E2(m)	>4	2～4	<2
	数量E3	>2	2	1
	连续性E4	连续	较连续	不连续
盖层D2	顶板岩性E5	泥岩	砂质泥岩	砂岩
	顶板厚度E6(m)	>10	4～10	<4
	盖层组合E7	泥岩、砂质泥岩	砂质泥岩、粉砂岩等	砂岩、灰岩等
构造D3	距主要断裂距离E8(km)	>10	5～10	<5
地震D4	百年历史地震E9	少发区	较多发区	多发区
	地震烈度E10(度)	<Ⅴ	Ⅴ～Ⅷ	>Ⅷ

表 3　各矿区稳定性影响因素量化

Tab. 3　Quantification of stability factors in each mining area

指标		韩城矿区			澄合矿区		蒲白矿区	铜川矿区		
		林源	东景峰	深部	百良	深部	深部	北部	西部	深部
D1	E1(m)	1 000～1 500	1 000～1 500	>1 500	1 000～1 500	>1 500	>1 500	1 000～1 500	1 000～1 500	>1 500
	E2(m)	5.57	7.05	6.83	5.00	4.50	4.00	4.00	2.20	2.4
	E3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
	E4	连续								
D2	E7	稳定		较稳定	不稳定	稳定	较稳定	稳定		
D3	E8	>10			<5			>10		
D4	E9	少发区								
	E10	<Ⅴ								

表 4　各煤层稳定性影响因素量化

Tab. 4　Quantification of factors affecting coal seam stability

指标		煤层编号			
		3	5	10	11
D2	E5	泥岩、砂质泥岩	砂质泥岩、粉砂岩、局部砂岩	砂质泥岩	泥岩
	E6	>10	4～10	>10	>10

集程度, 相对划分为少发、较多发、多发区(不设绝对阈值); E10 参考 GB 18306—2015, 采用地震烈度表征地震动影响强弱, 二者分别从频率与强度维度互补评价。需要说明的是, 文中评价定位为煤田尺度的区域性初步适宜性筛选, 主要用于识别相对适宜区, 不能替代场地尺度的精细地质评价与注入安全性论证。

3.2　因素隶属度函数构建及权重计算

3.2.1　隶属度函数构建

为消除各评价指标之间量纲、数量级及定性/定量属性差异对综合评价结果的影响, 需将各指标的原始取值通过隶属度函数统一映射到 [0, 1] 区间内, 实现标准化处理。隶属度值越接近 1, 表明该指标对封存稳定性的贡献越大。

评价指标根据数据类型可分为连续定量指标、离散型指标和定性指标。对于连续定量指标, 根据其取值与稳定性的关系进一步分为正向指标和逆向指标, 其中 E1、E2、E6 和 E8 为正向指标, E10 为逆向指标; E3 为离散型指标, E4、E5、E7 和 E9 为定性指标。针对不同类型指标采用相应的标准化方法。

(1) 正向指标的隶属度函数(升半梯形函数): 对于定量正向指标(E1、E2、E6、E8), 采用升半梯形分布函数进行标准化处理(公式 1)。

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & x_{ij}\leqslant a\\ \dfrac{x_{ij}-a}{b-a} & a<x_{ij}<b\\ 1 & x_{ij}\geqslant b\end{cases} \tag{1}$$

式中：r_{ij}为第i个评价单元在第j个指标上的隶属度值；x_{ij}为第i个评价单元在第j个指标的实测值或代表值；a为下限阈值，当$x_{ij} \le a$时隶属度为 0；b为上限阈值，当$x_{ij} \ge b$时隶属度为 1。

对于离散型正向指标(E3)，采用阶梯函数(公式 2)进行计算。

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & x_{i3}=1\\ 0.5 & x_{i3}=2\\ 1 & x_{i3}>2\end{cases} \quad (2)$$

对于定性指标(E4、E5、E7、E9)，采用直接赋值法(公式 3)进行计算。

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & \text{属于“稳定”等级}\\ 0.5 & \text{属于“较稳定”等级}\\ 1 & \text{属于“不稳定”等级}\end{cases} \quad (3)$$

(2)逆向指标的隶属度函数：对于 E10(地震烈度)这一逆向定量指标，采用降半梯形分布函数(公式 4)进行计算。

$$r_{ij}=\begin{cases}1 & x_{i10}\le a\\ \frac{b-x_{i10}}{b-a} & a<x_{i10}<b\\ 0 & x_{i10}\ge b\end{cases} \quad (4)$$

