



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025111

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2025111

清江盆地深部咸水层 CO₂ 地质封存条件与潜力评价

肖富强^{1,2,3,4}, 潘晓飞⁴, 章双龙^{2,3}, 陈富贵^{1,2}, 邹勇军^{1,2,3,*}, 冯玉霞¹, 肖卫东¹, 祁星¹

(1. 江西省煤田地质勘察研究院, 江西 南昌 330001; 2. 江西省地质调查勘查院, 江西 南昌 330001; 3. 关键矿产资源勘查与开发江西省重点实验室, 江西 南昌 330001; 4. 新疆维吾尔自治区地质局煤田地质中心, 新疆 乌鲁木齐 830009)

摘 要: 沉积盆地深部咸水层 CO₂ 地质封存是 CO₂ 封存的主要方式, 是短期内规模化实现碳减排目标的重要手段。清江盆地发育优质的深部咸水储层和盖层, 具备 CO₂ 地质封存前景, 以往对其封存地质条件和封存潜力未开展系统研究。通过资料收集、野外调查和测试分析等工作, 对盆地封存地质条件进行综合研究, 深入分析储盖条件、断层发育、水文地质、地热地质等特征, 运用碳封存领导人论坛推荐的封存潜力计算公式, 评估清江盆地 CO₂ 地质封存量。研究表明, 清江盆地深部发育两套适宜的 CO₂ 封存储盖组合: 白垩系河口组砂砾岩储层和塘边组泥质岩类盖层; 白垩系莲荷组、古近系新余组一段砂砾岩储层和新余组二、三、四段含膏岩泥质岩类盖层。储层岩性和矿物组成条件较好, 具有较高的孔隙度和渗透率; 盖层具有岩性致密、孔渗性低、突破压力较大的优势。盆地主控断裂在盆地形成后对地层变形无较大影响, 次级断裂发育规模、断距均不大。咸水层具备水力封堵作用, 且与地表水源无水力联系。经初步评估, 清江盆地深部咸水储层 CO₂ 有效封存容量为 3.93×10^8 t, 总体封存潜力较大, 可作为赣北环鄱阳湖经济圈 CO₂ 地质处置空间。

关键词: 清江盆地; 咸水层; CO₂ 地质封存; 封存条件; 封存潜力

中图分类号: P618.13; P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0316-13

Geological Storage Conditions and Potential Assessment of CO₂ in Deep Saline Aquifers, Qingjiang Basin

XIAO Fuqiang^{1,2,3,4}, PAN Xiaofei⁴, ZHANG Shuanglong^{2,3}, CHEN Fugui^{1,2}, ZOU Yongjun^{1,2,3,*},
FENG Yuxia¹, XIAO Weidong¹, QI Xing¹

(1. Jiangxi Provincial Coal Geological Exploration and Research Institute, Nanchang 330001, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330001, Jiangxi, China; 3. Jiangxi Province Key Laboratory of Exploration and Development of Critical Mineral Resources, Nanchang 330001, Jiangxi, China; 4. Coalfield Geological Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-08-26; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 江西省地质局科技研究项目(2023JXDZKJKY05), 江西省地质调查勘查院地质环境监测所科研项目(2022SDDY-DHS01)联合资助。

作者简介: 肖富强(1989–), 男, 高级工程师, 长期从事油气地质、矿产地质勘查研究。E-mail: xiaofq1218@163.com。

* 通讯作者: 邹勇军(1984–), 男, 正高级工程师, 长期从事矿产地质研究与管理。E-mail: 158276952@qq.com。

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

Abstract: The geological storage of CO₂ in deep saline aquifers of sedimentary basins is the main way of CO₂ storage and an important means to achieve carbon reduction goals on a large scale in the short term. The Qingjiang Basin has developed high quality deep saline reservoirs and cap rocks, which have the potential for CO₂ geological storage. However, there has been no systematic study on its storage geological conditions and potential in the past. By the data collection, field investigation, and testing analysis works, a comprehensive study was conducted on the geological conditions of CO₂ storage in the Qingjiang Basin. Embedded analysis was carried out on the characteristics of reservoir-cap conditions, fault development, hydrogeology, geothermal geology, etc. Using the storage potential calculation formula recommended by the Carbon Storage Leaders Forum, the CO₂ geological storage capacity in the Qingjiang Basin was evaluated. The results show that there are two sets of reservoir-cap combinations suitable for CO₂ storage developed in the deep part of the Qingjiang Basin: in Cretaceous, the glutenite of Hekou Formation is the reservoir, and the argillaceous rocks of Tangbian Formation is the cap rock; the glutenite of Lianhe Formation in Cretaceous and the first member of the Xinyu Formation in Paleogene is the reservoir, and the gypsum and argillaceous rocks of the second, third, fourth member of the Xinyu Formation is the cap rock. Well rock character and mineral composition conditions has been developed in the reservoir, with high porosity and permeability; the advantages in the cap rock has been developed with dense lithology, low porosity and permeability, and high breakthrough pressure. The main control fault of the basin has little impact on the strata deformation of the basin after its formation, and the development scale and fault displacement of secondary faults are not significant. The saline aquifers has hydraulic sealing effect and has no hydraulic connection with surface water sources. After preliminary assessment, the effective CO₂ storage capacity of the deep saline reservoir in the Qingjiang Basin is 3.93×10^8 t, which is of large storage potential, and can be used as a geological disposal space for CO₂ in the Poyang Lake Economic Circle in northern Jiangxi.

Keywords: Qingjiang Basin; saline aquifers; CO₂ geological storage; storage condition; storage potential

随着近年来全球气候变化加剧,政府间气候变化专门委员会(IPCC)研究指出(IPCC, 2018),以 CO₂ 为代表的温室气体大量排放是主因,得到了全世界多数研究学者的认可。国际能源署(IEA)最新研究报告指出(IEA, 2024),2023 年全球与能源消耗有关的 CO₂ 排放量达到 374 亿 t,中国是全球第一大 CO₂ 排放国,碳排放总量占全球的 32%,碳减排压力巨大。CO₂ 捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术,被公认为当前技术经济条件下大规模实现碳减排的重要解决方案,可有效降低煤炭、石油等传统化石能源消耗过程中的 CO₂ 排放量,也是实现碳达峰、碳中和(“双碳”)目标的重要技术(蔡博峰等, 2021; 桑树勋等, 2022; 宗师等, 2023)。CO₂ 地质封存作为 CCUS 技术的核心,是 CO₂ 处置的最直接有效的措施(Luo et al., 2023)。

目前,可用于 CO₂ 封存的地质体主要有沉积盆地深部咸水层、枯竭油气田和深部不可采煤层等(刘廷等, 2021; 王国强等, 2023),其中沉积盆地深部咸水层

被认为是地质封存的主力目标地质体(刁玉杰等, 2023)。郭建强等(2014)在系统分析国内主要沉积盆地地质条件基础上,全面评估了中国主要沉积盆地 CO₂ 地质封存潜力,认为深部咸水层的储存潜力占全部储存容量的 95.6%。国内外对沉积盆地深部咸水层 CO₂ 地质封存潜力研究已取得了较为丰富的研究成果,提出了不同的封存潜力计算与评价方法(Bachu, 2003; USDOE, 2006; CLSF, 2007; 沈平等, 2009; 郭建强等, 2014)。Bachu(2003)针对沉积盆地 CO₂ 封存潜力评价,提出一套包括 15 个评价指标的盆地级别指标体系,奠定了深部咸水层封存潜力评价的基础。沈平等(2009)建立了涵盖 5 个层次、包含 25 个评价指标 CO₂ 封存潜力评价指标体系。郭建强等(2014)提出将中国 CO₂ 地质封存潜力评价划分为 5 个阶段。其中,针对盆地级 CO₂ 封存潜力评价建立了涵盖 4 个指标层、29 个指标的评价体系和层析分析-综合评价的适宜性评价技术方法。封存容量的评估是 CO₂ 封存潜力评价的核心,美国能源部(USDOE, 2006)将深

部咸水层 CO_2 地质封存潜力分为远景、推定和实际封存量 3 类, 并提出基于容积法理论的计算公式; 碳封存领导人论坛 (CLSF, 2007) 将 CO_2 地质封存潜力分为, 即理论、有效、实际和匹配埋存量 4 种类型, 提出基于封存机理的计算公式。此外, 欧盟计算方法 (孙腾民等, 2021)、ECOFYS 和 TNONING 计算方法 (桑树勋等, 2020), 也可用于评估封存容量。

