



东海陆架盆地咸水层CO₂封存地质条件适宜性评价

赵 勇, 李久娣, 杨鹏程, 沈 珊, 王丹萍, 董 鑫, 朱睿哲

Evaluation on of geological suitability for CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin

ZHAO Yong, LI Jiudi, YANG Pengcheng, SHEN Shan, WANG Danping, DONG Xin, and ZHU Ruizhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022121401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海陆架盆地东南部白垩系油气成藏条件

Cretaceous hydrocarbon accumulation conditions in the southeastern East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 169

东海陆架盆地西部坳陷带中生界残留盆地分布特征与勘探潜力

Distribution of residual Mesozoic basins and their exploration potential in the western depression zone of East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 41

东海陆架盆地南部中生代成盆过程的数值模拟

NUMERICAL SIMULATION OF MESOZOIC TECTONIC PROCESSES IN THE SOUTHERN PART OF EAST CHINA SEA CONTINENTAL SHELF BASIN

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 167

东海陆架盆地南部生长断层活动特征

Research on characteristics of growth faults in the southern East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 100

东海陆架盆地瓯江凹陷构造单元属性讨论

Discussion on the tectonic attributes of Oujiang Sag, East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 62

东海陆架盆地南部中生代断裂系统与盆地结构

Mesozoic fault system in the Southern East China Sea Shelf Basin and its bearing on basin structures

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 52



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵勇, 李久娣, 杨鹏程, 等. 东海陆架盆地咸水层 CO₂ 封存地质条件适宜性评价 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 129-139.

ZHAO Yong, LI Jiudi, YANG Pengcheng, et al. Evaluation on of geological suitability for CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 129-139.

东海陆架盆地咸水层 CO₂ 封存地质条件适宜性评价

赵勇, 李久娣, 杨鹏程, 沈珊, 王丹萍, 董鑫, 朱睿哲

中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120

摘要: 系统分析了东海陆架盆地咸水层 CO₂ 封存的关键地质要素, 认为在构造和沉积演化的控制下盆地表现出“整体封存有利、东西封存差异”的特征, 东部拗陷裂陷充分, 构造单元面积大、沉积厚并且地层发育全, 潜在封存层系为中新统和渐新统; 西部拗陷裂陷早, 构造单元面积相对小、地层薄并且地层时代老, CO₂ 封存的有利储盖组合为古新统—始新统。对各二级构造单元咸水层 CO₂ 的封存量进行了计算, 结果表明, 东海陆架盆地 D 级咸水层 CO₂ 封存量为 636.2 亿 t, 其中东部拗陷的西湖凹陷和基隆凹陷封存量最大, 均超过 100 亿 t, 其次为西部拗陷的瓯江凹陷, 达到 64 亿 t。结合关键封存要素建立了东海陆架盆地 D 级 CO₂ 地质储存适宜性评价指标体系, 并对各评价单元进行了适宜性评价, 结果表明西湖凹陷和瓯江凹陷 CO₂ 封存适宜性最好, 为东海陆架盆地 CO₂ 封存的有利远景区。

关键词: CO₂ 封存; 封存潜力; 封存适宜性; 东海陆架盆地

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022121401

Evaluation on of geological suitability for CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin

ZHAO Yong, LI Jiudi, YANG Pengcheng, SHEN Shan, WANG Danping, DONG Xin, ZHU Ruizhe

Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China

Abstract: Abstracts: Based on the systematic analysis of key geological elements of CO₂ storage in salty aquifers in the East China Sea Shelf Basin, it is believed that under the control of tectonic and sedimentary evolution, the basin shows the characteristics of "Favorable for overall storage, but having differences in the eastern and western depression". The eastern depression is fully rifted, with a large tectonic unit area, thick sediment, and full stratigraphic development; and the potential sequestration systems are the Miocene and Oligocene. The western depression was rifted early, the tectonic unit area is relatively small, with thin and old strata, and the favorable reservoir-cap assemblages for CO₂ storage are the Paleocene and Eocene. The CO₂ storage capacity of the salty aquifers in each secondary tectonic unit was calculated. Results show that the CO₂ storage in the D-level salty aquifers of the East China Sea shelf basin is 63.62 billion tons, among which the storage capacity in the Xihu Sag and the Jilong Sag in the eastern depression is the largest, both exceeding 10 billion tons, followed by the Oujiang Sag in the western depression, reaching 6.4 billion tons. Combined with the key storage factors, an index system for evaluating the suitability of D-class CO₂ geological storage in the East China Sea shelf basin was established. An index system for evaluating the suitability of D-level CO₂ geological storage in the East China Sea shelf basin was established. The suitability of each evaluation unit was also evaluated. Overall, Xihu Sag and Oujiang Sag have the best suitability for CO₂ storage and are favorable prospective areas for CO₂ storage in the East China Sea shelf basin.

Key words: CO₂ storage; storage capacity; storage suitability; East China Sea shelf basin

近年来, 减少 CO₂ 为主的温室气体过量排放可有效抑制全球气候变暖并改善生物生存状况已经在国际上达成共识^[1-2]。为了有效减排温室气体, 早在 1997 年, 《联合国气候变化框架公约》缔约方签署了发达国家率先减排的《京都议定书》, 当时中国虽然没有承担减排任务, 但作为潜在的第一大排放

国仍然面临巨大压力^[3], 2020 年习近平主席在第七十五届联合国大会上发表重要讲话并提出我国 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 力争 2060 年前实现碳中和。而 CO₂ 捕集利用及封存技术 (CCUS) 是能够大量减少 CO₂ 排放、有效缓解全球气候变暖的可行路径^[4]。国际能源署 (IEA) 提出至

资助项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目“东海西湖凹陷 CO₂ 地质封存技术研究”(P22175)

作者简介: 赵勇(1966—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事油气田开发研究工作, E-mail: zhaoyong.shhy@sinopec.com

通讯作者: 杨鹏程(1988—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事石油地质、CO₂ 封存地质评价综合研究, E-mail: yangpch.shhy@sinopec.com

