



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2024034

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2024034

江西省中生代沉积盆地 CO₂ 地质储存 潜力及适宜性评价

肖富强^{1,2,3}, 章双龙^{2,3}, 夏为平¹, 陈富贵¹, 祁星¹, 肖卫东¹, 邹勇军^{1,2,3,*}

(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)

摘要: 在当前碳达峰、碳中和背景下, CO₂ 地质储存被认为是降碳减排、减缓温室效应最直接、最有效的办法。笔者聚焦江西省 CO₂ 减排需求, 以江西省内发育的 9 个重点中生代沉积盆地为研究对象。采用碳封存领导人论坛 (CSLF) 提出的方法, 计算得出江西省中生代沉积盆地 CO₂ 有效储量为 $18\,226.3 \times 10^6$ t, 束缚气储存机理有效储量为 $16\,869 \times 10^6$ t, 溶解气储存机理有效储量为 $1\,357.3 \times 10^6$ t。构建了以地质安全性、储存规模、社会经济性为核心, 涵盖 19 项评价指标的 CO₂ 地质储存潜力适宜性综合评价指标体系, 并引入变异系数法-综合评价模型, 客观地评价江西省中生代 CO₂ 地质储存潜力及其适宜性。评价结果显示, 江西省 CO₂ 地质储存适宜性优先顺序分别为: 鄱阳盆地、清江盆地、信江盆地、抚州盆地、赣州盆地、锦江盆地、吉泰盆地、版石盆地和会昌盆地。其中, 鄱阳盆地、清江盆地储存潜力分别达到适宜、较适宜等级。

关键词: 江西省; 沉积盆地; CO₂; 储存潜力; 适宜性评价

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0326-12

Carbon Dioxide Geological Storage Potential and Suitability Evaluation of Mesozoic-Cenozoic Sedimentary Basin in Jiangxi Province

XIAO Fuqiang^{1,2,3}, ZHANG Shuanglong^{2,3}, XIA Weiping¹, CHEN Fugui¹, QI Xing¹, XIAO Weidong¹, ZOU Yongjun^{1,2,3,*}

(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)

Abstract: Under the current background of carbon peaking and carbon neutrality, carbon dioxide geological

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-08-29; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 江西省地质局科技研究项目“清江盆地二氧化碳封存地质条件及关键评价技术研究”(2023JXDZKJKY05), 江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目“江西省会昌盆地氦气资源调查研究”(2022JXDZKJRC05), 江西省地质调查勘查院地质环境监测所科研项目“典型含煤构造单元与中生代盆地二氧化碳地质封存适宜性评价”(2022SDDYDHS01)联合资助。

作者简介: 肖富强(1989-), 男, 高级工程师, 从事油气地质、矿产地质勘查研究工作。E-mail: 910284784@qq.com。

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

storage is considered to be the most direct and effective way to reduce carbon emissions and mitigate the greenhouse effect. This paper focuses on the carbon dioxide emission reduction demand of Jiangxi Province, and takes 9 key Mesozoic and Cenozoic sedimentary basin developed in Jiangxi Province as the research object. Adopting the approach proposed by the Carbon Storage Leadership Forum (CSLF), it is calculated that the effective storage of carbon dioxide in the Mesozoic Cenozoic sedimentary basin in Jiangxi Province is $18\,226.3 \times 10^6$ t; the effective storage capacity of the bound gas storage mechanism is $16\,869 \times 10^6$ t; the effective storage capacity of dissolved gas storage mechanism is $1\,357.3 \times 10^6$ t. It has established a comprehensive evaluation index system for the suitability of carbon dioxide geological storage potential, with geological safety, storage scale, and socio-economic benefits as the core, covering 19 evaluation indicators, And introduce the coefficient of variation method-comprehensive evaluation model to objectively evaluate the geological storage potential and suitability of CO₂ in the Mesozoic and Cenozoic in Jiangxi Province. The evaluation results show that the priority order of CO₂ geological storage suitability in Jiangxi Province is as follows: Poyang basin, Qingjiang basin, Xinjiang basin, Fuzhou basin, Ganzhou basin, Jinjiang basin, Jitai basin, Banshi basin, and Huichang basin. Among them, the storage potential of Poyang basin and Qingjiang basin has reached suitable and relatively suitable levels, respectively.

Keywords: Jiangxi Province; sedimentary basin; carbon dioxide; storage potential; suitability evaluation

进入 21 世纪以来,人类社会经济的高速发展和全球工业化的不断推进,煤炭、石油等化石能源消耗量逐年增加,随之而来的是全球 CO₂ 排放日益增加,大气中 CO₂ 浓度已经从工业革命前的 280×10^{-6} 增长到近期的 400×10^{-6} 以上,并且增长速度还在持续加快(刘宁, 2018; 袁志刚, 2021)。国际能源署(IEA, 2022)最新报告显示,2021 年全球 CO₂ 排放量达到 363 亿 t; 中国的 CO₂ 排放占全球约三分之一,达到 119 亿 t,位居世界第一,面临巨大的碳减排压力。绿色、低碳是中国当前经济持续健康发展的战略和目标。

CO₂ 捕集、利用与封存(CCUS)技术作为一项碳减排技术,被认为是当前或今后较长一段时间内,有效缓解全球气候变化和减少 CO₂ 排放的新兴技术之一(米剑锋等, 2019; 刘廷等, 2021; 孙腾民等, 2021; 桑树勋等, 2022a)。CO₂ 地质封存是指将工业生产中排放的 CO₂ 气体,通过一定的技术手段收集起来,并将其注入到地下一定深处且封闭性好的地层或构造圈闭中储存起来(张洪涛等, 2005)。欧美国家的成功经验也表明,CO₂ 地质封存是减少 CO₂ 排放最直接、有效的措施(李海燕等, 2013)。可用于 CO₂ 地质封存的场地主要有沉积盆地深部咸水层、枯竭油气藏、深部不可采煤层等(Shuklar et al., 2010; 李甫成等, 2014; 刘廷等, 2021),此外 CO₂ 与自然界中碳酸盐、硅酸盐矿物发生化学反应而固化也被认为是有效封存手段(王国强等, 2023)。张森琦等(2011)研究发现,沉积盆地深部咸水