据《江西统计年鉴 (2023)》(江西省统计局, 2024) 报道, 2023 年江西省规模以上工业能源消耗达 7 086 万 t 标准煤, 折合 CO_2 排放量超 1.8 亿 t, 在碳达峰、碳中和目标背景下, 面临较为严峻的碳减排任务, 开展 CO_2 地质封存条件及潜力预测研究十分必要。针对江西省沉积盆地深部咸水层 CO_2 地质封存条件研究工作较少评价全国主要沉积盆地 CO_2 地质封存潜力适宜性后认为, 江西鄱阳、清江等盆地 CO_2 地质封存潜力达到适宜、较适宜等级。肖富强等 (2024) 评价了江西省内主要沉积盆地 CO_2 地质封存潜力, 认为鄱阳盆地和清江盆地达到适宜等级。

江西省 CO_2 地质封存研究起步晚、研究程度较低, 亟需通过更精细评价研究, 为 CO_2 地质封存目标区优选提供技术支撑。清江盆地位于赣北环鄱阳湖经济圈, 周边碳源非常密集, 分布有钢铁厂、燃煤电厂、水泥厂等碳排放重点监控企业, 均是大规模、高浓度

CO_2 排放源, 碳源集中程度高, 表明该经济区域碳减排需求较大。已有研究认为 (肖富强等, 2024), 江西清江盆地构造条件较好, 发育有适合的储盖地层组合, 具备较好的 CO_2 地质封存前景。本次工作以清江盆地为研究对象, 通过资料收集、野外调查和测试分析等工作, 对盆地封存地质条件进行综合研究, 深入分析储层、盖层、断层等发育特征, 运用国际主流 CO_2 封存潜力计算公式, 评估清江盆地主要次级构造单元 CO_2 地质封存量, 为江西省自然资源领域地质碳汇研究提供参考。

1 研究区地质概况

1.1 盆地地质背景

清江盆地地处江西省中部, 西至新余, 东至丰城, 南至新干, 总面积约为 3 600 km^2 。构造上位于下扬子板块与华夏板块交接带的萍乐拗陷中部, 其北叠置在蒙山隆起复背斜南翼, 南部边界萍乡—广丰深断裂带毗邻武功山隆起 (肖富强等, 2025)。盆地主要受 NEE、NE 及 NNE 向多组断裂及其断块的复合控制, 总体为一近 NE 向与 NNE 向的交叉复式断陷盆地 (图 1a)。清江盆地周边主要发育新元古界、晚古生界、中生界二叠系、侏罗系, 盆地内主要发育白垩系、古近系。

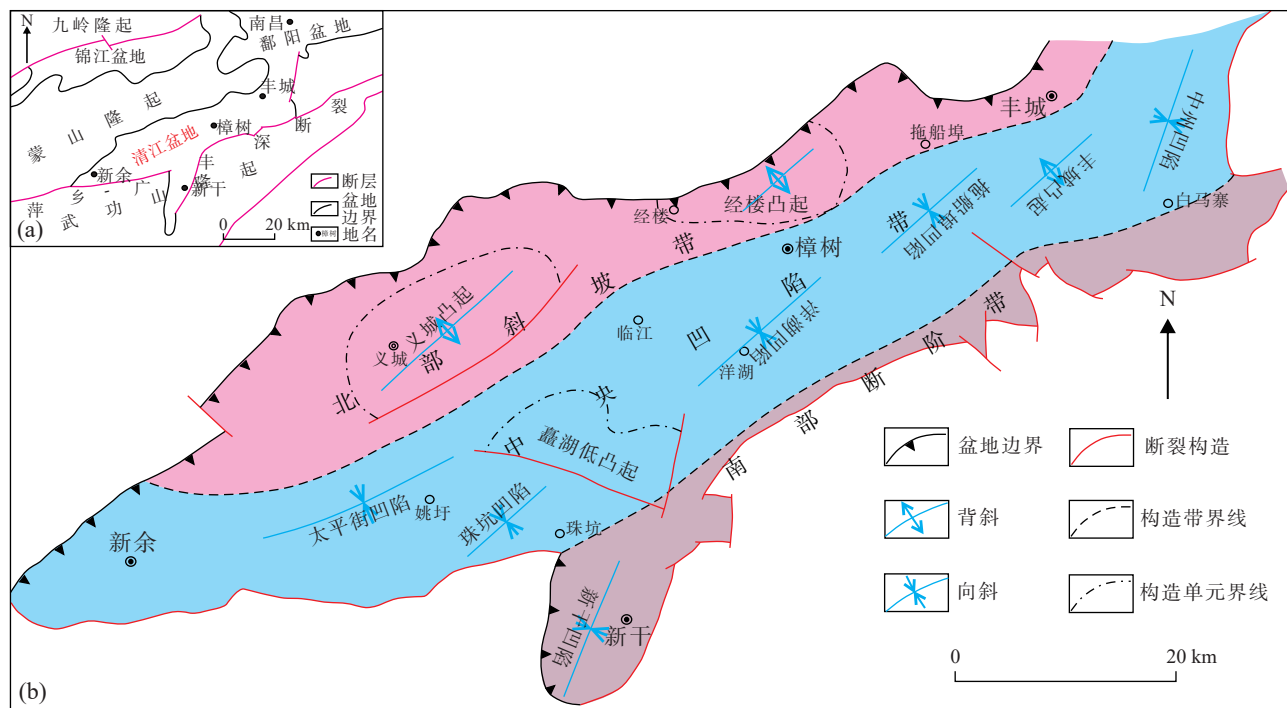


图1 清江盆地地质构造简图(a)与构造纲要图(b)

Fig. 1 (a) Regional geological map of Qingjiang basin and (b) structure outline map

经过地矿队伍数十年勘探与研究,已基本查明清江盆地构造发育、地层岩性等基本特征(江西省地质局九一五大队,1973;柳江波等,1980)。清江盆地整体为NEE向展布,可划分为北部斜坡带、中央凹陷和南部断阶带3个次级构造单元(图1b)。北部斜坡带主要位于新余北—义城—经楼—拖船—丰城一带,自西向东进一步细分为义城凸起、经楼凸起、新居凸起、拖船埠凹陷和丰城凸起5个构造单元。中央凹陷带主要位于姚圩—临江—洋湖一带,包括太平街凹陷、珠坑凹陷和临江—洋湖深凹陷,是清江盆地地层发育最厚的区域,最深处位于临江—洋湖一带。南部断阶带位于新干至白马寨一带,直接与南部的武功山隆起相接,南缘为萍乡—广丰深断裂带,是清江盆地的主控断裂。

据岩石地层特征、沉积环境和侵蚀面等条件分析,清江盆地大致经历了生成、发展和封闭3个构造、沉积发展阶段。晚白垩世为盆地生成阶段,江西省发生大规模断陷成盆事件,清江盆地区域逐渐下降成盆,于盆地中广泛沉积河流相粗碎屑岩的晚白垩系龟峰群(K_2g),形成 CO₂ 地质封存优质的储盖组合空间。古近纪早期为盆地发展阶段,古气候炎热干燥、古地形接近夷平,物源补给以陆源碎屑为主,广泛沉积了新余组(E_{1-2x}),底部岩性为砂岩、砾岩,形成一套优质储集层;中上部地层岩性主要为深灰色泥岩、含盐泥岩等,普遍含有硬石膏、钙芒硝和岩盐等,可作为优质区域性封盖层,利于气体的保存。始新世中期进入封闭阶段,地壳上升,风化剥蚀后形成了新余组(E_{1-2x})与临江组(E_{2-3l})之间的假整合界面,临江组为一套内陆静水湖泊相细碎屑岩,主要为浅紫红色粉砂岩、粉砂质泥岩、灰绿色泥岩等。

1.2 储盖层组合

前人研究发现,超临界 CO₂ 流体具有液态溶解能力和气态扩散能力(熊鹏飞等,2024),能够显著提高咸水层中地质封存稳定性和安全性,为了保证储层条件下 CO₂ 流体为超临界状态,一般选择在地表以下 800 m 以深才能确保超临界状态所需的温压条件(沈平等,2009)。参考全球主要咸水层封存项目 CO₂ 封存深度(图2),以及郭建强等(2014)提出的有利封存深度范围,将盆地地表以下 800~3 500 m 范围作为深部咸水层适宜的封存深度范围。