收稿日期: 2022-12-14; 改回日期: 2023-01-14. 张现荣编辑

2050年CCUS技术将成为减排份额最大的单体技术^[5]。在“双碳”背景下,CCUS将成为我国实现碳中和目标不可或缺的关键性技术之一^[6]。目前CO₂封存的主要方式包括酸化固定、海洋封存以及地质封存,而地质封存技术更成熟,封存潜力更大^[7-8],地质封存的方式主要包括油气藏、不可采煤层以及深部咸水层,其中深部咸水层封存潜力巨大,是目前CCUS工程中最具前景的地质储存体^[9]。

根据中国碳核算数据库(CEADs)碳排放量数据^[10-13],2019年度江浙沪三地碳排放总量达到1378.9 Mt,占全国总排放量的12.7%,碳源规模较大。但陆地上只有苏北盆地具备较好的封存条件,其余大部分地区为前古生代的沉积岩以及变质岩、岩浆岩发育区,因此开展东海陆架盆地这一近海盆地的CO₂封存潜力与适宜性评价意义重大。

根据评价精度差异可以将CO₂地质条件的潜力与适宜性评价分为5个阶段^[14],由低到高分别是区域级(E级)、盆地级(D级)、目标区级(C级)、场地级(B级)和灌注级(A级)^[10],东海陆架盆地的评价属于D级。东海陆架盆地因盆地面积大、地震活

动弱及储盖组合多,被诸多专家学者认为是中国及近海陆缘盆地CO₂地质封存的最有利地区之一^[14-15],但目前针对该盆地CO₂封存关键要素的研究少,缺乏对盆地内二级构造单元的评价优选,重点封存层系和有利封存单元不明确,对封存潜力的认识也不统一^[16-18],这制约了CO₂封存区带级和场地级的精细评价和优选。本文以东海陆架盆地的二级构造单元为研究对象,系统分析了不同单元CO₂封存关键要素的差异,明确了CO₂封存的重点层系和平面单元,并进行了D级封存潜力的计算,最终评价优选了盆地内CO₂封存的最有利单元。

1 区域地质概况

东海陆架盆地位于中国东海海域,总体为NE向,面积25万km²,是中国近海陆架最大的沉积盆地^[19]。构造位置上,东海陆架盆地位于浙闽隆起区东部,钓鱼岛隆褶带西部;盆地类型上,为以新生代沉积为主的大型中、新生代叠合含油气盆地^[20];在构造格局上,东海陆架盆地平面上表现为明显的

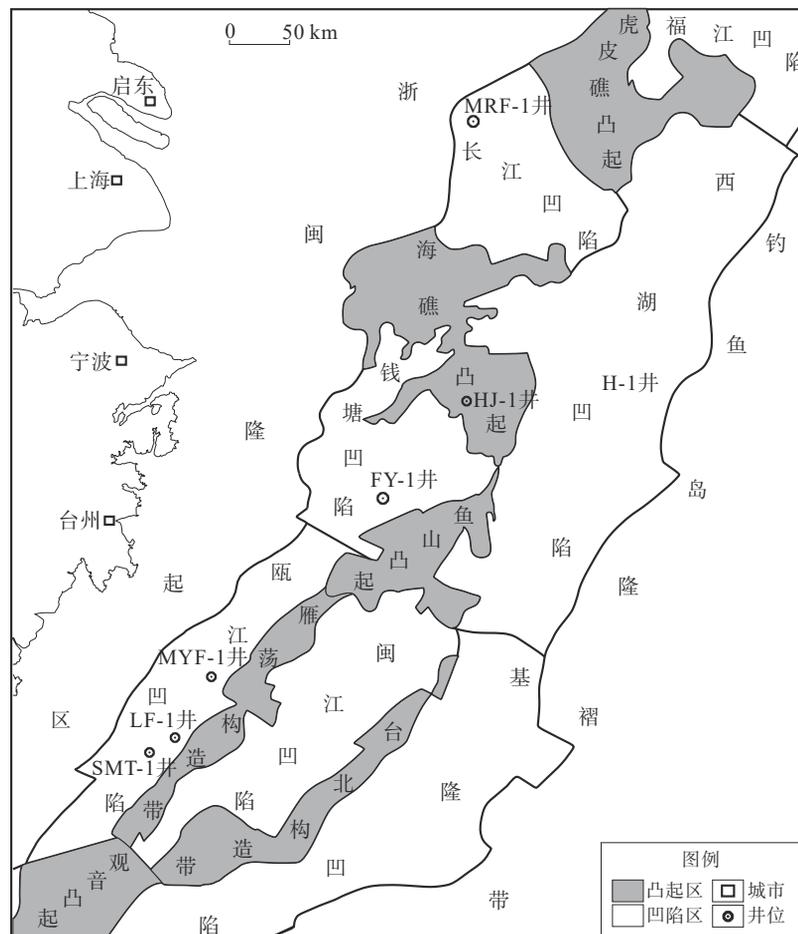


图1 东海陆架盆地构造纲要图

Fig.1 Tectonic outline of the East China Sea Shelf Basin

“东西分带、南北分块”,自西向东分为西部拗陷、中部低隆起和东部拗陷,其中西部拗陷包括长江凹陷、钱塘凹陷、瓯江凹陷,中部低隆起包括虎皮礁凸起、海礁凸起、鱼山凸起、武夷低凸起(划分为雁荡构造带、闽江凹陷以及台北构造带),东部拗陷包括福江凹陷、西湖凹陷以及基隆凹陷(图1);东海陆架盆地纵向上则表现为“东断西超、下断上拗”的特征,新生代受欧亚板块、太平洋板块和印度板块活动的共同控制,构造演化经历了古新世—始新世的断陷期、渐新世—晚中新世的拗陷-反转期和中新世之后的沉降期3个演化阶段^[20-21]。盆地沉积厚度最大9000~15000 m,新生代地层发育齐全,由老到新沉积的地层有古新统月桂峰组(美人峰组)、灵峰组、明月峰组,始新统宝石组(瓯江组、温州组)、平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统的三潭组以及更新统的东海群,古近系之下为中生界及元古界变质岩基底^[21]。因此,东海陆架盆地具有规模大、沉积地层厚、晚期构造相对稳定的特征,这些地质条件为盆地CO₂封存奠定了良好的基础。