式中：a为理想上限阈值，当$x_{i10} \le a$时隶属度为 1；b为不可接受阈值，当$x_{i10} \ge b$时隶属度为 0。

3.2.2 基于 AHP 的权重确定

按照 1～9 标度法，从层次结构模型的第 2 层(准则层 B)开始，对隶属于同一上层元素的各下层元素进行两两比较，构建判断矩阵。构建了影响 CO_2 封存稳定性因素类型 B 的比较判断矩阵(表 5)、因素类型储层 B1 下各指标的比较矩阵(表 6)、因素类型盖层 B2 下各指标的比较矩阵(表 7)、因素类型地震 B4 下各指标的比较矩阵(表 8)。其中，因素类型构造 B3 下仅有一个指标 E8，权重赋值为 1.0，即 WE8=1.0。

文中采用最大特征根法对判断矩阵进行一致性检验。准则层判断矩阵(表 5)中采用 λmax=4.031 0，CI=0.010 3，CR=0.011 5；储层判断矩阵(表 6)中采用 λmax=4.051 1，CI=0.017 0，CR=0.018 9；盖层判断矩阵(表 7)中采用 λmax=3.000 0，CI=0，CR=0。二阶判断矩阵(表 8)中采用 λmax=2.000 0、CI=0，无需进行 CR 检验，可视为完全一致。上述需检验矩阵的 CR 均小于 0.10，满足一致性要求。

表 5 影响 CO_2 封存稳定性因素类型 B 的比较判断矩阵

Tab. 5 Comparison judgment matrix of factors affecting the stability of CO2 storage, type B

因素	B1储层	B2盖层	B3构造	B4地震	权重
B1储层	1	1/3	1/2	2	0.160 1
B2盖层	3	1	2	4	0.467 3
B3构造	2	1/2	1	3	0.277 2
B4地震	1/2	1/4	1/3	1	0.095 4

表 6 因素类型储层 B1 下各指标的比较矩阵

Tab. 6 Comparison matrix of various indicators for factor type reservoir B1

B1	E1埋深	E2厚度	E3数量	E4连续性
E1埋深	1	3	5	4
E2厚度	1/3	1	3	2
E3数量	1/5	1/3	1	1/2
E4连续性	1/4	1/2	2	1

表 7 因素类型盖层 B2 下各指标的比较矩阵

Tab. 7 Comparison matrix of various indicators under factor type cover B2

B2	E5岩性	E6厚度	E7组合
E5岩性	1	1	2
E6厚度	1	1	2
E7组合	1/2	1/2	1

表 8 因素类型地震 B4 下各指标的比较矩阵

Tab. 8 Comparison matrix of indicators under factor type earthquake B4

B4	E9历史地震	E10地震烈度
E9历史地震	1	1/2
E10地震烈度	2	1

按准则层权重与二级指标局部权重相乘，得到 10 项二级指标的最终组合权重：E1=0.087 4、E2=0.037 2、E3=0.013 4、E4=0.022 0、E5=0.186 9、E6=0.186 9、E7=0.093 5、E8=0.277 2、E9=0.031 8、E10=0.063 6。

3.3 CO_2 封存稳定性评判

3.3.1 矿区稳定性评价

矿区评价以整体地质条件为对象，选取不受具体煤层变化影响的 8 项指标：E1(埋深)、E2(平均厚度)、E3(煤层数量)、E4(连续性)、E7(盖层组合)、E8(距主要断层距离)、E9(历史地震)和 E10(地震烈度)，并对上述指标的组合权重进行归一化处理。E5(顶板岩性)和 E6(顶板厚度)因随煤层而异，留待煤层评价中计算，暂不包含在矿区稳定性评价中。经计算得出影响矿区 CO_2 封存稳定性的各因素隶属度 r 与矿区综合

稳定性指数 S(表 9)。

依据综合指数将矿区封存稳定性划分为 3 个等级: S≥0.75 为稳定(Ⅰ级), 0.50≤S<0.75 为较稳定(Ⅱ级), S<0.50 为不稳定(Ⅲ级)。

评价结果表明, 除澄合矿区百良区块因紧邻韩城大断裂且盖层组合差而处于不稳定等级外, 其余各区块均属稳定等级。韩城矿区 3 个区块平均综合指数最高, 为封存稳定性最优地段; 铜川矿区深部、澄合深部亦表现良好。总体上, 研究区大部分深部煤层具备良好的区域稳定性条件。

表 9　各矿区 CO_2 封存稳定性综合结果

Tab. 9　Comprehensive evaluation results of CO_2 storage stability in each mining area