根据清江盆地以往钻孔揭露情况,有利的封存深度范围内主要发育白垩系河口组、塘边组、莲荷组、

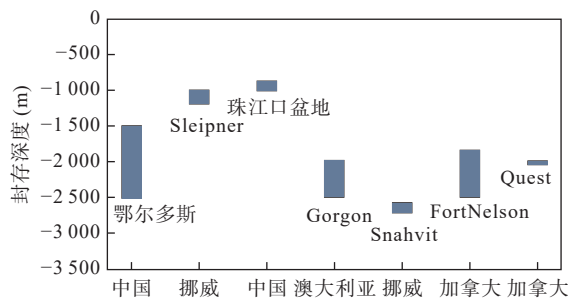


图2 全球主要咸水层 CO₂ 地质封存示范项目封存深度范围(据熊鹏飞等,2024)

Fig. 2 Storage depth range of CO₂ storage demonstration projects in major saline aquifers in the world

古近系新余组。结合地层沉积组合、岩性特征,将清江盆地白垩系—古近系划分为两套 CO₂ 地质封存储盖组合(图3)。

(1)白垩系河口组(K_2h)—塘边组(K_2t)储盖组合:河口组砂砾岩为储层,塘边组泥岩、粉砂岩为盖层,该组合在盆地内广泛发育。

(2)白垩系莲荷组(K_2l)、古近系新余组一段(E_{1-2x}^1)—新余组二段(E_{1-2x}^2)—三段(E_{1-2x}^3)—四段(E_{1-2x}^4)储盖组合:莲荷组砂砾岩、含砾砂岩和新余组一段砾岩、砂砾岩为储层,新余组二段以上泥岩、膏盐层、粉砂岩等为盖层,该组合主要分布于中央凹陷带。

2 盆地 CO₂ 封存条件

沉积盆地深部咸水层进行 CO₂ 地质封存应保证 CO₂ 流体以超临界状态注入深部储层,才能达到安全、稳定的效果,至少应在临界深度 800 m 以下(马永法等,2022)。咸水储层岩石应具有一定渗透率和孔隙度,确保 CO₂ 流体能够顺利的注入和扩散,并且达到最大程度的封存量。咸水层上部必须有致密封盖层,防止 CO₂ 逃逸,以保证长期封存安全性(熊鹏飞等,2024)。断层能破坏盖层的完整性,可能成为 CO₂ 泄露通道,封存选区应尽量避免断层附近(张森琦等,2010)。咸水层地下水动力条件越弱,越有利于 CO₂ 稳定封存(马永法等,2022)。碳源条件是影响 CO₂ 地质封存经济性的重要指标,盆地周边工业发达、碳源集中更利于开展 CO₂ 地质封存。