2 CO₂封存关键地质要素评价

2.1 构造演化及地层特征

在太平洋构造体制控制下,东海陆架盆地自白垩纪以来进入弧后裂陷演化阶段,盆地的构造活动和沉积中心具有自西向东的迁移规律^[20]。其中西部拗陷于古新世进入断陷期,在始新世进入拗陷期,始新世末抬升剥蚀,中新世进入沉降阶段;东部拗陷始新世进入断陷期,在渐新世至中新世进入拗陷期,上新世后进入沉降阶段;而东侧的冲绳海槽盆地自晚中新世以来成为了裂陷中心。在构造活动和沉积中心的迁移下,东海陆架盆地不同地区沉积地层厚度存在着明显的差异,东部拗陷裂陷时间长,地层发育齐全,沉积厚度为3000~14000 m,其中渐新统和中新统的厚度就达5000 m。西部拗陷裂陷时间早且相对较短,缺失渐新统,沉积厚度多为4000~5000 m,瓯江凹陷可达8000 m左右,其中古新统厚度就可达3000~5000 m。中部隆起的凸起上地层厚度多在2000 m左右,多为中新统以上地层直接覆盖在前新生界基底之上。

结合盆地构造迁移和地层发育特征,考虑CO₂有利封存窗口(800~3500 m),西部拗陷封存层系主要是始新统和古新统,其次为中新统;而东部拗

陷封存层系主要以中新统和渐新统为主,封存地层新;中部隆起的凸起之上主要为中新统,但厚度薄。结合封存单元面积、地层发育情况可以初步推断东部拗陷咸水层封存潜力更大。

2.2 区域地壳稳定性

根据中国海域地震活动研究结果,东海陆架盆地为地震活动的围空区,基本为无震稳定区,历史地震强度弱,零散分布震级小于6级的震中^[22]。对比而言,盆地东部冲绳海槽盆地则为地震活动活跃区,其次为盆地西部的浙闽隆起带以及陆区。

断裂发育特征方面,盆地主要发育四期断裂,即燕山期、喜马拉雅早期、喜马拉雅中期和喜马拉雅晚期,其中晚期断裂对CO₂封存影响最大,研究表明东海断裂活动性随着盆地演化由北向南、由西向东迁移,目前活动断裂主要分布在盆地东部冲绳海槽中南部以及盆地基隆凹陷南端,盆地主体现今断裂活动弱^[23]。岩浆发育特征方面,海域岩浆岩多分布在隆起部位或凹陷的边缘位置,发育时间为20~2 Ma^[24],其中西湖凹陷孤山1井1996 m处实测凝灰岩同位素年龄为14.7 Ma,现今岩浆活动不活跃,保存条件好。

从地震活动性、活动断裂发育以及岩浆发育情况可以判断东海陆架盆地整体有较好的地壳稳定性,基隆凹陷因活动断裂发育导致保存条件相对较差。

2.3 地热及水文条件

东海盆地大地热流值整体表现为西低东高,西部变化小而东部变化剧烈的特征。钻井揭示,西部地温梯度约为2.5℃/100m,大地热流56 mW/m²;盆地东部地温梯度为2.8~3.3℃/100m,大地热流63~88 mW/m²;而东部冲绳海槽盆地为热流高异常区^[25],表明东海陆架盆地地壳相对稳定,东部冲绳海槽盆地相对剧烈。东海陆架盆地的地温梯度和大地热流相对低,有利于CO₂封存。

平湖组以上地层根据构造和沉积特征的差异可以划分为平湖组、花港组、龙井组、玉泉组+柳浪组、三潭组+东海群5个含水系统^[26],这些含水系统的地层水矿化度为6~30.66 g/L,纵向上平湖组、花港组和中龙井组为重碳酸钠水型,平均为7 g/L,达到咸水级别;玉泉组上部和平湖组下部为高矿化度氯化钙型水,为19.12~30.65 g/L,达到盐水级别^[27]。可见平湖组以上的5个含水系统均达到咸水层封存的矿化度标准,层系上中新统上部地层矿化度更

高、水型更好且地层埋深更浅,是最有利的封存层系。

2.4 沉积及储盖组合特征

古新统沉积时期,东海陆架盆地南部受到海侵影响,形成了南海北陆的沉积格局^[21],南部以滨浅海-三角洲沉积环境为主,浙闽隆起物源进入瓯江凹陷,发育三角洲有利储集体,北部长江凹陷主要发育半深湖-三角洲沉积环境;始新统沉积时期,海水由南向北侵入,南部发育滨浅海-三角洲沉积环境,浙闽隆起仍是西部物源发育区,北部西湖凹陷表现三角洲-潮坪的海陆过渡相沉积环境,物源主要来自西侧海礁凸起、鱼山凸起及东侧的钓鱼岛隆褶带;渐新统主要发育在东部拗陷,以河流-湖泊沉积环境为主;中新统在全区都有分布,主要为河流-湖泊的陆相沉积环境为主。沉积体系的分布和演化进一步决定了储盖组合的发育特征。

对不同地区钻井的储盖组合进行了系统评价(图2),东部拗陷和西部拗陷具有明显的差异。西部拗陷的中新统主要发育河流相,砂地比普遍较高,区域盖层缺乏,储盖组合一般,钱塘凹陷和瓯江凹陷的钻井揭示盖层厚度仅20 m左右,仅长江凹陷钻井揭示较好的储盖组合;古新统和始新统储盖组合相对有利,尤其是在瓯江凹陷,在滨浅海背景下发育稳定的三角洲沉积环境,储盖组合有利;前新生界的白垩系在钱塘凹陷和瓯江凹陷也发育有利储盖组合,但埋深相对较大。东部拗陷的中新统和渐新统均发育河流-湖泊沉积环境,纵向发育多套有利储盖组合,均为有利封存层系,渐新统以下地层由于埋深大储层物性变差;中部隆起的凸起之上中新统与西部拗陷沉积环境相似,且有火山岩发育,基岩以火山岩和变质岩为主,储盖条件差。因此,东部拗陷潜在封存层系为中新统和渐新统;西部拗陷潜在封存层系为古新统一始新统,其次为中新统和前新生界地层。