层的储存潜力巨大,远远大于其他储存介质,是实现 CO₂ 规模化地质储存的主要目标。目前,世界上部署的 CCUS 项目超过 400 个(含运行、在建及规划项目),主要集中在分布于欧洲、北美、澳大利亚及中国等地(桑树勋等, 2022b)。挪威是世界上最早实施地下咸水层封存 CO₂ 的国家,其北海 Sleipner 项目自 1996 年开始每年将百万吨 CO₂ 注入海底地层中,至今未发生泄露,奠定了深部咸水层封存技术的可行性(郭建强等, 2014a)。国内通过积极探索研究,目前已开展了一系列 CCUS 示范项目工程实践(刘廷等, 2021),并取得了相关技术理论和实践突破,获得了广泛关注。例如,中石化胜利油田 CCUS 全流程示范工程、神华集团鄂尔多斯咸水层 CO₂ 封存示范工程、山西沁水盆地 CO₂-ECBM 示范工程等(Sun et al., 2018; 桑树勋等, 2022b)。

国内外许多学者对于沉积盆地深部咸水层 CO₂ 地质储存潜力提出了不同的评价体系和评价方法。Bachu 等(2003)建立了一套包括 15 个指标的盆地级别评价指标体系(范基姣等, 2011); 沈平等(2009)建立了包括 25 个指标、5 个层次的评价指标体系; 郭建强等(2014a)在借鉴前人研究基础和充分考虑中国复杂地质背景基础上,提出将中国 CO₂ 地质储存划分为 5 个阶段,针对盆地级 CO₂ 储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-综合评分的适宜性评价方法。中国地质调查局水文地质环境地质调查中心于 2014 年完成了全国主要大型

沉积盆地的 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价(郭建强等, 2014b), 安徽、广西、四川、内蒙古等省区近年来陆续完成了省域内 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价工作。

据《江西统计年鉴(2022)》(江西省统计局, 2023)数据, 江西省能源消费是以煤炭为主的高碳化石能源, 2022 年能源消耗达 6 362 万 t 标准煤, 生态地质环境破坏严重, 碳减排压力巨大, 开展 CO₂ 储存潜力评价研究十分必要。江西省 CO₂ 地质储存评价工作起步较晚, 目前相关研究尚处于空白, 亟需通过系统、科学的研究评价, 预测省内沉积盆地 CO₂ 储存潜力。根据江西省区域地质志(江西省地质局, 2017)对省内中新世沉积盆地的划分方案, 综合考虑盆地地质背景、构造条件、以往地质工作程度等因素, 选取江西省内发育的 9 处重点中新世沉积盆地为评价对象, 计算 CO₂ 有效封存潜力, 开展 CO₂ 地质储存适宜性评价, 优选江西省 CO₂ 地质储存潜力区, 以期为江西省绿色低碳经济高质量发展提供地质解决方案。

1 研究区地质概况

江西省位于中国东南部, 属长江中下游地区, 面积 16.69 万 km²。省内总体以丘陵、山地、平原地貌为主, 地势南高北低, 为亚热带暖湿季风气候。江西位于欧亚板块东南部, 大地构造上跨越下扬子、华夏两个古板块(肖富强等, 2020; 邹勇军等, 2022)及钦杭结合带(图 1)。自白垩纪以来, 进入地壳伸展期, 省内普遍发生强烈的断陷作用, 为主要断陷成盆期。中新世沉积盆地广泛分布, 多达 20 余个, 总面积约为 35 000 km², 约占省域面积的 20%。

江西中新世沉积盆地主要发育白垩纪、古近纪地层, 岩性以红色碎屑岩为主, 俗称“红层”, 包括白垩纪冷水坞组、赣州群(茅店组、周田组)、龟峰群(河口组、塘边组、莲荷组)以及古近纪新余组、临江组。盆地构造形式通常为断陷盆地, 其演化过程一般经历了成型-发展-封闭阶段, 相应的沉积相一般经历山麓堆积-湖泊-河流相的演变过程, 形成了沉积盆地内岩石粗-细-粗的粒序组合, 既有适于 CO₂ 的地质储层, 也有岩性致密的区域性盖层, 表明江西省中新世沉积盆地具备 CO₂ 地质储存的基础条件(图 2)。

1.1 储层

冷水坞组(K₁l): 分布于鄱阳、抚州、信江、版石等盆地, 岩性为杂色含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩组

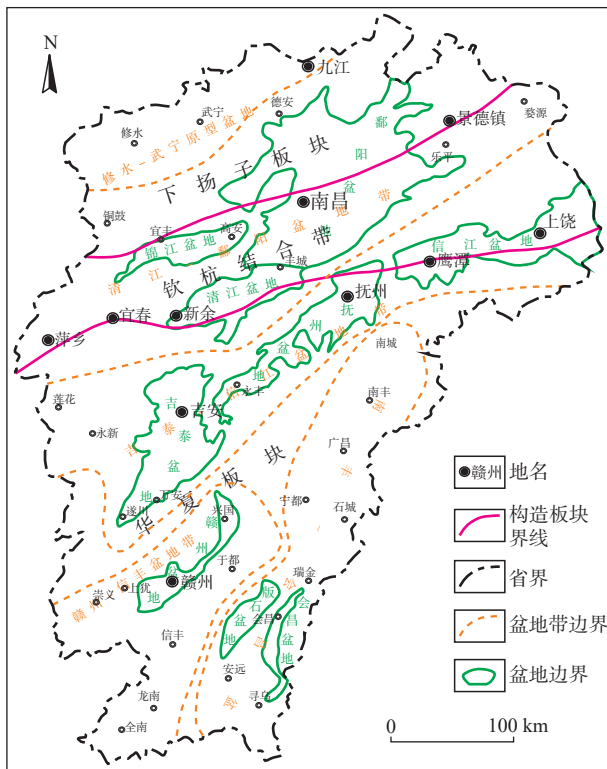


图1 江西省中新世沉积盆地分布图

Fig. 1 Distribution of Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins in Jiangxi Province