2.1 储层条件

2.1.1 岩性及分布特征

根据地表调查、钻井揭示情况,清江盆地 800~

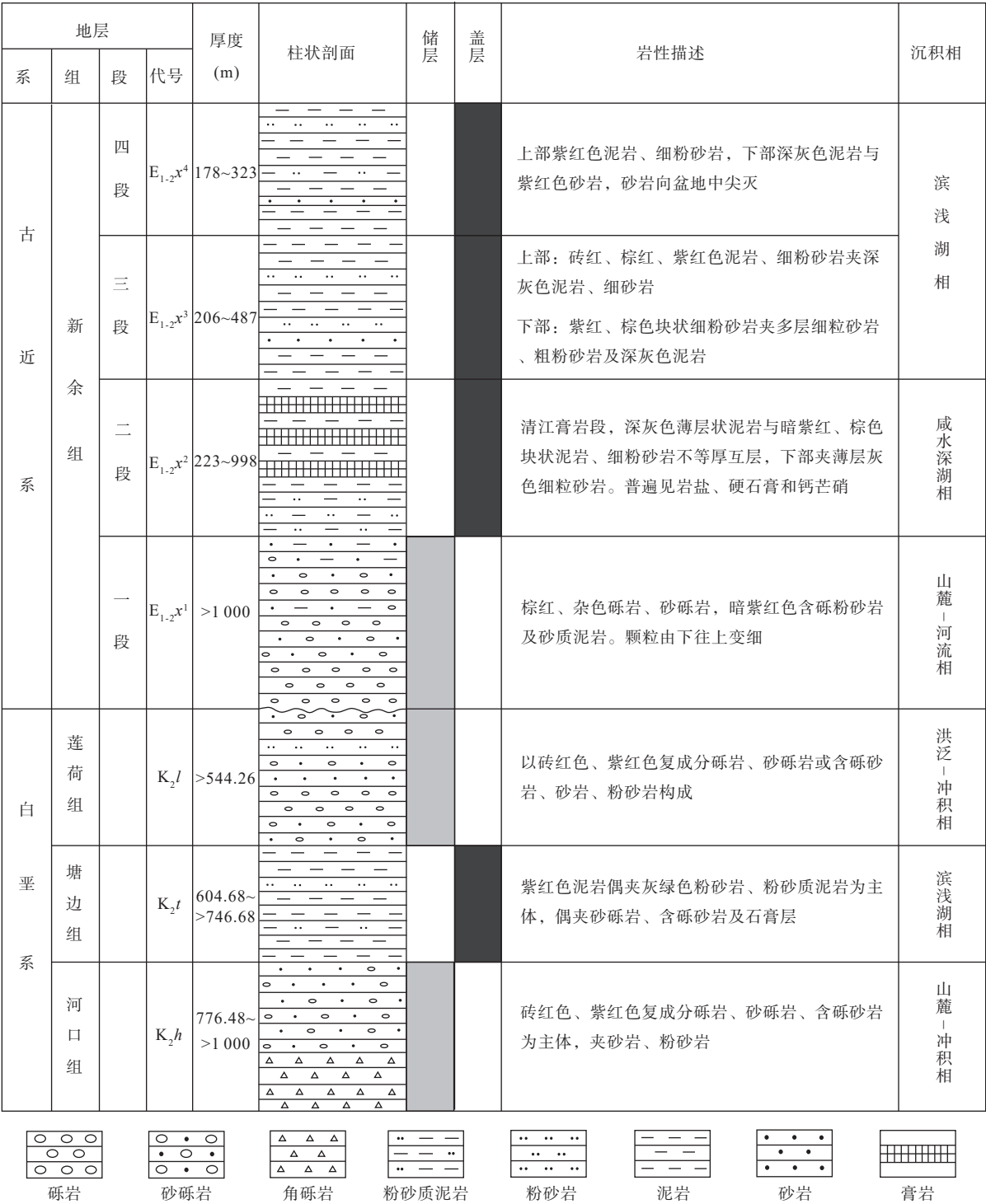


图3 清江盆地深部咸水层 CO₂ 封存储盖层划分

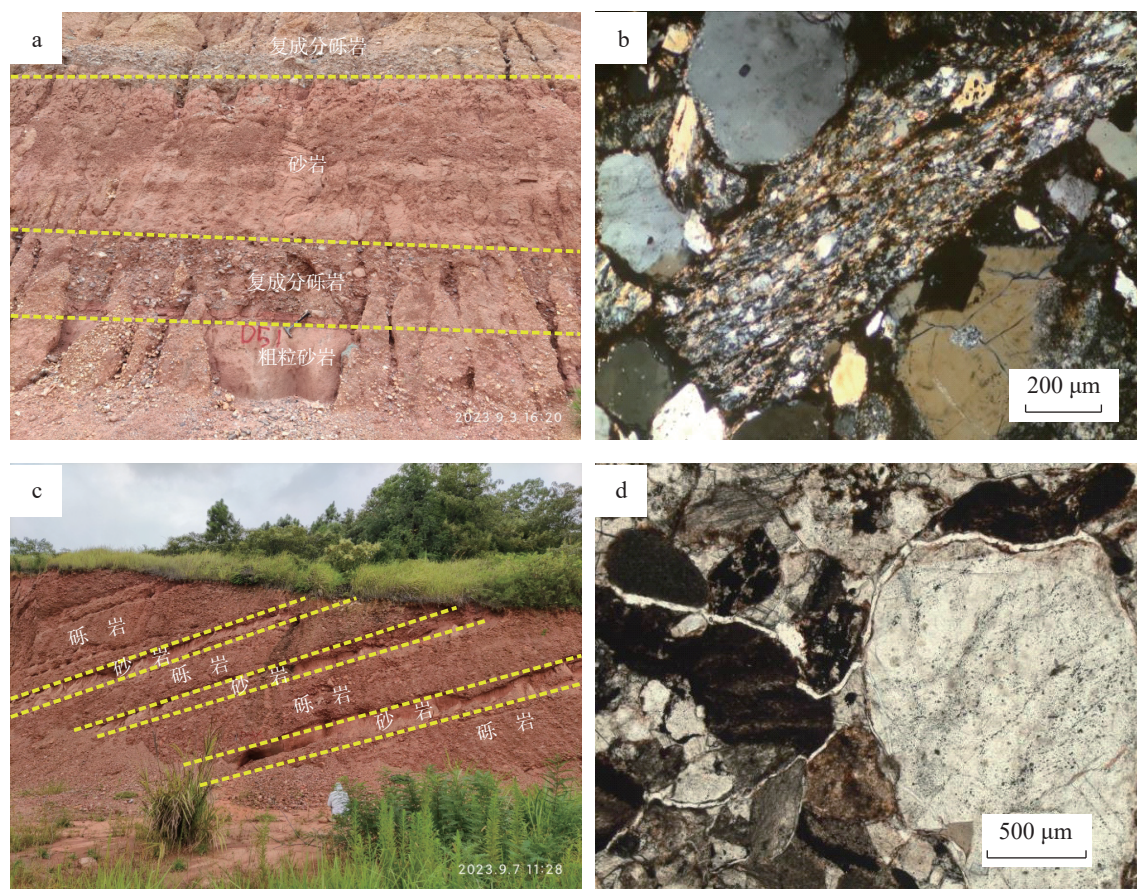
Fig. 3 Division of CO₂ seal and storage cap in the deep saline aquifers of the Qingjiang Basin

3 500 m 深度范围内主要沉积了 3 套储层，分别为白垩系河口组、莲荷组和古近系新余组一段。

(1)白垩系储层：白垩系河口组、莲荷组沉积于清江盆地生成初始阶段，沉积环境主要为山麓堆积、洪泛冲积，总体岩性较为接近，以砖红色复成分砾岩、砂

砾岩和砂岩为主(图 4)，在清江盆地内广泛分布。

河口组在新干凹陷出露地层厚度为 776.48 m，丰城市市出露厚度大于 1 000 m，推测河口组的平均厚度可能大于 800 m。中央凹陷带深部最大埋深可能超过 3 000 m，北部斜坡带埋深为 1 000~2 500 m，推测盆地



a.河口组野外照片,复成分砾岩与砂岩交替;b.河口组砾岩镜下照片;c.莲荷组野外照片,厚层砾岩夹中层砂岩;d.莲荷组粗粒砂岩镜下照片

图4 白垩系储层岩性特征

Fig. 4 Lithological characteristics of Cretaceous reservoirs

内河口组的平均埋深为 2 200 m。

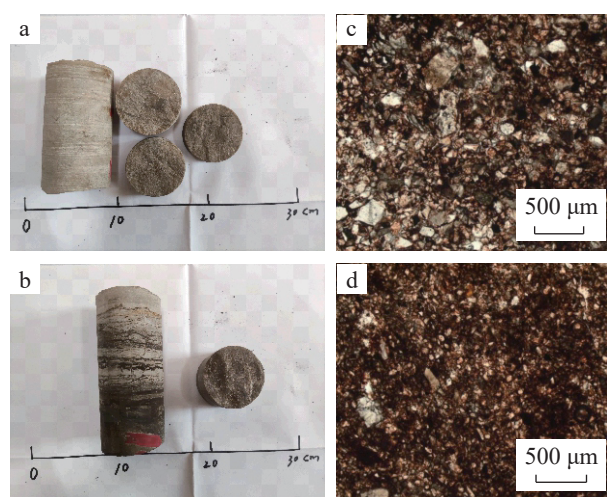
莲荷组在新余长坑出露厚度为 544.26 m, 新干凹陷厚度大于 249.36 m, 推测莲荷组的平均厚度应超过 400 m, 平均埋深为 1 600 m。

(2)古近系储层: 古近系新余组形成于清江盆地发展阶段, 于底部一段沉积了一套优质储集层, 岩性以砂岩、砾岩为主(图 5)。新余组一段由盆地边缘到中部、深部到浅部, 总体呈现变细的粒序组合特征, 顶部多呈现粉砂岩、粉砂质泥岩相。

以往地质勘探工作对新余组一段厚度控制不足, 其在盆地深部中央凹陷带厚度可能大于 1 000 m, 由盆地中央向盆缘厚度逐渐减小, 平均埋深约为 1 200 m, 达到 CO₂ 地质封存临界埋深。

2.1.2 矿物组成

对清江盆地发育的 3 套适宜的 CO₂ 储层进行矿物组成分析发现, 储层岩石矿物组成以石英、长石(钾长石、斜长石)、碳酸盐矿物(方解石、白云石)以及黏



a、b.新余组砂岩照片;c、d.砂岩镜下照片

图5 新余组砂岩储层岩性特征

Fig. 5 Lithological characteristics of the Xinyu Formation sandstone reservoir

土矿物, 副矿物主要包括菱铁矿、赤铁矿、方沸石等。此

外,部分样品中可见少量硬石膏、钙芒硝等膏盐矿物。

经统计,清江盆地咸水储层岩石矿物组成以脆性矿物为主(图 6),河口组的岩石脆性矿物平均含量为 69.7%,莲荷组的岩石脆性矿物平均含量为 76.3%,新余组的脆性矿物平均含量为 71.6%,各套储层岩石黏土矿物平均含量为 21.4~28.1%。总体上,清江盆地咸水储层岩石具有较高脆性矿物含量,在岩石成岩后易形成骨架支撑,利于产生高效粒间连通孔隙,便于流体运移(陈全红,2007)。此外,高脆性矿物含量暗示岩石具备较高的杨氏模量、较低的泊松比,受外力作用时容易破裂,易形成裂缝,利于储层改造(朱子恒等,2024)。

2.1.3 孔隙度和渗透率

孔隙度和渗透率是储层的两大基本属性,是衡量储层储集性能优劣的基本参数,深部咸水层 CO₂ 封存要求选择孔隙度高、渗透率大的岩层作为储层(张晓普等,2012)。

清江盆地各套咸水储层具备较高的孔隙度和渗透率(图 7)。河口组的孔隙度为 8.88%~12.66%,平均为 10.85%;渗透率为 $10.65 \times 10^{-3} \sim 51.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $22.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。莲荷组的孔隙度为 8.64%~11.32%,平均为 10.10%;渗透率为 $13.47 \times 10^{-3} \sim 48.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。新余组一段的孔隙度为 4.62%~15.92%,平均为 11.01%;渗透率为 $15.10 \times 10^{-3} \sim 80.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $46.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体上,清江盆地咸水储层达到了中等孔隙度、中等渗透率水平(张森琦等,2011),表明盆地咸水储层 CO₂ 储集空间较大、注入能力较强。

朱如凯等(2016)通过对油气储层孔隙结构解剖,提出“孔隙结构四分法”评级,将砂岩储层岩石孔隙系统分为毫米级孔(大于 1 mm)、微米级孔(1~1 000 μm)、

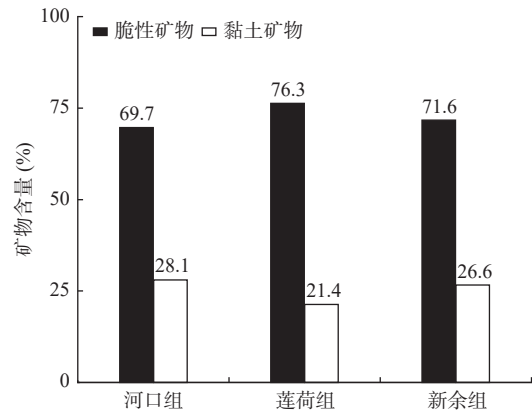


图6 清江盆地储层岩石矿物组成

Fig. 6 Mineral composition of reservoir rocks in Qingjiang basin

亚微米级孔(100~1 000 nm)以及纳米级孔(小于 100 nm)。借鉴上述孔隙系统划分方案,结合研究区储层岩石样品高压压汞实验结果(图 8),清江盆地各套储层孔隙结构总体以纳米级孔为主,其次为亚微米级孔、微米级孔,毫米级孔较少。从实验结果反映不同级别孔隙的渗透率贡献率来看,微米级孔、亚微米级孔对咸水储层渗透率贡献起主导作用,纳米级孔的渗透率贡献较小。因此,在深部咸水层 CO₂ 地质封存中,储层岩石中微米级孔、亚微米级孔可能对 CO₂ 超临界流体的注入、封存起决定作用。