3 封存潜力计算

3.1 计算方法

咸水层 CO₂ 封存的主要机理包括构造地层封存机理、残余气封存机理、溶解封存机理、矿物封存机理以及水动力封存机理^[28-29]。由于构造圈闭在咸水层储量中所占比例很小,潜力计算过程中主要考虑残余封存和溶解封存。咸水层 CO₂ 封存潜力的计算目前尚无统一方法,其中碳领导人论坛提出

的方法考虑了溶解封存量和残余封存量,在国际上影响力较大,本文主要采用该方法公式如下^[30-31]:

$$M_{CO_2r} = \Delta V_{trap} \times \Phi \times S_{CO_2t} \times \rho_{CO_2r} \quad (1)$$

$$M_{CO_2d} = A \times H \times \Phi \times \rho_i \times S_{CO_2} \quad (2)$$

$$M_{CO_2es} = (M_{CO_2r} + M_{CO_2d}) \times E \quad (3)$$

其中, M_{CO_2r} 为残余气封存量(t); M_{CO_2d} 为溶解封存量(t); M_{CO_2es} 为有效封存量(t);

A 为评价单元面积(km²); H 为储层有效厚度(m); Φ 为储层孔隙度(%); ρ_i 为地层水密度(kg/m³); S_{CO_2} 为 CO₂ 在地层水中的溶解度(mol/kg); ΔV_{trap} 为评价单元内深部咸水层的体积(m³); S_{CO_2t} 表示 CO₂ 的饱和度(%); ρ_{CO_2r} 表示地层内 CO₂ 密度(kg/m³); E 为效封存系数,反映了 CO₂ 占据整个孔隙体积的比例,平均值取 0.024^[32-33]。

盆地 D 级推定潜力的计算主要是对盆地二级构造单元的咸水层封存潜力分别进行计算而后累加得到,其中二级构造单元的封存潜力计算为各层储盖组合封存量之和。储层厚度以实钻井剖面为依据进行合理概化处理,对薄储层段合理归并;对储层的孔隙度、含水饱和度等参数也进行概化处理,取层段平均值;储层面积主要结合评价单元的沉积相带展布进行合理圈定;CO₂ 密度根据地层温度和压力利用插值法求取;液流逆流后被圈闭的 CO₂ 的饱和度主要根据地层水孔隙度按照经验公式计算;初始地层水密度根据地层水矿化度按照经验公式计算;CO₂ 在地层中的溶解度根据地层实际温度和压力按照经验公式计算。有效封存系数由于东海陆架盆地未做过针对性实验,按照国际能源机构温室气体研发计划中心提出的方案,取 0.024^[32]。无井地区的关键参数主要根据沉积环境、储层埋深和储层厚度等参数与有井区进行类比得到。

3.2 计算结果

对东海陆架盆地二级构造单元进行了封存潜力的计算,结果见表1,封存潜力最大的主要为东部拗陷的西湖凹陷和基隆凹陷,具有百亿吨以上的封存潜力;其次为西部拗陷的瓯江凹陷、长江凹陷、钱塘凹陷以及闽江凹陷,具有 50 亿 t 左右的封存潜力;最后是中部低隆起的凸起区,虎皮礁凸起、海礁凸起、鱼山凸起以及台北低凸起封存潜力在 5 亿~21 亿 t。从封存层系看,西部拗陷主要为古新统和始新统,其次为中新统和白垩系;东部拗陷主要为中新统和渐新统;凸起之上主要为中新统。各评价

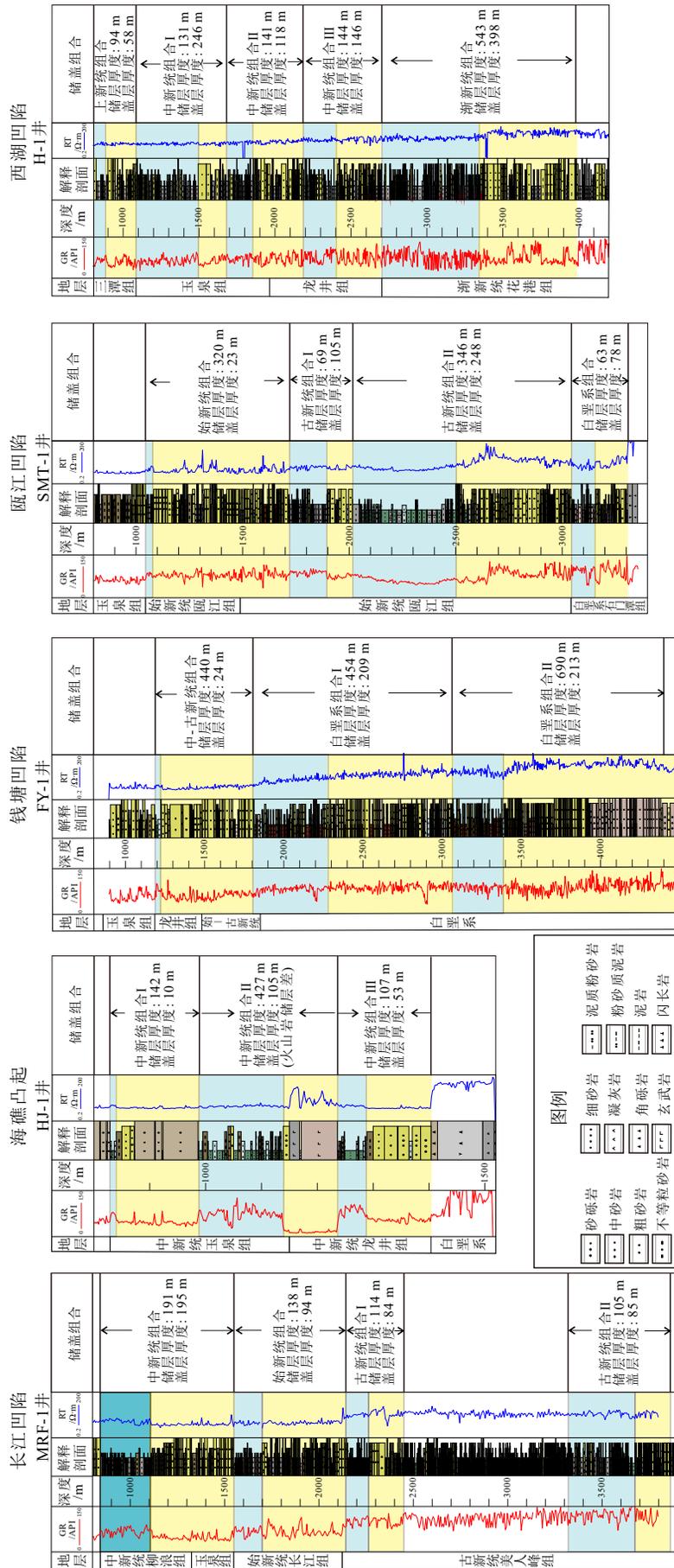


图 2 东海陆架盆地不同构造单元储盖组合发育图
Fig.2 Reservoir-cap assemblages of different tectonic units in the East China Sea Shelf Basin