成的韵律层, 为河湖相沉积, 厚度为 100~1 500 m。

茅店组(K₂m): 广泛分布于江西省内中新世盆地, 以紫红色砾岩、砂岩为主, 夹少量砂岩、粉砂岩、泥岩, 为河流冲积成因, 厚度为 200~2 000 m。

河口组(K₂h): 分布于江西省内各沉积盆地, 岩性以砖红色、紫红色复成分砾岩、砂砾岩、含砾砂岩为主体, 为间歇性河流冲积成因, 厚度为 200~2 000 m。

莲荷组(K₂l): 分布于鄱阳、清江、吉泰、抚州、信江等盆地, 岩性为砖红或紫红色砾岩、砂砾岩夹砂岩、粉砂岩, 为河流冲积成因, 厚度为 100~1 000 m。

新余组一段(E₁₋₂x¹): 主要分布于清江盆地, 岩性为紫红色、灰绿色含砾砂岩、砂岩, 为山麓堆积成因, 厚度为 1 000 m。

1.2 盖层

周田组(K₂z): 广泛分布于各中新世盆地, 岩性以紫红色含钙泥岩、含钙粉砂岩, 夹石膏层、岩盐层, 为湖盆相沉积, 厚度为 200~500 m。

塘边组(K₂t): 主要分布于鄱阳、清江、吉泰、抚州和信江等盆地, 岩性以紫红色粉砂岩、泥岩为主体, 夹含石膏层, 为滨浅湖沉积, 厚度为 200~1 800 m。

新余组(E₁₋₂x): 中上部为致密地层, 岩性为灰、灰



1. 复成分砾岩; 2. 砾岩; 3. 砂砾岩; 4. 泥岩; 5. 粉砂质泥岩; 6. 钙质砂岩; 7. 泥岩; 8. 砂岩; 9. 膏岩; 10. 储层; 11. 盖层

图2 江西省中新生代盆地地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphy histogram of Mesozoic and Cenozoic basins in Jiangxi Province

黑色粉砂岩、泥岩,含有著名的“清江岩盐层”,湖泊相沉积,厚度>600 m。

2 CO₂地质储存潜力估算

沉积盆地深部含水层中 CO₂ 地质储存机理包括:构造地层封存机理、束缚气封存机理、溶解封存机理、矿物封存机理、水动力封存机理 5 种(郭建强等, 2014a; 杨红等, 2019)。CO₂ 地质储存潜力计算方法是基于地质储存机理、地质储存时间尺度的假设。目前,国际上通用的储存潜力计算方法主要包括欧盟(EU)、美国能源部(USDOE)、碳封存领导人论坛(CSLF)提出的计算方法及 Ecofy 法等(孙腾民等, 2021)。

2.1 计算公式

笔者针对江西省内中新世沉积盆地 CO₂ 地质储存潜力,采用碳封存领导人论坛(CSLF)提出的潜力计算方法,该方法认为沉积盆地深部含水层 CO₂ 储存潜力主要考虑束缚气封存和溶解封存机理(沈平等, 2009; 张冰等, 2019; 杨红等, 2019)。该方法可以形象概括为,在仅考虑最终理想状态下,沉积盆地深部储层中一部分孔隙空间用于束缚 CO₂ 流体,而另一部分孔隙空间则被溶解 CO₂ 的地层水占据。

(1) 束缚气理论储存量

注入盆地深部储层的一部分 CO₂ 在储层中运移时,由于 CO₂ 的表面张力和岩层毛细管力的作用,使得 CO₂ 被圈闭在岩石的缝隙中,称为束缚气封存机理。通常束缚气体封存与溶解封存相结合,才会将储存在岩石的 CO₂ 最终埋存在地下。计算公式如下:

$$M_{CO_2tr} = \Delta V_{trap} \times \varphi \times S_{CO_2t} \times \rho_{CO_2t} / 10^3 = A \times H \times \varphi \times S_{CO_2t} \times \rho_{CO_2t} / 10^3 \quad (1)$$

式中: M_{CO_2tr} 表示 CO₂ 在沉积盆地深部含水层中束缚气储存潜力理论值,单位为 10⁶ t; ΔV_{trap} 表示原先被 CO₂ 饱和后被水浸入的岩石体积,该参数可理解为沉积盆地内整个储层的体积,由储层发育面积和平均有效厚度计算,单位为 10⁶ m³; A 表示深部储层的分布面积,单位为 km²; H 表示深部储层的平均厚度,单位为 m; φ 表示深部储层岩石的孔隙度,单位为 %; S_{CO_2t} 表示液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度(据公式 $S_{CO_2t} = -0.3136 \times \ln(\varphi) - 0.1334$ 计算),单位为 %; ρ_{CO_2t} 表示在盆地储层条件下 CO₂ 的密度,单位为 kg/m³。

(2) 溶解气理论储存量

当 CO₂ 在储层多孔介质中运移时,CO₂ 气体或超临界流体在沉积盆地深部含水层中的溶解,称为溶解储存机理。溶解量的大小与储层的温度、压力等因素有关。计算公式如下:

$$M_{CO_2td} = A \times H \times \varphi \times (\rho^s X_s^{CO_2} - \rho^i X_i^{CO_2}) \times (1 - S_{CO_2t}) / 10^3 \approx A \times H \times \varphi \times \rho^i \times R_{CO_2} \times M_{CO_2} \times (1 - S_{CO_2t}) / 10^3 \quad (2)$$