矿区	区块	r_{E1}	r_{E2}	r_{E3}	r_{E4}	r_{E7}	r_{E8}	r_{E9}	r_{E10}	S	等级
韩城	林源	0.643	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	Ⅰ
	东景峰	0.643	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	Ⅰ
	深部	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.93	Ⅰ
澄合	百良	0.643	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0	1.0	0.36	Ⅲ
	深部	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	Ⅰ
蒲白	深部	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.91	Ⅰ
铜川	北部	0.643	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.94	Ⅰ
	西部	0.643	0.10	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.89	Ⅰ
	深部	1.0	0.20	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.94	Ⅰ

3.3.2　煤层稳定性评价

煤层稳定性评价以研究区内主要煤层(3 号、5 号、10 号、11 号)为对象, 聚焦于决定单煤层顶板封闭能力的两个关键指标: E5(顶板岩性)和 E6(顶板厚度)。依据分级标准(表 2)和隶属度函数(公式 4), 计算各煤层的隶属度值及综合得分(表 10)。

表 10　各煤层 CO_2 封存稳定性综合评判结果

Tab. 10　Comprehensive assessment results of CO_2 storage stability in each coal seam

煤层	E5顶板岩性	r_{E5}	E6厚度(m)	r_{E6}	综合得分	等级
3号煤	泥岩、砂质泥岩	1.0	>10	1.0	1.00	Ⅰ
5号煤	砂质泥岩、粉砂岩、局部砂岩	0.5	4～10	0.5	0.50	Ⅱ
10号煤	砂质泥岩	0.5	>10	1.0	0.75	Ⅰ
11号煤	泥岩	1.0	>10	1.0	1.00	Ⅰ

评价结果表明, 在顶板岩性和厚度两个指标的共同约束下, 3 号和 11 号煤层综合得分最高, 顶板封闭条件最为有利; 10 号煤层表现出顶板岩性较好和顶板厚度较大的优势; 5 号煤层因顶板局部发育粉砂岩和砂岩, 且厚度优势不明显, 封闭条件虽然相对较弱但也达到了较稳定的级别。

4　封存潜力

4.1　计算公式

渭北煤田深部煤层埋深较大, 未采动煤炭资源分布广泛, 具备开展煤层 CO_2 封存潜力评价的基础条件。根据《中国二氧化碳地质封存选址指南研究》和“碳封存领导人论坛”等推荐的煤层 CO_2 封存潜力思路(Bachu et al., 2008; 中国 21 世纪议程管理中心, 2012; 孙腾民, 2021), 煤层 CO_2 理论封存量主要受煤炭资源量、单位质量煤炭 CO_2 吸附量、煤中灰分和水分以及 CO_2 密度控制, 按照公式(5)计算煤层 CO_2 有效封存量。

$$M_{CO2} = A \times h \times n_C \times G_C \times (1 - f_a - f_m) \times \rho_{CO2,std} \times R_E \times R_f \quad (5)$$

式中: M_{CO2}为 CO_2 有效封存量(t); $Q = A \times h \times n_C$ 为深部煤炭预测资源量(t), A为赋煤地区面积(m^2), h

为煤层累计厚度(m), n_C为煤的视密度(t/m^3); f_a和f_m分别为煤的灰分和水分质量分数; G_c为当前煤层压力下的 CH_4 吸附量(m^3/t), 按照 Langmuir 方程 $G_c = V_L \times P/(P+P_L)$计算, 其中 V_L和 P_L均为 CH_4 等温吸附参数, V_L为给定温度下煤层的最大 CH_4 吸附量(m^3/t), P_L为吸附量达到V_L/2时对应的压力(MPa), P为当前煤层中的气体压力(MPa); $\rho_{CO2,std}$为标准温压条件下的 CO_2 密度(t/m^3); R_E为 CO_2/CH_4 体积置换比; R_f为封存系数, 采用美国能源部在预测美国地质封存量时的推荐值。

4.2 封存适宜区和封存潜力结果

依据现场经验和相关文献确定渭北深部煤层 CO_2 有效封存量的计算参数(表 11), 并采用式(5)估算深部煤层 CO_2 有效封存量。在稳定性评价与封存潜力估算的结果基础上, 综合考虑煤层埋深、厚度及地质构造等条件, 将渭北煤田划分为 CO_2 封存适宜区、较适宜区、不适宜区 3 个等级(图 4)。渭北深部(>1 000 m)煤层 CO_2 有效封存量为 94.70～374.90 Mt, 其中 CO_2 封存适宜区有效封存量为 58.35～231.00 Mt, 较适宜区有效封存量为 36.35～143.90 Mt。