表1 东海陆架盆地二级构造单元咸水层封存潜力计算表
Table 1 Calculation of salty aquifers' storage capacity of the secondary structural unit in East China Sea Shelf Basin

评价单元	单元面积/(10 ⁴ km ²)	束缚封存量/(10 ⁶ t)	溶解封存量/(10 ⁶ t)	有效封存量/(10 ⁸ t)	主要封存层系
长江凹陷	1.6	3 064.7	1 482.7	45.5	中新统、始新统
钱塘凹陷	1.5	3 414.9	1 585.3	50.0	中新统、白垩系
瓯江凹陷	1.9	4 975.9	1 456.5	64.3	中新统、始新统—古新统
虎皮礁凸起	1.6	603.8	402.2	10.1	中新统为主
海礁凸起	1.8	679.3	452.5	11.3	中新统为主
鱼山凸起	0.8	301.9	201.1	5.0	中新统为主
雁荡构造带	0.4	770.6	35.6	8.1	中新统为主
台北构造带	0.5	1 582.1	517.8	21.0	中新统、白垩系
闽江凹陷	2.8	3 864.4	1 245.6	51.1	中新统、白垩系
西湖凹陷	5.9	21 580.1	4 633.8	262.1	渐新统、中新统
基隆凹陷	2.9	8 843.8	1 928.5	107.7	渐新统、中新统
总计	21.7	49 681.5	13 941.6	636.2	

单元累加得到东海陆架盆地咸水层 D 级推定潜力, 为 636.2 亿 t, 可见东海陆架盆地咸水层封存潜力非常可观。

4 封存适宜性评价

4.1 评价体系建立

CO₂ 封存 D 级评价指标体系目前尚无统一标准, 但应该遵循全面性与针对性结合、可行性与操作性结合、科学性与客观性结合以及系统性与层次性结合的原则^[34], 中外不同学者提出过不同的评价指标及分级标准^[14,34-35], 本次在前人研究基础上, 结合东海陆架盆地地质特点建立了东海陆架盆地的指标体系, 包括 3 个评价指标层和 18 个评价指标(表 2)。

评价指标层主要包括地质安全性、储存规模和经济适宜性 3 个方面, 其中地质安全性指标主要包括地壳稳定性和区域盖层, 由于东海陆架盆地整体处于地震围空区, 地壳稳定性评价重点针对活动断裂; 区域盖层条件是咸水层 CO₂ 封存的关键参数, 设置了盖层的岩性、盖层厚度、盖层分布的连续性、渗透率以及盖层二次截留能力共 5 个指标。储存规模指标层主要包括构造单元规模、区域性储层和储存潜力, 构造单元规模包括评价单元的面积和厚度 2 个指标; 区域性储层是咸水层 CO₂ 封存的关键参数, 主要包括储集岩的岩性、储层厚度、储层

砂厚比、沉积相带、孔隙度以及渗透率 6 个指标; 储存潜力主要包括 D 级推定潜力以及单位面积 D 级推定潜力 2 个指标。经济适宜性指标层主要设置了勘探开发程度和离岸距离 2 个指标, 由于东海陆架盆地水深变化范围不大, 不再设置水深的评价指标。该体系在指标层和指标方面舍弃了与勘探程度不相符的指标以及区分度差的指标, 并且反映了东海陆架盆地地质特点。

评价指标的分级主要参照《中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程》^[14], 但重点考虑了东海陆架盆地实际地质特点, 指标分级兼顾客观性和针对性, 每个指标分为 5 级, 分别对应适宜、较适宜、一般适宜、较不适宜和不适宜, 并分别赋值 9 分、7 分、5 分、3 分和 1 分, 对于有多套储层或盖层单元的赋值按照每套储层或盖层的重要性加权平均。

对于评价指标层和具体指标评价的权重主要采用层次分析法^[14], 层次分析法的核心是将决策者经验判断定量化, 增强决策依据的准确性, 主要步骤包括构造判断矩阵、计算权重与一致性检验, 详细计算过程和参数见文献^[36]。利用层次分析法对东海陆架盆地咸水层 CO₂ 封存适宜性的评价指标层进行了权重计算(表 3), 计算结果符合一致性检验, 结果表明储存规模权重最高, 其次为地质安全性和经济适宜性。同理, 对各评价指标层利用层系分析法也开展了权重计算, 结果表明活动断裂、勘探程度、离岸距离、D 级推定潜力、单位面积 D 级推定潜力、盖层厚度、盖层渗透率权重较高(表 4),

表 2 东海陆架盆地 D 级 CO₂ 地质封存适宜性指标标准分级表
Table 2 Classification of suitability index criteria for D-level CO₂ geological storage in the East China Sea Shelf Basin