2.2 盖层封闭条件

盖层封闭能力包括宏观封闭和微观封闭(刁玉杰等,2012),宏观封闭能力评价主要包括盖层岩性、厚度、分布范围等,微观封闭能力评价包括盖层物性、突破压力等。

2.2.1 宏观封闭能力

目前,常见的油气田封盖层岩性主要有粉砂岩、

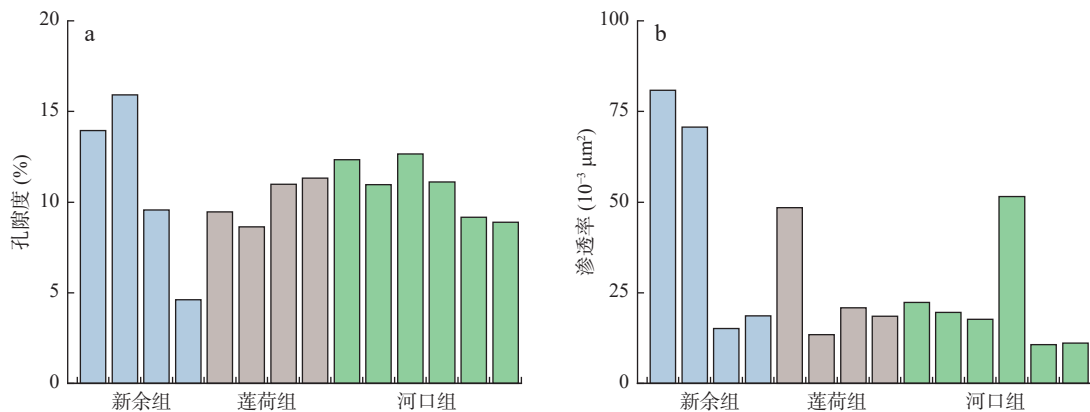


图7 清江盆地储层孔隙度(a)和渗透率(b)

Fig. 7 (a) Porosity and (b) permeability of reservoirs in the Qingjiang basin

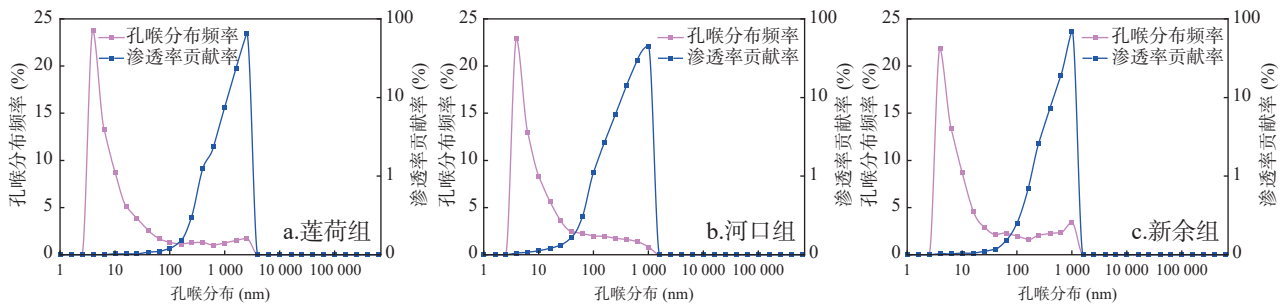


图8 清江盆地储层孔喉分布与渗透率贡献

Fig. 8 Distribution of reservoir pore throat and contribution of permeability in Qingjiang basin

泥岩、页岩、碳酸盐岩、膏岩等,封盖能力:膏岩>页岩>泥岩>碳酸盐岩>粉砂岩(付晓飞等,2018)。清江盆地深部咸水储层之上发育两套盖层,分别为白垩系塘边组和古近系新余组二段~四段。

塘边组岩性为湖相紫红色泥岩为主体,发育厚度超过 600 m,位于河口组储层之上连续沉积,是稳定分布的区域性盖层,平均埋深约为 2 000 m,该段地层泥地比高,是质量良好的封盖层。

新余组二段~四段共同构成新余组一段储层的直接盖层,总体以泥质岩类为主,钻孔反映整体最小厚度大于 500 m,平均埋深超过 800 m。值得注意的是,新余组二段沉积于咸水深湖相,发育厚度较大的膏岩层,著名的清江盐矿即位于该层位(罗文煌等,2006),含盐岩数十层,膏岩、盐岩层分布面积近 500 km²,具备最优质的封盖能力。

2.2.2 微观封闭能力

(1)盖层物性:清江盆地发育的盖层主要为泥质岩类、膏岩层,其物性参数小,封盖能力较好。塘边组平均孔隙度为 5.9%,平均渗透率为 $0.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;新余组盖层平均孔隙度为 4.6%,平均渗透率为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,扩散系数为 $0.28 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。区内盖层具有优越的封闭性能,对深部咸水储层封存 CO₂ 有利。

(2)盖层突破压力:突破压力在盖层封闭性评价中具有重要作用,是指在储层油气压力作用下刺穿上部盖层的最小压力(朱子恒等,2024),突破压力越大代表盖层封闭性能越好。突破压力大小与盖层岩性、埋深密切相关,模拟地层压力条件下的突破压力实验结果显示,新余组盖层突破压力为 9~12 MPa,塘边组盖层突破压力为 11 MPa,理论上可封闭油气柱高度超过 1 000 m。盆地内主要构造圈闭的闭合度一般介于 100~300 m,远小于盖层理论可封闭气柱高度。因此,认为清江盆地盖层具有良好的封闭条件。

2.3 断裂发育特征

清江盆地发育的断裂构造总体可划分为两类,控盆主干断裂和盆内次级断裂(图 9)。控盆主干断裂为盆地南部边界萍乡-广丰断裂带,形成于晋宁期,是下扬子板块与华夏板块缝合带,加里东期、印支期构造活动强烈而发生大规模向北逆冲,在燕山晚期大规模断陷成盆事件后形成清江盆地,对盆地沉积和变形起控制作用,此后该断裂带未发生明显活动迹象。因此,该断裂在初期控制清江盆地的发展和演化,盆地形成后对地层完整性无较大影响,对盆地深部咸水层封存 CO₂ 影响较小。

盆内次级断裂是在中生代晚期新华夏构造体系基础上发育形成,过去称之为新华夏系(吴根耀,2006),新生代进一步发育,主要分布于中央凹陷带和南部断阶带,总体呈 NE、NEE 走向,部分呈 NW 走向,对盆地沉积盖层起变形改造作用。据清江盆地钻井揭示,并且以压扭性断裂为主,多数次级断裂断距较小,一般为 100~200 m,小于盆地盖层厚度,断裂形成的侧向岩性对接封堵仍一定程度形成封闭体系(付晓飞等,2018),认为对 CO₂ 地质封存影响甚微。

2.4 水文地质条件

清江盆地深部储层以碎屑岩层为主,其内蕴含一定规模咸水层,为盆地内 CO₂ 地质封存提供了巨大潜力。清江盆地深部咸水层矿化度为 3.32~78.84 g/L,水质类型具有多样化特征,包括 HCO₃-Na·Ca 型、Cl-Na 型、Cl-SO₄-Na·Ca 型等(柳江波等,1980),总体上属于咸水层。

清江盆地总体构造形式为不对称向斜,沉积中心位于中央凹陷带,地表呈现北西高、南东低的特征。地下水动力条件受构造、地形条件影响显著,北部斜坡带储层出露于地表,接收地表水下渗补给,但地下水流速较慢,属地下水缓流区;中央凹陷带地势平坦,