表 11 渭北深部煤层 CO_2 封存区主要参数

Tab. 11 Main parameters of the deep coal seam CO_2 storage area in Weibei

参数	适宜区	较适宜区	参数来源
深部煤炭预测资源量(万t)	1 084 300.40	675 372.29	
CH_4 Langmuir体积(m^3/t)	11.11～26.12		李建武等, 2001; 陈跟马等, 2008; 王双明, 2008; 王成, 2013a, 2013b; 涂志民, 2017; 邱勇凯, 2015; 张贝贝, 2023
CH_4 Langmuir压力(MPa)	1.68～5.38		
每百米压力梯度(MPa)	0.69～0.77		
灰分平均质量分数(%)	18.76～21.63		
水分平均质量分数(%)	0.74～1.60		
CO_2/CH_4体积置换比	2∶1		张志敏, 2013; 王晋等, 2015
封存系数	0.3		Bachu, 2008; Goodman, 2011; 钱静等, 2024

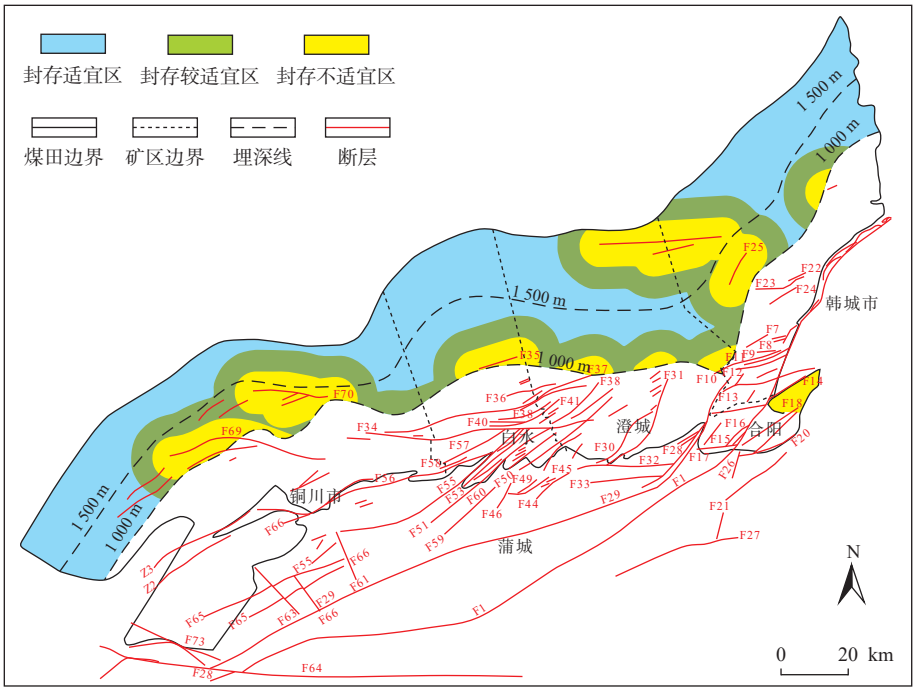


图4 渭北石炭纪—二叠纪煤田二氧化碳封存区划分

Fig. 4 Division of CO_2 storage areas in the Carboniferous-Permian coalfields of Weibei

5　结论

(1)渭北煤田石炭系—二叠系深部不可采煤层赋存稳定, 3、5、10、11 号煤层累计厚度为 2.40～7.05 m, 埋深普遍大于 1 000 m。区域构造呈“东南复杂、西北稳定”的格局, 断裂密度自韩城一带向蒲白、铜川深部显著降低, 地震活动呈“东强西弱”分异特征, 深部煤层具备 CO_2 封存所需的地质稳定性。

(2)构建了涵盖储层、盖层、构造、地震 4 类一级指标及 10 项二级指标的深部煤层 CO_2 封存地质稳定性评价体系, 采用层次分析法(AHP)与隶属度综合评价法对各矿区及煤层进行了封存稳定性分级评价。矿区尺度评价表明, 韩城矿区 3 个区块综合指数最高, 为封存稳定性最优地段; 煤层尺度评价表明, 3 号和 11 号煤层封闭稳定性最佳(Ⅰ级), 10 号煤层次之, 5 号煤层相对较弱(Ⅱ级)。

(3)确定了渭北煤田深部煤层 CO_2 有效封存量的计算方法及关键参数, 基于有效封存量模型估算了研究区深部煤层 CO_2 有效封存量, 并结合地质稳定性评价结果, 将渭北煤田深部煤层划分为 CO_2 封存适宜区、较适宜区和不适宜区。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈跟马, 何建华. 铜川焦坪矿区煤层气井下抽采及利用现状分析[J]. 陕西煤炭, 2008, (3): 13−15.