评价指标层	评价指标 (权重)	适宜	较适宜	一般适宜	较不适宜	不适宜	
地质安全性	地壳稳定性	活动断裂	远离活动断裂带, 无活动断裂通过	距活动断裂较近, 无活动断裂通过	有新近纪断裂通过, 但断裂在全新世活动不明显	有活动断裂通过, 但活动断裂规模较小、活动较弱	位于大活动断裂带上, 断裂活动强烈
	地质安全性	盖层的岩性	泥岩、钙质泥岩	含砂泥岩、含粉砂泥岩	粉砂质泥岩、砂岩泥岩	泥质粉砂岩、泥质砂岩	裂缝发育的灰岩、粗碎屑砂岩
		盖层厚度/m	>100	100~50	50~30	10~30	<10
		区域性盖层	盖层分布的连续性	连续, 稳定	较连续, 较稳定	连续性中等, 较稳定	连续性较差, 较不稳定
		渗透率 (K) / 10 ⁻³ μm ²	K<0.0001	0.0001≤K<0.001	0.001≤K<0.01	0.01≤K<0.1	K>0.1
	盖层二次截留能力	多套, 质量好	多套, 质量一般	一套, 质量好	一套, 质量一般	无	
储存规模	构造单元规模	评价单元的面积 (S) / km ²	S≥30000	20000≤S<30000	10000≤S<20000	5000≤S<10000	S<5000
		沉积地层厚度 (H) / m	H≥10000	6000≤H<10000	3000≤H<6000	800≤H<3000	H<800
	区域性储层	储集岩的岩性	碎屑岩	碎屑岩、碳酸盐岩混合	碳酸盐岩	岩浆岩、变质岩等特殊储层	无
		储层厚度/m	>100	50~80	20~50	10~20	<10
		储层砂厚比/%	>60	60~40	40~20	20~10	<10
		沉积相带	河流-三角洲	扇三角洲	滨海	浅海	深湖-半深湖
		孔隙度 (φ) / %	φ≥25	15≤φ<25	11≤φ<15	7≤φ<11	φ<7
		渗透率 (K) / 10 ⁻³ μm ²	K≥100	10≤K<100	1≤K<10	0.2≤K<1	K<0.2
	储存潜力	D级推定潜力 (M) / 10 ⁸ t	M>100	50<M≤100	20<M≤50	10<M≤20	M<10
		单位面积D级推定潜力 (m) / (10 ⁴ t·km ⁻²)	m>30	20<m≤30	10<m≤20	5<m≤10	m<5
经济适宜性	勘探开发程度	三维覆盖、钻井丰富、开发程度高	较多三维覆盖和钻井, 开发程度低	二维数据覆盖, 少量钻井	少量二维地震和钻井	无地震和钻井	
	离岸距离/km	0~100	100~200	200~300	300~400	>400	

表 3 评价指标层权重计算结果
Table 3 Results of weight calculation on the evaluation index layer

	地质安全性	储存规模	经济适宜性	权重Wi
地质安全性	1	1	2	0.387
储存规模	1	1	3	0.444
经济适宜性	1/2	1/3	1	0.169

λ_{max} (最大特征根) = 3.018, CI (一致性指标) = 0.009, CR (平均随机一致性) = 0.018 < 0.1

注: 表格中数值代表横行指标相对纵列指标进行重要性两两比较的值。

表 4 评价指标权重计算结果
Table 4 Results of weight calculation on the evaluation index

权重	活动断裂	盖层岩性	盖层厚度	盖层连续性	盖层渗透率	二次截留能力
	0.125	0.047	0.068	0.054	0.063	0.029
权重	单元面积	地层厚度	储层岩性	储层厚度	储层砂地比	沉积相
	0.056	0.056	0.038	0.044	0.024	0.024
权重	储层孔隙度	储层渗透率	D级推定潜力	单位面积D级推定潜力	勘探程度	离岸距离
	0.039	0.028	0.068	0.068	0.0845	0.0845

均大于0.06。

评价单元的CO₂地质储存适宜性综合评分由各评价指标层加权平均得到,计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i A_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

式中, P 为评价单元的CO₂地质储存适宜性综合评分值; n 为评价因子的总数; P_i 为第 i 个评价指标的给定指数; A_i 为第 i 个评价指标的权重。

4.2 评价结果

对东海陆架盆地二级构造单元CO₂封存的关键要素进行打分评价(表5),地壳稳定性盆地整体较好,但基隆凹陷近冲绳海槽活动断裂带,活动断裂发育程度高;在区域盖层方面,东部拗陷优于西部拗陷,中部低隆起盖层条件最差;在构造单元规模方面,东部拗陷构造面积大,沉积地层厚,其次为西部拗陷,最后是中部低隆起;在储层条件方面,不同二级构造单元均有储层发育,东部拗陷主要为中

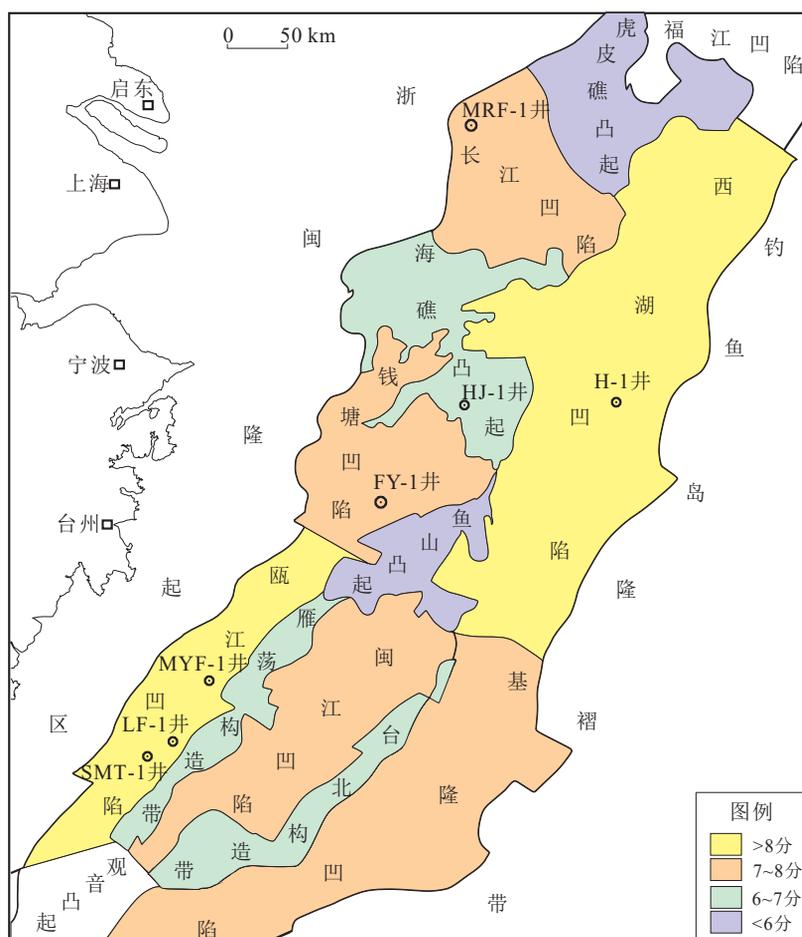
新统、渐新统,储层物性较好,西部拗陷主要为始新统和古新统,储层物性稍差,中部低隆起也发育较好的中新统储层;存储潜力方面,东部拗陷整体存储潜力较大,其次为西部拗陷,中部低隆起最小;在经济适宜性方面,西湖凹陷和瓯江凹陷已建有油气田,勘探程度最高,其余地区勘探程度较低;西部拗陷离岸最近,经济性最好,中部低隆起和东部拗陷次之。