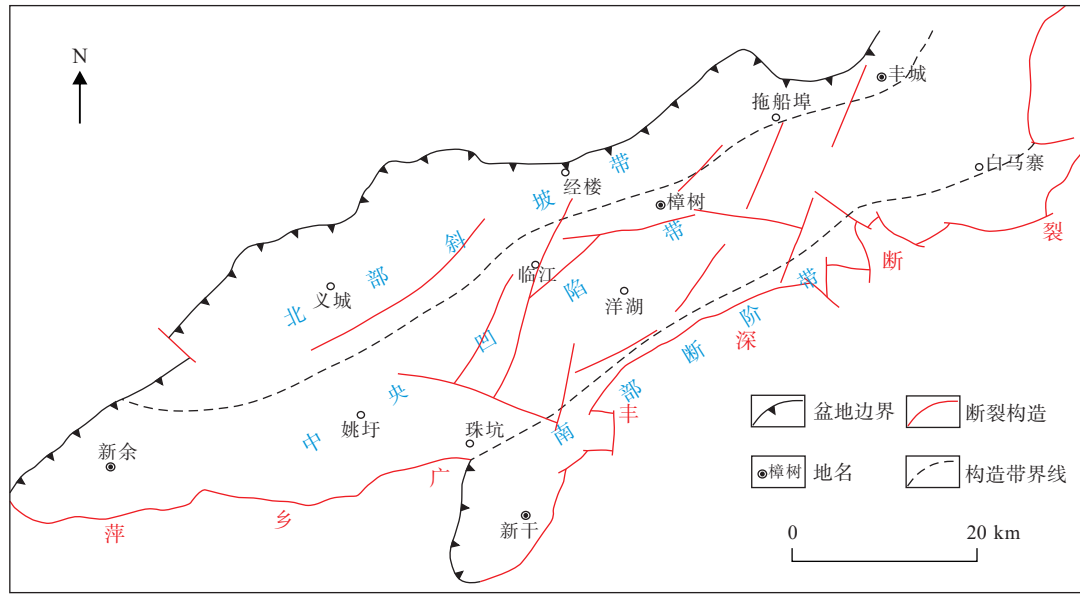


图9 清江盆地断裂分布图

Fig. 9 Fault occurrence map of the Qingjiang Basin

上部覆盖有巨厚不透水层,地下水保存条件好,为地下水滞留区,具备水力封堵作用,总体上适合 CO_2 地质封存。研究区周边饮用水源主要为赣江,其次为第四系松散岩类孔隙水,饮用水源与深部咸水层之间发育多套致密隔水层,不具备水力联系,深部咸水层封存 CO_2 不会对地表水源产生影响。

2.5 地热地质条件

影响 CO_2 地质封存的地热地质条件包括大地热流、地温梯度等,对于理想状态来说,这些参数的定量值越小越有利于 CO_2 地质封存(郭建强等, 2014),是评价盆地冷热条件的重要参数(吴庆华等, 2012)。根据胡圣标等(2001)的测量,江西省大地热流实测值为 $57.8 \sim 101 \text{ mW/m}^2$,清江盆地周边大地热流为 $58.6 \sim 79.2 \text{ mW/m}^2$,平均值为 69.32 mW/m^2 。清江盆地地温梯度较低,温梯度为 $2.2 \sim 2.8 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,平均地温梯度约为 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。综合大地热流和地温梯度数值的判断,清江盆地地热地质条件较好,达到次冷盆地标准(吴庆华等, 2012; 郭建强等, 2014),适合开展 CO_2 地质封存。

3 封存潜力

3.1 计算方法

参考《咸水层二氧化碳地质封存潜力评价技术指南》(DZ/T 0474-2024),以及碳封存领导人论坛(CSLF, 2007)提出的基于封存机理的理论计算方法,假设在

理想状态下,将清江盆地深部咸水层视为闭合水文地质边界条件, CO_2 封存主要考虑束缚封存和溶解封存两种机理类型(沈平平等, 2009; 肖富强等, 2024),即认为深部咸水储层中部分孔隙空间用于束缚 CO_2 流体,另一部分孔隙空间则被溶解 CO_2 的咸水占据。该计算方法在国内已有诸多研究实例,鄂尔多斯盆地(张冰等, 2019)、黑龙江林甸地区(马永法等, 2022)、北部湾盆地(熊鹏飞等, 2024)等地区均取得较好的应用成果,适用于区域级、盆地级、目标区级的封存 CO_2 潜力计算(郭建强等, 2014)。

$$M_{\text{CO}_2\text{tr}} = \Delta V_{\text{trap}} \times \varphi \times S_{\text{CO}_2\text{t}} \times \rho_{\text{CO}_2\text{r}} / 10^3 = A \times H \times \varphi \times S_{\text{CO}_2\text{t}} \times \rho_{\text{CO}_2\text{r}} / 10^3 \quad (1)$$

式中: $M_{\text{CO}_2\text{tr}}$ 为 CO_2 在盆地深部咸水储层中束缚封存量理论值, 10^6 t ; ΔV_{trap} 为沉积盆地内整个咸水储层的体积, 10^6 m^3 ; A 为咸水储层分布面积, km^2 ; H 为咸水储层平均厚度, m ; φ 为咸水储层岩石孔隙度, %; $S_{\text{CO}_2\text{t}}$ 为液流逆流后被圈闭的 CO_2 饱和度, %; $\rho_{\text{CO}_2\text{r}}$ 为深部咸水储层条件下 CO_2 密度, kg/m^3 。

$$M_{\text{CO}_2\text{td}} = A \times H \times \varphi \times (\rho^s X_s^{\text{CO}_2} - \rho^i X_i^{\text{CO}_2}) \times (1 - S_{\text{CO}_2\text{t}}) / 10^3 \approx A \times H \times \varphi \times \rho^i \times R_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CO}_2} \times (1 - S_{\text{CO}_2\text{t}}) / 10^3 \quad (2)$$

式中: $M_{\text{CO}_2\text{td}}$ 为 CO_2 在盆地深部咸水储层中溶解封存量理论值, 10^6 t ; ρ^s 为地层水被 CO_2 饱和时的平均密度, kg/m^3 ; ρ^i 为初始地层水平均密度, kg/m^3 ; $X_s^{\text{CO}_2}$ 为地层水被 CO_2 饱和时占地层水的平均质量分数, %; $X_i^{\text{CO}_2}$ 为原始 CO_2 占地层水的平均质量分数, %; R_{CO_2} 为

CO₂ 在咸水层的溶解度, mol/kg; M_{CO_2} 为 CO₂ 摩尔质量, 取值 0.044 kg/mol。

$$M_{CO_2} = E \times (M_{CO_2tr} + M_{CO_2td}) \quad (3)$$

式中: M_{CO_2} 为盆地深部咸水储层封存量有效值, 10⁶ t; E 为有效封存系数。

3.2 参数取值分析

依据清江盆地深部咸水储层、盖层发育情况和封存潜力预测方法, 分别计算清江盆地次级构造单元咸水储层 CO₂ 封存量。

(1) 储层面积(A): 为简化计算, 以次级构造单元储层分布的面积作为计算面积。中央凹陷带储层面积为 1 612 km², 北部斜坡带储层面积为 640 km², 南部断阶带储层面积为 435 km²。

(2) 储层厚度(H): 总结各盆地内储层的区域时空分布, 充分利用收集的储层厚度数据, 取平均值作为该储层的计算厚度。对于研究程度较少的咸水储层计算厚度占地层厚度的比例, 可取经验值 0.1 (Li et al., 2005)。因此, 新余组一段储层厚度取值为 100 m, 莲荷组储层厚度取值为 40 m, 河口组咸水层平均厚度取值为 80 m。

(3) 孔隙度(ϕ): 采用平均孔隙度代表各个咸水储层的计算孔隙度。河口组的平均孔隙度为 10.85%, 莲荷组的平均孔隙度为 10.10%, 新余组一段的平均孔隙度为 11.01%。

(4) 储层条件下 CO₂ 密度(ρ_{CO_2t}): 在收集和推算得到研究区地温梯度和地压梯度的基础上, 取各储层的平均埋深值计算得到储层的温度和压力, 利用插值法求出各个储层中 CO₂ 的密度 (张川如等, 1999)。经插值法计算, 中央凹陷带新余组一段储层条件下 CO₂ 的密度取值 505.65 kg/m³, 莲荷组储层条件下 CO₂ 的密度取值 640.84 kg/m³, 河口组储层条件下 CO₂ 的密度取值 659.19 kg/m³; 北部斜坡带河口组储层条件下 CO₂ 的密度 601.38 kg/m³; 南部断阶带河口组储层条件下 CO₂ 的密度取值 487.12 kg/m³。