式中: M_{CO_2td} 表示 CO₂ 在沉积盆地中溶解储存潜力理论值,单位为 10⁶ t; ρ^s 表示地层水被 CO₂ 饱和时的平均密度,单位为 kg/m³; ρ^i 表示初始的地层水的平均密度,单位为 kg/m³; $X_s^{CO_2}$ 表示地层水被 CO₂ 饱和时的 CO₂ 占地层水中的平均质量分数,单位为 %; $X_i^{CO_2}$ 表示原始 CO₂ 占地层水中的平均质量分数,单位为 %; R_{CO_2} 表示 CO₂ 在地层水溶解度,单位为 mol/kg; M_{CO_2} 表示 CO₂ 的摩尔质量,单位为 0.044 kg/mol。 S_{CO_2t} 表示液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度,单位为 %。

(3) 有效储存容量

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

式中: M_{CO_2} 表示 CO₂ 在沉积盆地储存潜力有效值,单位为 10⁶ t; C_e 表示 CO₂ 地质储存潜力有效系数,无量纲,对盆地级别储存潜力估算取值为 0.024。

2.2 储存潜力

基于本次评价的江西省内 9 个中新世沉积盆地的基本地质属性和主要储层物性参数,为了简化计算流程,对相关参数取值作如下假设:①盆地计算面积(A)以主要储层分布面积为准。②储层厚度(H)按沉积盆地内发育的各套储层平均有效厚度计。③孔隙度(φ)根据沉积盆地各储层的统计数据取平均值。④储层条件下 CO₂ 的密度(ρ_{CO_2t})、CO₂ 在地层水溶解度(R_{CO_2})在沉积盆地推测地层温度和压力的基础上,利用插值法求取。

经计算,按束缚气储存机理(表 1),江西省中新世沉积盆地的 CO₂ 有效储存量为 16 869×10⁶ t,鄱阳盆地和清江盆地储存量最大,分别达到 12 166×10⁶ t 和 2 357×10⁶ t;按溶解气储存机理(表 2),江西省中新世沉积盆地的 CO₂ 有效储存量为 1 357.3×10⁶ t,鄱阳盆地和清江盆地储存量分别达到 1 059×10⁶ t 和 177×10⁶ t。

总体来看,江西省中新世沉积盆地 CO₂ 有效储存量为 18 226.3×10⁶ t,束缚气储存量占比为 92.6%,溶解气储存量占比为 7.4%。不同沉积盆地之间,有效储存总量差异较大(图 3)。以鄱阳盆地 CO₂ 有效储存潜力最高,达到 13 225×10⁶ t。其次为清江盆地,有效储

表 1 江西省中新生代沉积盆地束缚气有效储量计算参数及结果

Tab. 1 Calculation parameters and results of effective bound gas storage in Mesozoic–Cenozoic sedimentary basins of Jiangxi Province

盆地	液流逆流后被圈闭的 CO ₂ 的饱和度 (%)	沉积盆地内整合被个储层的体积被 (10 ⁶ m ³)	储层平均被孔隙度 (%)	储层条件下 CO ₂ 被的密度 (kg/m ³)	束缚气有效被储量 (10 ⁶ t)
鄱阳盆地	42.54	9 825 600	16.83	720.54	12 166
清江盆地	47.03	2 362 780	14.59	596.54	2 357
吉泰盆地	55.20	802 186	11.24	610.16	719
锦江盆地	59.89	392 700	9.68	360.54	197
信江盆地	62.28	734 040	8.98	595.48	584
抚州盆地	53.20	648 000	11.98	617.60	612
赣州盆地	68.48	266 900	7.36	536.80	173
版石盆地	62.24	11 000	8.14	287.99	4
会昌盆地	55.06	60 040	11.29	640.84	57
合计					16 869

表 2 江西省中新生代沉积盆地溶解气有效储量计算参数及结果

Tab. 2 Calculation parameters and results of effective storage of dissolved gas in Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins of Jiangxi Province

盆地	盆地面积 (km ²)	储层厚度 (m)	CO ₂ 在地层水溶解度 (mol/kg)	初始的地层水的平均密度 (kg/m ³)	溶解气有效储量 (10 ⁶ t)
鄱阳盆地	10 680	920	1.019 6	1 035	1 059
清江盆地	2 780	850	0.870 2	1 030	177
吉泰盆地	2 570	312	0.969 5	1 030	41
锦江盆地	1 870	210	0.860 9	1 015	14
信江盆地	2 166	340	0.786 0	1 017.5	21
抚州盆地	2 880	225	0.921 4	1 030	36
赣州盆地	1 570	170	0.873 4	1 030	6
版石盆地	110	100	0.732 7	1 010	0.3
会昌盆地	240	250	0.881 6	1 025	3
合计					1 357.3

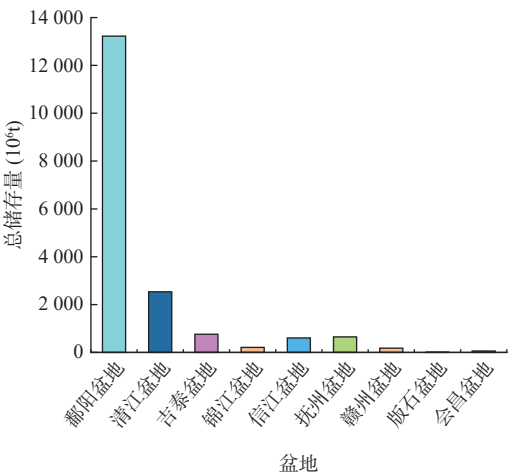


图3 CO₂ 有效储量分布柱状图

Fig. 3 Distribution histogram of effective carbon dioxide storage capacity

存潜力为 $2\,534 \times 10^6$ t。吉泰盆地、信江盆地、抚州盆地储存潜力相当。会昌盆地、版石盆地 CO₂ 储存潜力最小, 分别为 60×10^6 t 和 4.3×10^6 t。