CHEN Genma, HE Jianhua. Analysis of the Current Situation of Underground Coalbed Methane Extraction and Utilization in Jiaoping Mining Area, Tongchuan[J]. Shaanxi Coal, 2008(3): 13−15.,

成龙. 渭北石炭—二叠纪煤田地质构造发育特征对地下水的控制作用 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.

CHENG Long. Weibei P-C Coalfield Geological Tectonic Development Control Characteristics of Groundwater[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.

从常奎. 王峰煤矿 3 号煤层顶板定向水力压裂裂缝扩展规律及其应用研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2021.

CONG Changkui. Research on the Propagation Law and Application of Hydraulic Fracturing Cracks in the Roof of No. 3 Coal Seam in Wangfeng Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.

董亮亮, 冯海洋, 祝效华, 等. 煤层气井注超临界二氧化碳与电加热复合传热特性研究[J]. 天然气工业, 2026, 46(6): 115−123.

DONG Liangliang, FENG Haiyang, ZHU Xiaohua, et al. Composite Heat Transfer Characteristics of Supercritical CO2 Injection and Electric Heating in Coalbed Methane Wells[J]. Natural Gas Industry, 2026, 46(6): 115−123.

冯许魁, 张斌, 李洪革, 等. 鄂尔多斯盆地南缘早古生代台缘地震地质特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2026, 2026,37(8): 1621−1630.

FENG Xukui, ZHANG Bin, LI Hongge, et al. Seismic Geological Characteristics and Exploration Potential of the Early Paleozoic Platform Margin in the Southern Margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2026, 2026,37(8): 1621−1630.

郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 中国 CO2 地质储存适宜性评价与示范工程 [M]. 北京: 地质出版社, 2014: 13−273.

伋雨松. 渭北石炭—二叠纪煤田煤层气富集规律及有利区预测 [D]. 西安: 西安科技大学, 2023.

JI Yusong. Coalbed Methane Accumulation Law and Prediction of Favorable Area in the Weibei Carboniferous-Permian Coalfield [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2023.

贾云中, 华豪, 葛兆龙, 等. 分布式光纤技术在深部煤层二氧化碳地质封存监测中的适配性及关键补位作用[J]. 煤炭学报, 2026, 51(7): 3878−3902.

JIA Yunzhong, HUA Hao, GE Zhaolong, et al. The Adaptability and Key Complementary Role of Distributed Optical Fiber Technology in the Monitoring of Deep Coal Seam Carbon Dioxide Geological Storage[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(7): 3878−3902.

康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789−1800.

KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for Strata Control and Intelligent Mining Technology in Deep Coal Mines with Depth More than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789−1800.

来安安. 渭北石炭—二叠纪煤田沉积特征与聚煤规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.

LAI An'an. Study on Sedimentary Characteristics and Coal Accumulation Law of the Carboniferous-Permian Coalfield in Weibei [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.

李富宁. 澄合矿区煤层带压开采评价中奥灰岩溶水位取值分析[A]. 陕西省煤炭学会, 重庆市煤炭学会, 内蒙古煤炭工业协会, 等. 煤炭绿色开发地质保障技术研究——陕西省煤炭学会学术年会 (2019) 暨第三届“绿色勘查科技论坛”

论文集 [C]. 北京: 应急管理出版社, 2019: 200−203.

李海东, 苗科, 尚福华, 等. 内蒙古煤层二氧化碳强化开采煤层气及地质封存潜力分析[J]. 西部探矿工程, 2026, 38(1): 38−42.

LI Haidong, MIAO Ke, SHANG Fuhua, et al. Analysis on Potential of CO2-Enhanced Coalbed Methane Recovery and Geological Storage in Coal Seams of Inner Mongolia[J]. West-China Exploration Engineering, 2026, 38(1): 38−42.

李建武, 张培河. 陕西省煤层气资源与勘探开发前景分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, (5): 30−32.

LI Jianwu, ZHANG Peihe. Coalbed Methane Resource and Development Prospect of Shaanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, (5): 30−32.

李进强. 韩城矿区 11 号煤层气储层物性及特征分析[J]. 山东煤炭科技, 2018(10): 87−89.