最终的评价结果见表5和图3,评价结果显示,西湖凹陷是东海陆架盆地咸水层CO₂封存的最有利远景区,具有单元面积大、沉积地层厚、勘探程度高、无活动断裂发育、储盖组合有利及封存潜力大的特点,唯一的不利之处是离岸距离稍远(300 km),整体为东海盆地最有利的封存单元。其次为西部拗陷的瓯江凹陷,瓯江凹陷勘探程度较高,地层厚度大,储盖组合发育,离岸距离近(100 km),也有一定的封存规模,不利之处是封存层系偏老,以始新统和古新统为主,中新统储盖条件较差;此外,钱塘凹陷、闽江凹陷、长江凹陷和基隆凹陷也具有一定

表5 东海陆架盆地二级评价单元打分及综合评价

Table 5 Scoring and comprehensive evaluation of the secondary evaluation unit of East China Sea Shelf Basin

	虎皮礁 凸起	长江凹陷	鱼山凸起	钱塘凹陷	海礁凸起	瓯江凹陷	雁荡 低凸起	闽江凹陷	台北 低凸起	基隆凹陷	西湖凹陷
活动断裂	9	9	9	9	9	9	9	9	9	5	7
盖层的岩性	5	7	5	7	7	7	5	7	7	7	7
盖层厚度/m	5	9	5	7	5	9	5	7	7	9	9
盖层分布的连续性	3	7	3	5	3	7	3	7	3	9	9
渗透率(K)/10 ⁻³ μm ²	7	9	7	9	7	9	9	9	7	9	9
盖层二次截留能力	7	9	7	9	7	9	9	9	7	9	9
评价单元的面积(S)/km ²	5	5	3	5	5	5	3	5	3	9	9
沉积地层厚度(H)/m	3	5	3	5	3	7	3	7	5	9	9
储集岩的岩性	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9
储层厚度/m	9	7	7	7	7	9	9	7	7	7	9
储层砂厚比/%	9	9	9	9	9	7	5	5	5	7	9
沉积相带	9	9	9	9	9	7	5	5	5	7	9
孔隙度(Φ)/%	9	9	9	7	9	9	9	7	7	7	9
渗透率(K)/10 ⁻³ μm ²	9	9	9	7	9	9	9	7	7	7	9
D级推定潜力(M)/10 ⁸ t	3	5	1	7	3	7	1	7	5	9	9
单位面积D级推定潜力(m)/(10 ⁴ t·km ⁻²)	3	7	3	9	3	9	5	9	7	9	9
勘探程度	3	5	3	5	5	7	5	5	3	3	9
离岸距离/km	3	5	5	7	7	9	7	5	5	3	3
综合得分	5.78	7.32	5.62	7.33	6.30	8.20	6.17	7.27	6.20	7.24	8.37

图3 东海陆架盆地二级评价单元CO₂封存适宜性评价结果Fig.3 Results of CO₂ storage suitability evaluation for secondary evaluation unit in East China Sea Shelf Basin

的CO₂封存条件,但离岸距离相对远,储盖条件一般,封存适宜性中等。而虎皮礁凸起和鱼山凸起由于地层少,储盖组合发育差,封存量小,封存适宜性较差。

5 结论

(1) 东海陆架盆地具备咸水层CO₂封存的有利地质要素,具有盆地面积大、地壳稳定性高、储盖组合发育、大地热流低以及含水系统发育的有利条件。在构造和沉积差异演化控制下,东部拗陷和西部拗陷表现出不同封存特点,其中东部拗陷评价单元面积更大、地层发育齐全、储盖组合更好,封存有利层系为中新统和渐新统,封存潜力大;西部拗陷盆地面积相对较小,地层较老,封存层系主要为古新统一始新统,封存潜力中等。

(2) 对东海陆架盆地二级构造单元咸水层CO₂封存量进行了计算,结果显示东部拗陷封存潜力最大,西湖拗陷咸水层封存量为262.1亿t,基隆

拗陷为107.7亿t;西部拗陷封存潜力中等,其中瓯江拗陷封存量最大,为64.3亿t;中部隆起的凸起区封存潜力小。

(3) 首次系统建立了东海陆架盆地D级CO₂封存评价指标体系,并利用层系分析法确定了指标权重,对各评价单元展开了详细赋值评价,结果表明西湖拗陷和瓯江拗陷CO₂封存适宜性最好,为东海陆架盆地CO₂封存的有利远景区。

参考文献 (References)

- [1] Bachu S. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change [J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41 (9): 953-970.
- [2] 路萍,白勇,刘伟刚,等.鄂尔多斯盆地马家沟组二氧化碳地质封存有利区优选[J]. *地质论评*, 2021, 67(3): 816-827. [LU Ping, BAI Yong, LIU Weigang, et al. Optimization of favorable areas for carbon dioxide geological storage in Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Geological Review*, 2021, 67(3): 816-827.]
- [3] 李小春,方志明.中国CO₂地质埋存关联技术的现状[J]. *岩土力学*,