3 评价指标与方法模型

3.1 评价指标体系

根据江西省中新生代盆地发育特征, 在前人研究基础上(沈平等, 2009; 张森琦等, 2011; 刁玉杰等, 2011; 王齐鑫等, 2017), 基于 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价总体目标, 综合考虑影响 CO₂ 地质储存潜力的各项因素, 建立了适于江西中新生代盆地地质特征, 以地质安全性、储存规模、社会经济性为评价指标层的综合评价体系(图 4)。

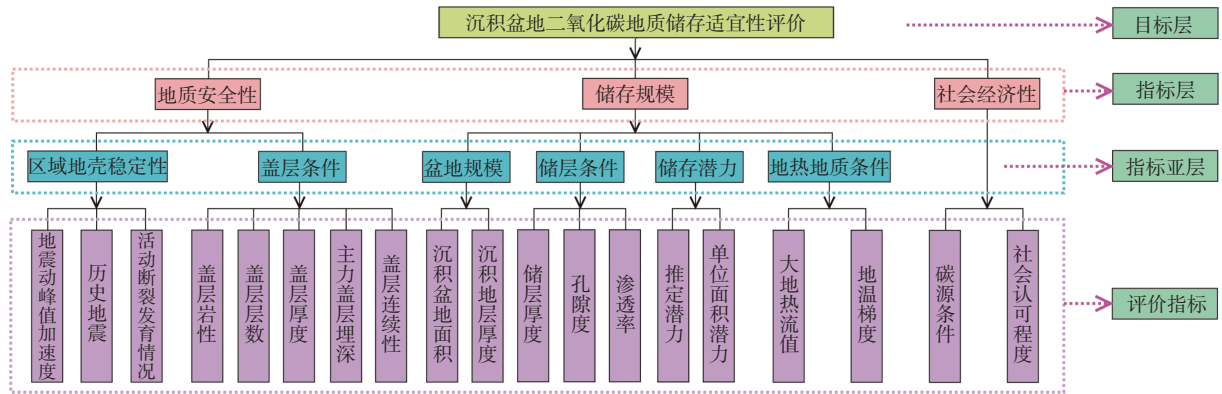


图4 评价指标体系

Fig. 4 Evaluation index system

地质安全性是实现规模化 CO₂ 地质储存的首要前提,是保证埋藏在地下的 CO₂ 长期稳定封存的基础条件,包括区域地壳稳定性和盖层条件两个评价指标亚层。区域地壳稳定性由地震动峰值加速度、历史地震、活动断裂发育情况等指标评价(张森琦等, 2011)。盖层条件主要指的是盖层的封闭性能,盖层条件越好,反映更好的构造条件,则封存越安全(郭建强等, 2014a)。

储存规模是影响沉积盆地 CO₂ 地质储存潜力的最主要因素,影响储存规模的条件有盆地规模、储层条件、储存潜力、地热地质条件 4 项(张森琦等, 2011)。盆地规模、储层条件与储存潜力指标,均为影响沉积盆地 CO₂ 储存潜力的正向指标,直接决定了 CO₂ 的储存潜力。地热地质条件包含大地热流值和地温梯度,二者对盆地 CO₂ 储存能力、相态以及流动状态都有很大影响,较低的大地热流值和地温梯度能使 CO₂ 在较小的深度下达到较高的密度,有利于 CO₂ 的地质储存。

社会经济性指标是评价是否能够将 CO₂ 储存的生态效益转化为经济效益的重要衡量指标,包括碳源条件和社会认可程度。碳源条件的评价,可以理解为碳源规模越大、碳源密度越高,越有利于盆地 CO₂ 地质储存。社会认可程度主要是指地方政府和社会公众对于 CO₂ 地质储存工程的认可或支持程度,与地方的碳减排压力直接相关。

3.2 评价方法模型

对沉积盆地深部咸水层 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价常用方法为层次分析-综合评价法(郭建强等, 2014a)。层次分析法的应用基于研究者对评价对象和评价指标属性及其相对重要性有足够的了解,是一种较为主观的赋权方法。考虑到江西省 CO₂ 地质储存

适宜性评价工作基础薄弱,相关研究尚处于起步阶段,对各中新代盆地及其地质背景认识不足,采用层次分析法难以准确判断评价指标间的相对重要性。笔者引入客观赋权的变异系数法(王齐鑫等, 2017),采用变异系数-综合评价模型,客观地评价江西省中新代 CO₂ 地质储存潜力及其适宜性。

3.2.1 变异系数法

变异系数法的基本思路:在综合评价指标体系中,某项指标的变异程度较大,则应赋予较大的权重,反之,则赋予较小的权重(王齐鑫等, 2017)。变异系数法求解权重的步骤如下(储莎等, 2011):

①第 i 项指标评分均值 $\bar{x}_i$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (n: \text{评价对象个数}) \quad (4)$$

②第 i 项指标评分的均方差值 σ_i

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (5)$$

③变异系数 δ_i

$$\delta_i = \sigma_i / \bar{x}_i \quad (6)$$

④权重计算

$$\omega_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^m \delta_i} \quad (m: \text{评价指标个数}) \quad (7)$$

3.2.2 综合评价

综合考虑影响沉积盆地 CO₂ 储存潜力的各项指标,按下式,将各评价指标得分(p_i)与相应权重(ω_i)相乘后累加,即得到评价对象的综合评分。

$$P = \sum_{i=1}^m p_i \omega_i \quad (8)$$

按综合评价得分对各评价对象进行分档排序,优选出江西省 CO₂ 地质储存潜力区。

4 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价

4.1 评价流程

适宜性评价流程和算法的具体实施过程主要包括: ①基于已建立的沉积盆地评价指标体系构造评价矩阵。②对评价矩阵进行正向化和量化处理, 得到统一赋值的标准评价矩阵。③根据前述的变异系数法原理, 计算标准评价矩阵中各项评价指标权重。④采用综合评价方法, 计算各沉积盆地的综合得分, 通过对综合得分的优先排序实现对沉积盆地 CO₂ 地质储存潜力的适宜性评价(图 5)所示。