LI Jinqiang. Analysis of Physical Properties and Characteristics of No. 11 Coalbed Methane Reservoir in Hancheng Mining Area[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018(10): 87−89.

李明培, 李智学, 邵龙义, 等. 陕西省渭北煤田石炭—二叠系层序地层与聚煤作用研究[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(8): 43−48.

LI Mingpei, LI Zhixue, SHAO Longyi, et al. Permo-Carboniferous Sequence Stratigraphy and Coal Accumulation Studies in Weibei Coalfield, Shaanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(8): 43−48.

李鑫, 胡晨林, 桑树勋, 等. 新疆煤层二氧化碳封存利用研究进展及发展趋势[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2026, 45(3): 1018−1036.

LI Xin, HU Chenlin, SANG Shuxun, et al. Research Progress and Development Trends of CO2 Storage and Utilization in Coal in Xinjiang[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2026, 45(3): 1018−1036.

刘江峰, 刘书源, 张馨月, 等. 深部煤层 CO2 封存与煤层气强化开采研究进展及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 38−56.

LIU Jiangfeng, LIU Shuyuan, ZHANG Xinyue, et al. A Review of Research Progress and Future Prospects of CO2 Sequestration and Enhanced Coalbed Methane Recovery in Deep Coal Seams[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 38−56.

刘亢, 王自国, 蒋喆, 等. CO2 地质封存国内外相关标准研究进展[J]. 中国煤炭地质, 2025, 37(12): 38−44.

LIU Kang, WANG Ziguo, JIANG Zhe, et al. Research Progress on Domestic and International Standards Related to Carbon Dioxide Geological Storage[J]. Coal Geology of China, 2025, 37(12): 38−44.

刘明杰. 韩城矿区 3 号煤层物性特征研究[J]. 山东煤炭科技, 2018, 36(8): 145−147.

LIU Mingjie. Physical Characteristics of No. 3 Coal Seam in Hancheng Mining Area[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018, 36(8): 145−147.

刘欣月, 张军建, 杨斌, 等. 鲁西南地区深部煤层二氧化碳地质封存单元划分及封存潜力评价[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(4): 1423−1436.

LIU Xinyue, ZHANG Junjian, YANG Bin, et al. Division of Carbon Dioxide Geological Storage Units and Evaluation of Storage Potential in Deep Coal Seams in Southwest Shandong Province[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(4): 1423−1436.

刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO2 煤层储存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2947−2952.

LIU Yanfeng, LI Xiaochun, BAI Bing. Preliminary Estimation of CO2 Storage Capacity of Coalbeds in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2947−2952.

楼伟昆. 浅谈韩城矿区水文地质条件和煤矿水害[J]. 江西煤炭科技, 2023, (4): 120−125.

LOU Weikun. Discussion on Hydrogeological Conditions and Coal Mine Water Disasters in Hancheng Mining Area[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2023, (4): 120−125.

祁生文, 郑博文, 王赞, 等. 二氧化碳地质利用与封存场址的地质评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(9): 1937−1957.

QI Shengwen, ZHENG Bowen, WANG Zan, et al. Geological Evaluation for the Carbon Dioxide Geological Utilization and Storage (CGUS) Site: A Review[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(9): 1917−1936.

钱静, 易高峰, 周琦忠, 等. 三河尖关闭煤矿煤层 CO2 封存潜力研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 258−268.

QIAN Jing, YI Gaofeng, ZHOU Qizhong, et al. CO2 Storage Potential of Coal Seam in Sanhejian Closed Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 258−268.

邱勇凯. 渭北地区煤层气储层物性特征及控制机理 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2015.

QIU Yongkai. Coalbed Methane (CBM) Reservoir Characteristics and Control Mechanism in Weibei Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

桑树勋, 刘世奇, 朱前林, 等. CO2 地质封存潜力与能源资源协同的技术基础研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2700−2716.

SANG Shuxun, LIU Shiqi, ZHU Qianlin, et al. Research Progress on Technical Basis of Synergy Between CO2 Geological Storage Potential and Energy Resources[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2700−2716.

孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 10−20.

SUN Tengmin, LIU Shiqi, WANG Tao. Research Advances on Evaluation of CO2 Geological Storage Potential in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 10−20.

孙学阳, 夏玉成, 李成, 等. 韩城矿区构造控煤样式与构造控煤模式[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(1): 50−55.

SUN Xueyang, XIA Yucheng, LI Cheng, et al. Coal-Control Structural Patterns and Coal-Control Structural Modes of Hancheng Mining Area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1): 50−55.