(5) 液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度(S_{CO_2t}): 根据 Holtz et al. (2003) 提出的经验公式 ($S_{CO_2t} = -0.3136 \times \ln(\phi) - 0.1334$) 计算。其中, ϕ 为各评价盆地储层平均孔隙度。结合各储层平均孔隙度的计算, 新余组一段液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度为 55.85%, 莲荷组的 CO₂ 的饱和度为 58.56%, 河口组的 CO₂ 的饱和度为 56.31%。

(6) 深部咸水层中 CO₂ 溶解度(R_{CO_2}): CO₂ 溶解度

是计算咸水层溶解封存量的关键参数, 其值是由储层压力、温度以及地层水共同决定, 采用插值法求取 (马永法等, 2022; 陈越等, 2024)。利用插值法计算结果可知: 中央凹陷带新余组一段储层中 CO₂ 溶解度为 0.771 0 mol/L, 莲荷组储层中 CO₂ 溶解度为 0.881 0 mol/L, 河口组储层中 CO₂ 的溶解度为 0.969 2 mol/L; 北部斜坡带河口组储层中 CO₂ 溶解度为 0.802 4 mol/L; 南部断阶带河口组储层中 CO₂ 溶解度为 0.725 0 mol/L。

(7) 初始地层水的平均密度(ρ^i): 研究区并无深部咸水层密度数据, 参考前人研究经验 (陈越等, 2024), 考虑咸水储层埋深条件, 统一取值为 1 050 kg/m³。

(8) 有效系数(E): 据相关文献资料和前人研究经验 (郭建强等, 2014; 张冰等, 2019), 针对盆地级别封存量预测, 取 0.024 为计算有效系数。

3.3 封存潜力评价

依据清江盆地构造划分情况 (图 2), 以盆地次一级构造中央凹陷带、北部斜坡带、南部断阶带为计算单元。根据咸水储层分布情况, 中央凹陷带计算储层包括河口组、莲荷组和新余组一段, 北部斜坡带、南部断阶带仅计算河口组封存量。基于前文参数取值分析结果, 获取文中的计算参数取值 (表 1)。

评价结果显示, 清江盆地中央凹陷带深部咸水层 CO₂ 理论封存量为 133.13×10⁸ t, 有效封存量为 3.19×10⁸ t。其中, 河口组和新余组一段封存量相当, 明显高于莲荷组封存量; 北部斜坡带 CO₂ 理论封存量为 19.71×10⁸ t, 有效封存量为 0.47×10⁸ t; 南部断阶带 CO₂ 理论封存量为 10.91×10⁸ t, 有效封存量为 0.26×10⁸ t。清江盆地深部咸水层封存潜力较大, 总体 CO₂ 理论封存量达到 163.75×10⁸ t, 有效封存量为 3.92×10⁸ t, 中央凹陷带深部咸水层 CO₂ 有效封存量最高, 其次为北部斜坡带和南部断阶带 (表 2, 图 10)。

由于清江盆地深部钻孔较少, 笔者主要基于浅部钻孔、地表样品测试参数开展了深部咸水层 CO₂ 地质封存潜力预测, 部分参数通过经验公式或前人研究经验进行取值, 其评估精度还需进一步提高。但考虑到清江盆地总体构造相对简单, 主要咸水储层以层状展布, 采取的储层参数具备一定代表性, 潜力预测结果能够为江西地质碳汇研究提供较好的参考意义。

4 结论

(1) 清江盆地深部发育两套适宜的 CO₂ 封存储盖

表 1 清江盆地深部咸水储层 CO₂ 封存量计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for CO₂ storage of the deep saline reservoirs in the Qingjiang basin

次级构造单元	储层	储层面积(km ²)	储层有效厚度(m)	平均孔隙度(%)	液流逆流后被圈闭的CO ₂ 的饱和度(%)	储层条件下CO ₂ 密度(kg·m ⁻³)	初始地层水平均密度(kg·m ⁻³)	CO ₂ 在地层咸水层溶解度(mol·kg ⁻¹)
中央凹陷带	河口组	1 612	80	10.85	56.31	659.19	1 050	0.969
	莲荷组		40	10.10	58.56	640.84	1 050	0.881
	新余组一段		100	11.01	55.85	505.65	1 050	0.771
北部斜坡带	河口组	640	80	10.85	56.31	601.38	1 050	0.802
南部断阶带	河口组	435	80	10.85	56.31	487.12	1 050	0.725

表 2 清江盆地深部咸水层 CO₂ 封存量

Tab. 2 CO₂ storage scale of deep saline aquifers in the Qingjiang basin

次级构造单元	储层	束缚储存量(10 ⁸ t)	溶解封存量(10 ⁸ t)	理论封存量(10 ⁸ t)	有效封存量(10 ⁸ t)
中央凹陷带	河口组	51.94	2.74	54.68	1.31
	莲荷组	24.44	1.10	25.54	0.61
	新余组一段	50.12	2.79	52.91	1.27
北部斜坡带	河口组	18.81	0.90	19.71	0.47
南部断阶带	河口组	10.36	0.55	10.91	0.26
合计		155.67	8.08	163.75	3.92

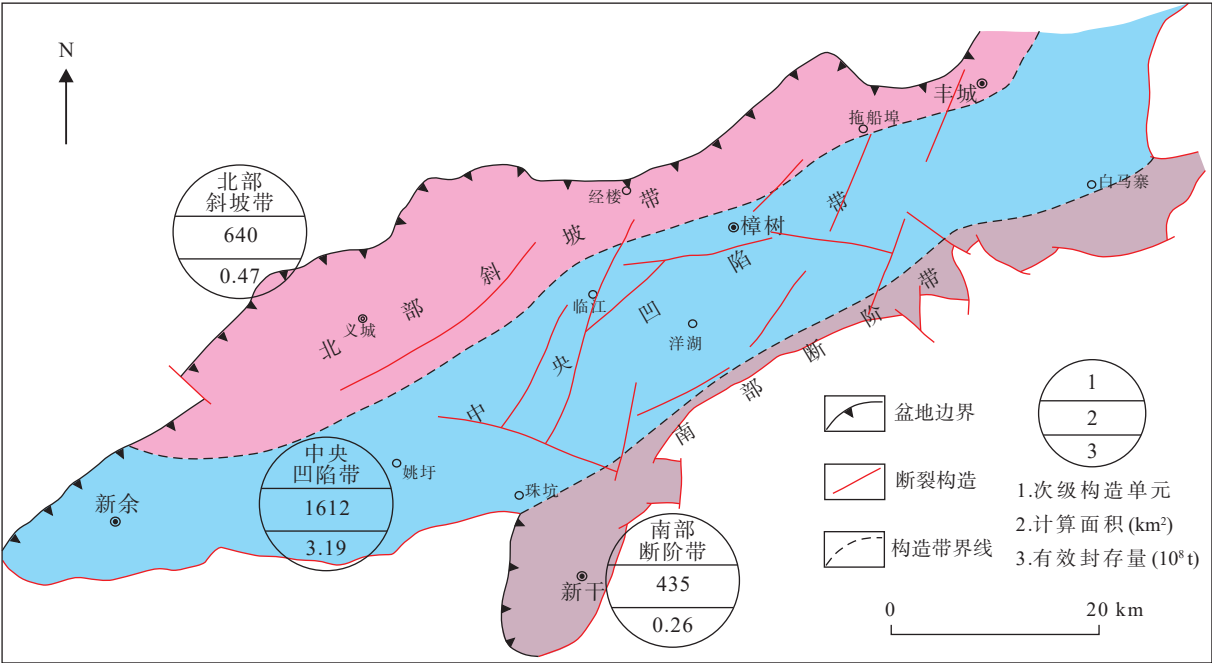


图10 清江盆地 CO₂ 封存潜力分布

Fig. 10 CO₂ storage potential distribution of the Qingjiang basin

组合:白垩系河口组砂砾岩储层和塘边组泥质岩类盖层,白垩系莲荷组、古近系新余组一段砂砾岩储层和新余组二、三、四段含膏岩泥质岩类盖层。

(2)清江盆地白垩系河口组、莲荷组和古近系新余组一段岩性和矿物组成条件较好,具有较高的孔隙度和渗透率;白垩系塘边组和新余组二、三、四段具

有岩性致密、孔渗性低、突破压力较大的特点, 是良好的封盖层。盆地主控断裂在盆地形成后对地层变形无较大影响, 次级断裂发育规模、断距均不大, 总体上认为断层对 CO₂ 封存影响较小。地下水动力微弱, 具备水力封堵作用, 与地表水源无水力联系。大地热流值和地温梯度均显示清江盆地为次冷盆地, 且盆地周缘碳源条件良好。因此, 清江盆地深部咸水层是 CO₂ 地质封存的理想场地。