4.2 权重厘定

采用统一量化赋值的方式, 将每个评价指标按定性或定量原则划分为 5 个不同的评价等级, 分别为适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜、不适宜等评语, 分别对应 9~1 分的评分尺度, 正向指标参数越大或越好则越适宜, 负向指标参数越小或越差则越适宜, 建

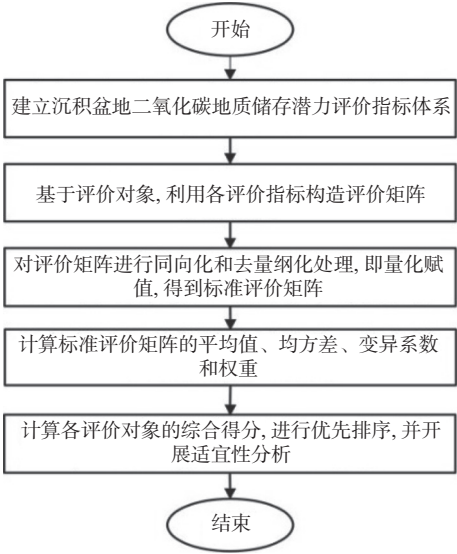


图5 评价流程图

Fig. 5 Evaluation flowchart

立由指标评分构成的标准评价矩阵。采用变异系数法, 经计算得出各指标层及评价指标的权重(表 3)。

由权重计算结果可知, 指标层中对 CO₂ 地质储存

表 3 评价指标权重表

Tab. 3 Evaluation index weight table

指标层	指标亚层	评价指标
地质安全性	区域地壳稳定性	地震动峰值加速度(g)
		历史地震(M)
		活动性断裂发育情况
	盖层条件	盖层岩性
		盖层层数
		盖层厚度(m)
		主力盖层埋深(m)
		盖层连续性
	盆地规模	盆地面积(km ²)
		地层厚度(m)
储存规模	储层条件	储层厚度(m)
		孔隙度(%)
		渗透率(mD)
	储存潜力	推定潜力(10 ⁸ t)
		单位面积潜力(10 ⁴ t/km ²)
	地热地质条件	大地热流值(mW/m ²)
		地温梯度(°C/100 m)
社会经济性	碳源条件	
	社会认可程度	

适宜性影响最大的是储存规模指标, 权重占比为 0.558, 其次为地质安全性指标, 权重占比为 0.340, 社会经济性指标权重占比最小, 为 0.102。

在指标亚层中, 储存潜力影响程度最大, 权重占比达到 0.285; 盖层条件次之, 权重占比为 0.204; 区域地壳稳定性、储层条件的权重占比也较大, 均达到 0.1 以上。

在具体评价指标层面, 推定潜力、单位面积潜力两个评价指标所占权重最大, 均在 0.1 以上。其次为活动性断裂发育情况、主力盖层埋深等指标, 权重占比均在 0.07 以上; 地温梯度、大地热流值、盖层岩性、盖层厚度等评价指标权重占比较小, 均在 0.03 以下。

4.3 评价结果与分析

4.3.1 评价结果

运用综合评价法, 将量化赋值得到的标准评价矩阵与各评价指标权重(表 3)相乘后累加, 即得到本次 CO₂ 地质储存潜力评价最终评价结果, 按综合评分进行优先级排序, 即实现对江西省中新生代盆地 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价(表 4, 图 6)。

表 4 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价结果

Tab. 4 Evaluation results of suitability for geological storage potential of carbon dioxide

盆地	综合得分	排名	适宜性等级
鄱阳盆地	8.532	1	适宜
清江盆地	7.511	2	较适宜
吉泰盆地	4.427	7	一般
锦江盆地	4.436	6	一般
信江盆地	5.115	3	一般
抚州盆地	5.076	4	一般
赣州盆地	4.543	5	一般
版石盆地	3.788	8	较不适宜
会昌盆地	3.421	9	较不适宜

注: 8~9为适宜, 6~8为较适宜, 4~6为一般适宜, 2~4为较不适宜, <2为不适宜。

鄱阳盆地综合评分为 8.532, 位列各评价盆地第 1, CO₂ 地质储存适宜性等级为适宜; 清江盆地综合评分为 7.511, 排名第 2, 适宜性等级为较适宜; 吉泰盆地、信江盆地、锦江盆地、抚州盆地、赣州盆地综合评分为 4~6, 适宜性等级均为一般适宜; 版石、会昌两个盆地综合评分均低于 4, 适宜性等级为较不适宜。