涂志民. 韩城矿区北区块煤层气赋存特征研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(4): 116−118.

TU Zhimin. Study on Occurrence Features of Coalbed Methane in the North Block of Hancheng Mining Area[J]. Coal Technology, 2017, 36(4): 116−118.

王超平. 渭北煤田地质构造发育规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.

WANG Chaoping. Study on the Geological Structure Development of Weibei Coalfield[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.

王成. 焦坪矿区下石节井田地面抽采与井下抽采煤层气成本对比分析研究[J]. 中国煤层气, 2013a, 10(3): 30−32.

WANG Cheng. Comparative Research on Coalbed Methane Cost of Surface Drainage and Underground Drainage in Jiaoping Mining Area[J]. China Coalbed Methane, 2013, 10(3): 30−32.

王成. 铜川焦坪矿区煤层气储层数值模拟与排采制度研究[J]. 中国煤炭地质, 2013b, 25(4): 18−22.

WANG Cheng. A Study on CBM Reservoir Numerical Simulation and Drainage System in Jiaoping Mining Area, Tongchuan[J]. Coal Geology of China, 2013b, 25(4): 18−22.

王国强, 李婷, 陈隽璐, 等. 中国西北地区超基性岩封存 CO2 潜力研究[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 186−193.

WANG Guoqiang, LI Ting, CHEN Junlu, et al. Assessment of Carbon Dioxide Sequestration Potential of Ultramafic Rocks in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 186−193.

王海涛, 张兵旗. 浅谈澄合矿区各煤层对比的难易程度[J]. 陕西煤炭, 2014, 33(4): 103−105.

WANG Haitao, ZHANG Bingqi. A Brief Discussion on the Difficulty of Comparing Coal Seams in the Chenghe Mining Area[J]. Shaanxi Coal, 2014, 33(4): 103−105.

王晋, 王延斌, 范晶晶, 等. 注 CO2 置换煤层 CH4 试验研究[J]. 科技导报, 2015, 33(17): 84−89.

WANG Jin, WANG Yanbin, FAN Jingjing, et al. Experimental Study on Coal-Bed Methane Displacement by Carbon Dioxide Injection[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(17): 84−89.

王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.

王双明, 王晓刚, 范立民, 等. 韩城矿区煤层气地质条件及赋存规律 [M]. 北京: 地质出版社, 2008.

王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO2 地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45−60.

WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO2 Storage and Technical Problems in Coal Mining Area under the 'Dual Carbon' Target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45−60.

王双明, 孙强, 严美鑫, 等. 论煤炭开采韧性减损地质保障[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(8): 1−13.

WANG Shuangming, SUN Qiang, YAN Meixin, et al. Resilience-oriented Geological Safeguards for Damage Mitigation in Coal Resource Exploitation[J]. Coal Geology & Exploration, 2026, 54(8): 1−13.

郗兆栋, 唐书恒, 张松航, 等. 深部不可采煤层 CO2 封存潜力演化与垂向靶区优选[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(4): 1017−1027.

XI Zhaodong, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Evolution of CO2 Storage Potential and Vertical Target Optimization in Deep Unmineable Coal Seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(4): 1017−1027.

肖富强, 章双龙, 夏为平, 等. 江西省中新生代沉积盆地 CO2 地质储存潜力及适宜性评价[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 326−337.

XIAO Fuqiang, ZHANG Shuanglong, XIA Weiping, et al. Carbon Dioxide Geological Storage Potential and Suitability Evaluation of Mesozoic-Cenozoic Sedimentary Basin in Jiangxi Province [J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 326−337.

肖富强, 潘晓飞, 章双龙, 等. 清江盆地深部咸水层 CO2 地质封存条件与潜力评价[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 316−328.

XIAO Fuqiang, PAN Xiaofei, ZHANG Shuanglong, et al. Geological Storage Conditions and Potential Assessment of CO2 in Deep Saline Aquifers, Qingjiang Basin[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 316−328.

谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1−10.

XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative Definition and Investigation of Deep Mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1−10.

熊宇灿, 许时昂, 张平松, 等. 深部煤层 CO2 封存评价及其研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(4): 76−94.

XIONG Yucan, XU Shi’ang, ZHANG Pingsong, et al. Evaluation and Research Progress of CO2 Sequestration in Deep Coal Seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2026, 54(4): 76−94.

徐子微. 渭北煤田石炭纪 5#煤地球化学特征及成煤环境 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2025.