- 2007, 28(10): 2229-2233,2239. [LI Xiaochun, FANG Zhiming. Status quo of connection technologies of CO₂ geological storage in China [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2229-2233,2239.]
- [4] 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.]
- [5] 白云云, 丁鑫, 梁颖, 等. 碳中和背景下鄂尔多斯盆地地质封存CO₂封堵层特征研究[J]. 河南科学, 2021, 39(8): 1373-1376. [BAI Yunyun, DING Xin, LIANG Ying, et al. The characteristics of CO₂ sealing layer in the Ordos Basin under the background of carbon neutrality [J]. *Henan Science*, 2021, 39(8): 1373-1376.]
- [6] 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]. 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. [CAI Bofeng, LI Qi, ZHANG Xian, et al. Annual report of China carbon capture, utilization and storage (CCUS) (2021): China CCUS pathway research[R]. Environmental Planning Institute of Ministry of Ecology and Environment, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China 21st Century Agenda Management Center, 2021.]
- [7] 曹龙, 边利恒. CO₂地质封存技术与封存潜力评价方法研究进展[J]. 地下水, 2013, 35(6): 211-213. [CAO Long, BIAN Liheng. Advances in CO₂ geological storage technology and evaluation methods of storage potential [J]. *Ground Water*, 2013, 35(6): 211-213.]
- [8] 李光, 刘建军, 刘强, 等. 二氧化碳地质封存研究进展综述[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(4): 41-48. [LI Guang, LIU Jianjun, LIU Qiang, et al. Review on geological storage of carbon dioxide [J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2016, 3(4): 41-48.]
- [9] Bachu S. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 188-202.
- [10] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [11] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016-2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 54.
- [12] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [13] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 742-750.
- [14] 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: 1-348. [GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. Evaluation and Demonstration Project of Carbon Dioxide Geological Storage Suitability in China [M]. Beijing: Geology Press, 2014: 1-348.]
- [15] 臧雅琼. 我国含油气盆地CO₂地质封存潜力分析[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2013: 1-55. [ZANG Yaqiong. Analysis of CO₂ geological sequestration potential of Chinese Petroliferous Basins[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2013: 1-55.]
- [16] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D]. 大连海事大学博士学位论文, 2014: 1-197. [HUO Chuanlin. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China[D]. Doctor Dissertation of Dalian Maritime University, 2014: 1-197.]
- [17] 曹珂, 许瑞军. 中国东部海域CO₂地质储存潜力与适宜性评价[J]. 地质论评, 2015, 61(S1): 3. [CAO Ke, XU Ruijun. Evaluation of CO₂ geological storage potential and suitability in the East China Sea [J]. *Geological Review*, 2015, 61(S1): 3.]
- [18] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层CO₂储存优先区域选择[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 963-968. [LI Xiaochun, LIU Yanfeng, BAI Bing, et al. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963-968.]
- [19] 白莹. 中国东部中、新生代盆地演化特征及构造迁移规律[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014: 1-67. [BAI Ying. Evolution features and tectonic migration trends of the Mesozoic and Cenozoic Basins in eastern China[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2014: 1-67.]
- [20] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 675-691. [LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic Basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 675-691.]
- [21] 赵磊. 东海陆架盆地古近系沉积体系研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2013: 1-73. [ZHAO Lei. Study on Paleogene Sedimentary System of East China Sea shelf Basin[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2013: 1-73.]
- [22] 李小军, 陈苏, 任治坤, 等. 海域地震区划关键技术研究项目及研究进展[J]. 地震科学进展, 2020, 50(1): 2-19. [LI Xiaojun, CHEN Su, REN Zhikun, et al. Project plan and research progress on key technologies of seismic zoning in sea areas [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2020, 50(1): 2-19.]
- [23] 孙和清, 黄福林. 东海晚新生代断裂活动的初步研究[J]. 海洋地质动态, 1992(1): 6-8. [SUN Heqing, HUANG Fulin. A preliminary study of Late Cenozoic fault activity in the East China Sea [J]. *Marine Geological Dynamics*, 1992(1): 6-8.]
- [24] 杨传胜, 李刚, 杨长清, 等. 东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 125-133. [YANG Chuansheng, LI Gang, YANG Changqing, et al. Temporal and spatial distribution of the igneous rocks in the East China Sea Shelf Basin and its adjacent regions [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 125-133.]
- [25] 许薇龄, 焦荣昌, 乐俊英, 等. 东海陆架区地热研究[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(2): 32-38. [XU Weiling, JIAO Rongchang, YUE Junying, et al. Geothermal study on the continent shelf of the East China Sea [J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(2): 32-38.]
- [26] 汪蕴璞, 林锦璇, 汪林. 论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分: 以东海西湖凹陷为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(4): 393-398. [WANG Yunpu, LIN Jinxuan, WANG Lin. Division of water-bearing systems and hydrogeological periods of oil (gas): bearing Basin-with Xihu Depression in East China Sea as an

- example [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20 (4): 393-398.]
- [27] 胡必规, 张韞. 东海盆地油田水文地球化学特征与油气聚集关系探讨[J]. *海洋地质动态*, 1988 (5): 16-19. [HU Bigui, ZHANG Yun. Relationship between hydrologic geochemistry and hydrocarbon accumulation in the East China Sea Basin [J]. *Marine Geological Dynamics*, 1988 (5): 16-19.]
- [28] Bachu S, Bonijoly D, Bradshaw J, et al. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1 (4): 430-443.
- [29] Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, et al. CO₂ storage capacity estimation: issues and development of standards [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1 (1): 62-68.
- [30] Bachu S. Estimation of CO₂ storage capacity in geological media-phase II[R]. Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), 2007.
- [31] 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.]
- [32] IEA GHG (International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme). Development of Storage Coefficients for CO₂ storage in deep saline formations [EB/OL]. (2009-11-13)[2021-06-25]. <http://www.ieaghg.org/>.
- [33] 李海兵. 塔里木盆地二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2012: 1-96. [LI Haibing. Carbon dioxide geological storage potential and of Tarim Basin[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2012: 1-96.]
- [34] 杨霄翼, 刘延锋, 徐连三. 深部咸水层CO₂地质埋存适宜性评价指标体系及其应用[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21 (5): 71-77. [YANG Xiaoyi, LIU Yanfeng, XU Liansan. Construction and application of comprehensive evaluation index system for the suitability of CO₂ geological storage in deep saline aquifer [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, 21 (5): 71-77.]
- [35] Bachu S. Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44 (3): 277-289.
- [36] 曹茂林. 层次分析法确定评价指标权重及Excel计算[J]. *江苏科技信息*, 2012, 29 (2): 39-40. [CAO Maolin. Analytic hierarchy process to determine the weight of evaluation index and Excel calculation [J]. *Jiangsu Science and Technology Information*, 2012, 29 (2): 39-40.]