(3) 清江盆地深部咸水层 CO₂ 有效封存容量为 3.93×10^8 t。其中, 中央凹陷带有效封存量为 3.20×10^8 t, 北部斜坡带为 0.47×10^8 t, 南部断阶带为 0.26×10^8 t。总体封存潜力较大, 可为赣北环鄱阳湖经济圈碳减排提供充足的处置空间。

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):

- 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)—中国 CCUS 路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- 陈全红. 鄂尔多斯盆地上古生界沉积体系及油气富集规律研究 [D]. 西安: 西北大学, 2007.
- CHEN Quanhong. Research on sedimentary systems and hydrocarbons enrichment of the Upper Palaeozoic of the Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- 陈越, 杨娇娇, 李雪, 等. 浙东沿海典型沉积盆地 CO₂ 地质封存潜力与试点意义分析—以长河盆地为例 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(8): 1–11.
- CHEN Yue, YANG Jiaojiao, LI Xue, et al. Potential and pilot significance of CO₂ geological storage in typical sedimentary basin along east Zhejiang coast, China: a case study in Changhe Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 1–11.
- 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 等. 深部咸水层二氧化碳地质储库场址选址储盖层评价 [J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2422–2428.
- DIAO Yujie, ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, et al. Reservoir and caprock evaluation of CO₂ geological storage site selection in deep saline aquifers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2422–2428.
- 刁玉杰, 刘廷, 魏宁, 等. 咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路 [J]. 中国地质, 2023, 50(3): 943–951.
- DIAO Yujie, LIU Ting, WEI Ning, et al. Classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storage in deep saline aquifers [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 943–951.
- 付晓飞, 吴桐, 吕延防, 等. 油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 454–471.
- FU Xiaofei, WU Tong, LV Yanfang, et al. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 454–471.
- 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 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, 2014.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版) [J]. 地球物理学报, 2001, (5): 611–626.
- HU Shengbiao, HE Lijuan, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, (5): 611–626.
- 江西省地质局九一五大队. 江西省清江拗陷浅部石油地质普查工作初步总结 [R]. 江西省地质局九一五大队, 1973.
- 江西省统计局. 江西统计年鉴 (2023) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- 柳江波, 吴海龙, 余庆贵, 等. 清江幅 1: 20 万区域水文地质普查报告 [R]. 江西省地质局水文地质大队, 1980.
- 刘廷, 马鑫, 刁玉杰, 等. 国内外 CO₂ 地质封存潜力评价方法研究现状 [J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 101–108.
- LIU Ting, MA Xin, DIAO Yujie, et al. Research status of CO₂ geological storage potential evaluation methods at home and abroad [J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 101–108.
- 罗文煌, 姚淇. 江西省清江岩盐矿床地质特征与成盐机理 [J]. 东华理工学院学报, 2006, (S1): 121–126.
- LUO Wenhua, YAO Qi. The geological characteristics Qingjiang halite deposit and its forming mechanism in Jiangxi Province [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, (S1): 121–126.
- 马永法, 周学军, 董俊领, 等. 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, 2022, 49(6): 179–189.
- MA Yongfa, ZHOU Xuejun, DONG Junling, et al. Geological storage conditions and potential assessment of CO₂ in deep saline aquifers in Lindian of Heilongjiang Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 179–189.
- 桑树勋, 刘世奇, 王文峰, 等. 深部煤层 CO₂ 地质存储与煤层气强化开发有效性理论及评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 403–435.
- 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1430–1451.
- SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430–1451.
- 沈平平, 廖新维. 二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- 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.

- 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.
- 吴根耀. 白垩纪: 中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J]. 中国地质, 2006, (1): 64–77.
- WU Genyao. Cretaceous: A key transition period of the plate tectonic evolution in China and its adjacent areas[J]. Geology in China, 2006, (1): 64–77.
- 吴庆华, 蔺文静, 梁继运, 等. 我国主要沉积盆地 CO₂ 地质储存的地热条件适宜性评价[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 132–136+144.
- WU Qinghua, LIN Wenjing, LIANG Jiyun, et al. Assessment of the suitability of geological storage of CO₂ according to geothermal conditions of sedimentary basins in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 132–136+144.
- 肖富强, 章双龙, 夏为平, 等. 江西省中生代沉积盆地 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.
- 熊鹏飞, 方小宇, 乐文喜, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷咸水层 CO₂ 地质封存储盖优选及潜力评估[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2405–2413.
- XIONG Pengfei, FANG Xiaoyu, LE Wenxi, et al. Reservoir-cap combination optimization and potential evaluation of CO₂ geological storage in saline aquifer, in Wenxinan sag of Beibu Gulf Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2405–2413.
- 肖富强, 夏为平, 肖卫东, 等. 江西丰城矿区二叠系乐平组 B4 煤层气地质条件与勘探前景[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2025, 48(2): 142–154.
- XIAO Fuqiang, XIA Weiping, XIAO Weidong, et al. Geological Conditions and Exploration Prospects of CBM in B4 Coal Seam of Permian Leping Formation in Fengcheng mining area, Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2025, 48(2): 142–154.
- 张冰, 梁凯强, 王维波, 等. 鄂尔多斯盆地深部咸水层 CO₂ 有效地质封存潜力评价[J]. 非常规油气, 2019, 6(3): 15–20.
- ZHANG Bing, LIANG Kaiqiang, WANG Weibo, et al. Evaluation of Effective CO₂ Geological Sequestration Potential of Deep Saline Aquifer in Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(3): 15–20.
- 张川如, 虞绍永. 二氧化碳气井测试与评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- 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, 2012, 23(1): 73–77.
- ZHANG Xiaopu, YU Kaining, LI Wen. Suitability evaluation of storing CO₂ in the deep saline aquifers of the Ordos Region[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(1): 73–77.
- 张森琦, 刁玉杰, 程旭学, 等. 二氧化碳地质储存逃逸通道及环境监测研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1251–1261.
- ZHANG Senqi, DIAO Yujie, CHENG Xuxue, et al. CO₂ Geological Storage Leakage Routes and Environment Monitoring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1251–1261.
- 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.
- 朱如凯, 吴松涛, 崔景伟, 等. 油气储层中孔隙尺寸分级评价的讨论[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 133–144.
- ZHU Rukai, WU Songtao, CUI Jingwei, et al. Classification and evaluation of pore size in oil & gas reservoir rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 133–144.
- 朱子恒, 任众鑫, 王照周, 等. 苏北盆地刘庄储气库密封性评价研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(5): 805–813.
- ZHU Ziheng, REN Zhongxin, WANG Zhaozhou, et al. Sealing evaluation of Liuzhuang UGS in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(5): 805–813.
- 宗师, 刘世奇, 徐辉, 等. 苏北盆地层状盐穴储气库 CO₂ 封存数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 27–36.
- ZONG Shi, LIU Shiqi, XU Hui, et al. Numerical simulation of CO₂ storage in bedded salt rock storage cavern in Subei Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(3): 27–36.
- 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.
- CSLF. Estimation of CO₂ Storage Capacity in Geological Media - Phase II Report[R]. CSLF, 2007.
- Holtz M H. Optimization of CO₂ sequestered as a residual phase in brine-saturated formations[C]. Second Annual Conference on Carbon Sequestration: Developing & validating the technology base to reduce carbon intensity. Alexandria Virginia: GCCC Digital Publication, 2003.
- IEA. CO₂ Emissions in 2023 [M]. International Energy Agency, 2024.
- IPCC. Global warming of 1.5 °C (SR1.5) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- Li X C, Ohsumia T, Koide H, et al. Near-future perspective of CO₂ aquifer storage in Japan: site selection and capacity[J]. Energy, 2005, 30(11–12): 2360–2369.
- Luo J S, Xie Y C, Hou M Z, et al. Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage[J]. Energy Reviews, 2023, 2: 100016.
- USDOE. Carbon sequestration atlas of the United States and Canada: Appendix A - Methodology for development of carbon sequestration capacity estimates [R]. USDOE, 2006.