XU Ziwei. Geochemical Characteristics and Peat-Forming Environments of the Carboniferous No. 5 Coal Seam in the Weibei

Coalfield[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2025.

薛建闽. 蒲白矿区含煤地层特征及沉积环境浅析[J]. 陕西煤炭, 2013, 32(5): 60−61, 85.

XUE Jianmin. A Brief Analysis of the Coal-Bearing Strata Characteristics and Sedimentary Environment of the Pubai Mining Area[J]. Shaanxi Coal, 2013, 32(5): 60−61, 85.

岳佳明. 铜川地区两大成煤时期的聚煤特征分析[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(8): 99−102, 145.

YUE Jiaming. Analysis of Coal Accumulation Characteristics during the Two Major Coal-Forming Periods in Tongchuan Area[J]. Shaanxi Coal, 2024, 43(8): 99−102,145.

岳正喜, 刘小康, 吴修嵘. 铜川矿区丰邑勘查区深部地质特征及煤层气潜力分析[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(5): 34−38.

YUE Zhengxi, LIU Xiaokang, WU Xiurong. Geological Features and CBM Potential Analysis in the Deep Part of Fengyi Exploration Area, Tongchuan Mining Area[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(5): 34−38.

张贝贝, 沈军平, 金超. 韩城象山井田煤层气赋存特征及可采性研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (1): 28−30.

ZHANG Beibei, SHEN Junping, JIN Chao. Study on the Occurrence Characteristics and Recoverability of Coalbed Methane in Xiangshan Well-Field, Hancheng[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2023, (1): 28−30.

张森琦, 郭建强, 李旭峰, 等. 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, 2011.

张志敏. 拟静水压力条件下二氧化碳驱替煤层瓦斯试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.

ZHANG Zhimin. Experimental Study on Carbon Dioxide Displacing Coalbed Methane under Hydrostatic Pressure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.

中国 21 世纪议程管理中心, 中国地质调查局水文地质环境调查中心. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2012.

朱满怀. 鄂尔多斯盆地彬州-黄陵地区中新生代构造演化与铀成矿作用研究 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2025.

ZHU Manhuai. Study on the Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution and Uranium Metallogeny in the Binzhou-Huangling Area of the Ordos Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2025.

Awan M M A, Kirmani F U D. Achieving Low-Carbon Future through CO_2 Storage: A Comprehensive Review of Global Projects and Policies[J]. Petroleum Research, 2025, 10(3): 636−658.

Bachu S. Comparison between Methodologies Recommended for Estimation of CO_2 Storage Capacity in Geological Media: Phase III Report[R]. Carbon Sequestration Leadership Forum, 2008.

CSLF. A Taskforce for Review and Development of Standards with Regards to Storage Capacity Measurement[R]. Carbon Sequestration Leadership Forum, 2005: 16.

Czerw K, Baran P, Szczurowski J, et al. Sorption and Desorption of CO2 and CH4 in Vitrinite- and Inertinite-Rich Polish Low-Rank Coal[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(1): 543−556.

Day S, Duffy G, Sakurovs R, et al. Effect of Coal Properties on CO_2 Sorption Capacity under Supercritical Conditions[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(3): 342−352.

Fathi E, Arcentales D, Belyadi F. Impacts of Different Operation Conditions and Geological Formation Characteristics on CO_2 Sequestration in Citronelle Dome, Alabama[J]. Energies, 2023, 16: 3191.

Goodman A, Hakala J A, Bromhal G, et al. U. S. DOE Methodology for the Development of Geologic Storage Potential for Carbon Dioxide at the National and Regional Scale[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(4): 952−965.

Hadi M M, Sedighi M, Vardon P J, et al. Efficiency of Carbon Dioxide Storage and Enhanced Methane Recovery in a High Rank Coal[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(12): 13892−13900.

Hosseinzadeh S, Haghighi M, Salmachi A, et al. Carbon Dioxide Storage within Coal Reservoirs: A Comprehensive Review[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 241: 213198.

Jiang B, Liu J, Liu J, et al. Experimental Study on CO_2 Sealing Capacity of Salt-gypsum Caprock[J]. Fuel, 2026, 407: 137450.

Luo J, Xie Y, Hou M Z, et al. Advances in Subsea Carbon Dioxide Utilization and Storage[J]. Energy Reviews, 2023, 2: 100016.

Singh H, Ates H, Vaidya R. Advancing CO_2 Sequestration Integrity: Development and Application of the CO_2 Storage Integrity Index in Diverse Geological and Operational Settings[J]. Energy Nexus, 2025, 19: 100522.