4.3.2 适宜性分析

由上述评价结果可知, 江西省中新生代沉积盆地

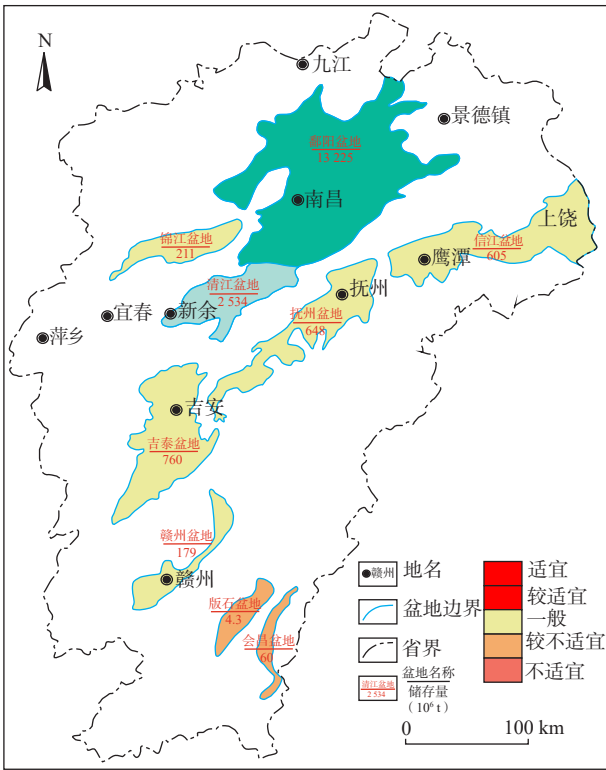


图 6 江西省中新生代沉积盆地二氧化碳地质储存适宜性评价图

Fig. 6 Evaluation map of geological storage suitability of carbon dioxide in Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins in Jiangxi Province

CO₂ 地质储存适宜性优先顺序分别为鄱阳盆地、清江盆地、信江盆地、抚州盆地、赣州盆地、锦江盆地、吉泰盆地、版石盆地、会昌盆地。鄱阳盆地、清江盆地储存潜力分别达到适宜、较适宜等级, 与郭建强等(2014b)研究评价结果基本吻合, 认为鄱阳、清江盆地最具 CO₂ 地质储存潜力。

鄱阳盆地位于江西省北部, 面积为 10 680 km², 沉积地层厚度达 5 000 m(黄孝波等, 2016), 盆地面积大, 是唯一达到中型规模的沉积盆地, 并且盆地内发育包括白垩纪冷水坞组、龟峰群、赣州群、古近纪新余组在内的多套储层(梁兴等, 2006), 初步统计其累计储层有效厚度可达 920 m, 储层平均孔隙度达到 16.83%, 平均渗透率为 32.8 mD, 达到中孔中渗水平, 封存潜力巨大。盆地位于赣北下扬子准地台, 无活动性断裂带发育, 总体构造环境稳定。以往地震、钻探资料(李尚儒等, 2016)解释表明, 鄱阳盆地白垩纪地层孕育诸多构造圈闭, 发育有多套岩性以泥岩为主的致密盖层, 累计厚度达千余米, 且连续稳定分布于构造圈闭中, 表明具有较好的保存条件。盆地主要为鄱阳湖

区,人口密度低,从地质安全性角度考虑,更适于 CO₂ 储存。盆地周边为环鄱阳湖经济带,为江西省内经济发展水平高、碳源条件好的区域。综上所述,鄱阳盆地从储存潜力、地质安全性及社会经济性3个方面均表现出较好的适宜性条件,故其 CO₂ 地质储存潜力适宜性程度最佳。

清江盆地位于江西省中部,为鄱阳盆地的南延部分,在大地构造上处于下扬子板块与华夏板块对接的钦杭结合带,是在燕山褶皱基底的基础上沿萍乡—广丰断裂带而形成的断陷盆地(杨吉根,1988)。盆地面积约为 3 600 km²,沉积地层厚度逾 4 000 m,主要发育白垩纪龟峰群、古近纪新余组,有效储层厚度达到 850 m,平均孔隙度为 14.37%,平均渗透率为 24.5 mD,储层物性条件较好,经计算的 CO₂ 理论储存量仅次于鄱阳盆地。清江盆地构造条件稳定,主力盖层新余组中部发育有大段含膏盐建造(罗文煌等,2006),封盖条件优越;周边经济发展水平高,碳源条件好。因此,通过 CO₂ 地质储存潜力适宜性评价,清江盆地储存潜力达到较适宜等级。

版石盆地和会昌盆地综合评分最低,封存潜力适宜性评价等级为较不适宜。版石盆地面积较小,盆地内储层厚度发育较小,孔渗性也较小,进而计算得到的 CO₂ 理论封存量小,反映出版石盆地封存能力有限,对适宜性评价十分不利。会昌盆地适宜性评价综合排名最后,主要原因有两方面:一是盆地面积较小,封存潜力有限;二是盆地位于江西省地震活动最频繁,历史上曾发生六级破坏性地震,盆地边缘活动性断裂最密集,周边发育有寻乌—石城、九连山—安远、三南—寻乌等发震断裂带,地壳稳定性较差,对 CO₂ 长期稳定储存的安全性不利。

5 结论

(1)江西省中新生代沉积盆地 CO₂ 有效储存量为 18 226.3×10⁶ t。束缚气储存机理有效储存量为 16 869×10⁶ t,溶解气储存机理有效储存量为 1 357.3×10⁶ t。

(2)充分考虑影响沉积盆地 CO₂ 地质储存的多重因素,构建了以地质安全性、储存规模、社会经济性为核心、涵盖 19 项评价指标的 CO₂ 地质储存潜力适宜性综合评价指标体系。

(3)江西省 CO₂ 地质储存适宜性优先顺序分别为:鄱阳盆地、清江盆地、信江盆地、抚州盆地、赣州盆地、

锦江盆地、吉泰盆地、版石盆地、会昌盆地。鄱阳盆地、清江盆地储存潜力分别达到适宜、较适宜等级,可作为江西省 CO₂ 地质储存优先考虑盆地。

致谢:感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和辛勤付出!

参考文献(References):

- 储莎,陈来.基于变异系数法的安徽省节能减排评价研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(3):512-516.
- CHU Sha, CHEN Lai. Evaluation of Energy Saving and Emission Reduction of Anhui Based on Variance Coefficient Approach [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(3): 512-516.
- 刁玉杰,张森琦,郭建强,等.深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性评价方法研究[J].中国地质,2011,38(3):786-792.
- DIAO Yujie, ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, et al. Geological safety evaluation method for CO₂ geological storage in deep saline aquifer[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 786-792.
- 范基蛟,贾小丰,张森琦,等.CO₂ 地质储存潜力与适宜性评价方法及初步评价[J].水文地质工程地质,2011,38(6):108-112.
- FAN Jijiao, JIA Xiaofeng, ZHANG Senqi, et al. A study of CO₂ geological storage potential and suitability assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 108-112.
- 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,2014a.
- GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. Suitability evaluation and demonstration project of carbon dioxide geological storage in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014a.
- 郭建强,文冬光,张森琦,等.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,2014b.
- GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. The Atlas of Carbon Dioxide Geological Storage Potential and Suitability Evaluation of China Major Sedimentary Basins[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014b.
- 黄孝波,汪恩满,郑在邦,等.江西省南鄱阳盆地深部油气资源勘探及其意义[A].江西省地质学会论文汇编集[C].2016: 286-293.
- HUANG Xiaobo, WANG Enman, ZHENG Zaibang, et al. On exploration for deep hydrocarbon resources at south Poyang basin in Jiangxi and its significance[A]. Compilation of Papers by Jiangxi Geological Society[C]. 2016: 286-293.
- 江西省地质局.中国区域地质志·江西志[M].北京:地质出版社,2017.

- Jiangxi Bureau of Geology. Regional Geology of China-Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- 江西省统计局. 江西统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- Jiangxi Provincial Bureau of Statistics. Jiangxi Statistical Yearbook (2022)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- 李海燕, 彭仕宓, 许明阳, 等. CO₂ 在深部咸水层中的埋存机制研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 72-79.
- LI Haiyan, PENG Shimi, XU Mingyang, et al. CO₂ Storage Mechanism in Deep Saline Aquifers[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(2): 72-79.
- 李甫成, 张杨, 张晓娟, 等. 深部咸水层 CO₂ 地质储存适宜性评价方法研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 649-660.
- LI Fucheng, ZHANG Yang, ZHANG Xiaojuan, et al. Suitability evaluation method of CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 649-660.
- 李尚儒, 陈青云, 何攀, 等. 南鄱阳盆地页岩油气、致密油气资源调查评价[R]. 南昌, 江西省地质局工程地质大队, 2016.
- 梁兴, 叶舟, 吴根耀, 等. 鄱阳盆地构造—沉积特征及其演化史[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 404-429.
- LIANG Xing, YE Zhou, WU Genyao, et al. Sedimento-Tectonic Features and Geological Evolution of the Poyang Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(3): 404-429.
- 刘宁. 陆相沉积盆地砂岩储层 CO₂ 地质封存流体运移和水岩相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- LIU Ning. Study on Fluids Transportation and Water-rock Interactions of CO₂ Geological Storage in Sandstone Reservoirs in Continental Sedimentary Basins[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- 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, (S): 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, (S): 121-126.
- 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
- MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development Trend Analysis of Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544.
- 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, 2022a, 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, 2022a, 47(4): 1430-1451.
- 桑树勋, 刘世奇, 陆诗建, 等. 工程化 CCUS 全流程技术及其进展[J]. 气藏评价与开发, 2022b, 12(5): 711-725.
- SANG Shuxun, LIU Shiqi, LU Shijian, et al. Engineered full flow-sheet technology of CCUS and its research progress[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022b, 12(5): 711-725.
- 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.
- SHEN Pingping, LIAO Xinwei. Technique of CO₂ EOR and geological sequestration[M] Beijing: Petroleum Industry Press, 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.
- 王齐鑫, 马传明, 花勐健, 等. 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, 2017, 44(5): 121-130.
- WANG Qixin, MA Chuanming, HUA Mengjian, et al. Suitability evaluation of geological storage of CO₂ in sedimentary basin of Anhui Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 121-130.
- 肖富强, 章双龙, 祁星. 萍乐坳陷地区吴家坪期沉积环境的元素地球化学指示[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 231-239.
- XIAO Fuqiang, ZHANG Shuanglong, QI Xing. Elemental geochemical indication of sedimentary environment in Wujiaping period of Pingle depression area[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2020, 43(3): 231-239.
- 杨红, 赵习森, 康宇龙, 等. 鄂尔多斯盆地 CO₂ 地质封存适宜性与潜力评价[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 95-102.
- YANG Hong, ZHAO Xisen, KANG Yulong, et al. Evaluation on geological sequestration suitability and potential of CO₂ in Ordos Basin[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1): 95-102.
- 杨吉根. 清江盆地沉积构造分类及其特征分析[J]. 华东地质学院学报, 1988, 11(3): 201-207.
- YANG Jigen. Classification and Characteristic Analysis of Sedimentary Structures in the Qingjiang Basin[J]. Journal of East China College of Geology, 1988, 11(3): 201-207.

- 袁志刚. 碳达峰碳中和国家战略行动路线图 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2021.
- YUAN Zhigang. Carbon Peak and Carbon Neutralization National Strategic Action Roadmap [M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2021.
- 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.
- 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国 CO₂ 地质埋存条件分析及有关建议 [J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1107–1110.
- ZHANG Hongtao, WEN Dongguang, LI Yilian, et al. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(12): 1107–1110.
- 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.
- ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, LI Xufeng, et al. Geological Basis and Site Evaluation for Carbon Dioxide Geological Storage in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- 邹勇军, 肖富强, 章双龙, 等. 江西省温泉伴生气氮含量特征及其成因分析 [J]. 西北地质, 2022, 55(4): 85–94.
- ZOU Yongjun, XIAO Fuqiang, ZHANG Shuanglong, et al. Characteristics and causes of helium content in hot spring associated gas in Jiangxi Province [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 85–94.
- 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.
- IEA. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 [M]. International Energy Agency, 2022.
- Shuklar R, Ranjith P, Haque A, et al. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity [J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 2651–2664.
- Sun Lili, Dou Hongen, Li Zhiping, et al. Assessment of CO₂ storage potential and carbon capture, utilization and storage prospect in China [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(6): 970–977.